

Expertise scientifique collective

Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

**RAPPORT
D'EXPERTISE**

juin 2014



Directeurs de la publication

Alain Fuchs (CNRS), François Jacq (Ifremer)

Pilotes scientifiques

Jérôme Dymont (CNRS), François Lallier (CNRS), Sylvain Lamare (CNRS), Nadine Le Bris (CNRS), Olivier Rouxel (Ifremer), Pierre-Marie Sarradin (Ifremer)

Coordination éditoriale

Coralie Coumert (CNRS), Marie Morineaux (Ifremer), Julie Tourolle (Ifremer)

Contact

Sylvain Lamare, CNRS : sylvain.lamare@cnrs-dir.fr

Le présent document constitue le rapport d'une expertise scientifique collective confiée par le **ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie** (CGDD – direction de la recherche et de l'innovation) et le **ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** (direction générale de la recherche et de l'innovation) au CNRS et à l'Ifremer.

Le rapport d'expertise et sa synthèse ont été élaborés par les experts scientifiques sous la responsabilité du CNRS et l'Ifremer. Ces documents sont disponibles sur les sites web institutionnels du CNRS et de l'Ifremer.

Pour citer ce document

J. Dymont, F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, J. Tourolle (coord.), 2014. Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, Rapport, CNRS – Ifremer, 930 p. environ

Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer

Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

Rapport d'expertise

J. Dymont, F. Lallier, S. Lamare, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, C. Coumert, M. Morineaux, J. Tourolle (coordinateurs)

Juin 2014

Remerciements

L'équipe-projet remercie très vivement tous les contributeurs scientifiques, les membres du comité de pilotage et tous les personnels des ministères de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MENESR) et des Outre-mer, du CNRS et de l'Ifremer ayant contribué à ce travail.

Nous remercions tout particulièrement Claire HUBERT, Laurent BELANGER, Stéphanie THIEBAULT, Françoise GAILL, Michel DIAMENT, Patrick VINCENT, Stéphanie BELNA, Jean-Michel BRUNET, Marie-Pierre CAMPO, Pierre COCHONAT, Bernard COMMERE, Ophélie DARSEES, Rémi GALIN, Quentin GAUTIER, Léa GERARD, Magali GIRARD, Bruno GOFFE, Alain LAGRANGE, Yan LE ROUX, Marcia MAIA, Loïc MALGORN, Didier MARQUER, Lionel MOULIN, Catherine RODOLPHE-MEROT, Aurélie THOMASSIN et Catherine THOUIN pour leur relecture attentive et leurs conseils avisés.

Avant-propos

L'accroissement de la demande mondiale en métaux nécessite d'engager aujourd'hui une réflexion sur les potentialités d'exploitation des ressources minérales marines profondes. Face à la montée en puissance, au niveau européen et international, des projets d'exploration minière en mer profonde pour accéder aux ressources minérales des fonds marins, le développement d'activités de recherche dans le domaine des grands fonds océaniques apparaît aujourd'hui primordial. Le biome (ou macroécosystème) profond constitue le plus vaste habitat de la planète (75% de la surface océanique est comprise entre 1000 et 6000 m de profondeur). Les connaissances fondamentales concernant le biome tout comme le milieu physique sont encore très lacunaires.

C'est ainsi qu'à la demande du MEDDE, une expertise scientifique collective (ESCo) sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes a été conduite, en partenariat entre le CNRS et l'Ifremer. Elle a été réalisée en complément des prospectives publiées récemment par ces derniers, en 2008 sur les Sciences de la Terre pour l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS, en 2011 sur les ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030 pour l'Ifremer, et en 2013 avec les parutions du Programme Mer et de la prospective mer de l'Institut Ecologie et Environnement (InEE) du CNRS.

L'exploration et l'étude des écosystèmes des grands fonds, afin d'envisager les conditions d'exploitation durable de leurs ressources minérales et énergétiques, sont des grandes priorités scientifiques de nos organismes.

Les grands fonds océaniques représentent des enjeux majeurs en raison des processus géologiques et géodynamiques dont ils sont le siège, de leur potentiel en terme de ressources, de la richesse et des particularités de la biodiversité qui leur sont associées, ou encore des défis technologiques que représentent leur observation. À l'heure où les pressions anthropiques s'y exercent de manière de plus en plus prégnante (pêcheries en eaux profondes, exploitations pétrolières et minières, stockage de déchets...), les effets du changement global, via la circulation des masses d'eau, ou encore le rôle des processus magmatiques, tectoniques et hydrothermaux dans le bilan global de la Terre, doivent aussi être mieux appréhendés pour préciser le fonctionnement et la dynamique de ces écosystèmes particuliers qui ne répondent pas nécessairement aux rythmicités connues pour d'autres régions de l'océan.

Si les services écosystémiques qu'assurent les grands fonds marins commencent à être reconnus, les conditions permettant le maintien et le fonctionnement de la biodiversité profonde dans des habitats instables et fragmentés, dépendant de processus géologiques eux aussi mal connus, sont mal cernées. D'autre part, la connaissance scientifique reste encore partielle dans le domaine des processus géologiques, hydrothermaux et métallogéniques : la science n'est donc pas encore en situation de répondre quant à la vulnérabilité de ces systèmes ou sur leur capacité de résilience et ainsi de contribuer efficacement à leur préservation.

Il était donc important que les principaux organismes de recherche français impliqués sur les environnements profonds unissent leurs efforts et les savoirs de leurs chercheurs pour faire un état des lieux le plus exhaustif possible concernant les milieux marins profonds susceptibles d'abriter des ressources minérales profondes et sur les ressources elles-mêmes. Les questions

de recherche ainsi établies rejoignent intégralement les objectifs affichés dans le programme "Mer" de l'Alliance Allenvi.

Cette expertise scientifique collective a permis de faire le point sur les besoins de connaissances relatives aux écosystèmes et milieux profonds susceptibles d'être exploités dans le futur. Le besoin fort, ainsi établi, de conduire des travaux de recherche et d'exploration océanique sera traité dans le cadre du « programme national de recherche et d'accès aux ressources des grands fonds marins" en cours de montage sous l'égide du Secrétariat Général de la Mer, du MEDDE et du MESR.

Nos organismes, qui mènent depuis plusieurs décennies des programmes de recherche sur les environnements des grands fonds, tant sur les ressources minérales concernées (sulfures hydrothermaux, nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères) et leur genèse que sur leur importance écologique, entendent ainsi contribuer fortement à ce programme.

Le lecteur de cette expertise trouvera donc dans les pages qui suivent un état des lieux le plus exhaustif possible, permettant à chacun d'appréhender les connaissances actuelles sur ces milieux, ainsi que celles qui restent à acquérir. Elle se veut aussi être une base des savoirs permettant d'aider à l'élaboration des politiques publiques dans le cadre des futures demandes de permis d'exploration minière.

L'ambition scientifique associée à ce travail est aussi de renforcer la place importante occupée par la France par le développement d'une stratégie marine ambitieuse dans le domaine de la recherche et de l'innovation, tout en répondant aux exigences environnementales de notre planète aux ressources limitées et aux régulations fragiles.

Mieux connaître et mieux comprendre pour mieux anticiper constituent ainsi les mots clés de cette expertise collective réalisée en partenariat entre le CNRS et l'Ifremer.

Stéphanie THIEBAULT
Directrice de l'InEE
CNRS

Michel DIAMENT
Directeur par intérim de l'INSU
CNRS

Patrick VINCENT
Directeur Général Délégué
IFREMER

Sommaire

Avant-propos	3
Chapitre 1 Objectifs, matériel et méthodes de l'expertise	7
1.1. Cadres de référence et périmètre de l'expertise	10
1.2. Objectifs et méthodologie	15
1.3. Structure du rapport	29
Bibliographie	30
Chapitre 2 Les ressources minérales marines profondes	32
2. 1. Introduction	41
2.2. Analyse bibliométrique	49
2.3. Cadre réglementaire	58
2.4. Connaissance et degré d'exploration des différentes ressources	105
2.5. Degré d'évaluation et d'exploitation actuel des ressources minérales marines.	152
2.6. Conclusion	202
Acronymes	204
Bibliographie	207
Chapitre 3 Techniques d'exploration et d'exploitation	240
3.1. Introduction	247
3.2. Techniques d'exploration scientifique	247
3.3. Techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds	303
3.4. Techniques d'exploitation utilisées ou en cours de développement par les entreprises et organismes de recherche.	320
3.5. Entreprises, acteurs, états impliqués (opérateurs et fournisseurs)	339
3.6. Conclusion sur les points de vigilance	345
Acronymes	349
Bibliographie	352
Chapitre 4 Biodiversité, milieux et écosystèmes	364
4.1. Introduction	372
4.2. Analyse bibliométrique	374
4.3. Description des écosystèmes profonds directement impactés	391
4.4. Facteurs gouvernant la dynamique des écosystèmes et les relations avec d'autres écosystèmes ou compartiments de la biosphère	479
4.5. Conclusion	521
Acronymes	523

Bibliographie	524
Chapitre 5 Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques	585
5.1. Introduction	593
5.2. Impacts environnementaux potentiels	593
5.3. Introduction aux services écosystémiques et à leurs méthodes d'évaluation économique	647
5.4. Services écosystémiques rendus par les zones d'exploitation potentielles	652
5.5. Conséquences économiques possibles	718
Acronymes	723
Bibliographie	725
Chapitre 6 Préservation de l'environnement et gestion des impacts	756
6.1. Introduction	762
6.2. Analyse bibliographique	763
6.3. Analyse des mesures réglementaires de la préservation de l'environnement	763
6.4. Stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux - quelques exemples	810
6.5. Stratégies de gestion des impacts	843
6.6. Mesures de compensation et de restauration	859
6.7. Conclusion / Synthèse	870
Glossaire	874
Acronymes	875
Bibliographie	876
Chapitre 7 Perspectives de recherche et de développement	891
7.1. Introduction.	893
7.2 Besoins d'acquisition de connaissances fondamentales	895
7.3 Développement d'outils pour l'acquisition des connaissances	903
7.4 Mise en place d'études d'impact	907
7.5 Conclusion	911
Annexe 1 Cahier des charges de l'ESCo	913
Annexe 2 Liste des membres du COPIL	916
Annexe 3 Liste des campagnes océanographiques françaises menées sur les milieux marins profonds	917
Annexe 4 <i>Bacteria</i> isolées des sources hydrothermales océaniques profondes.	929
Annexe 5 <i>Archaea</i> isolées des sources hydrothermales océaniques profondes	935

Chapitre 1

Objectifs, matériel et méthodes de l'expertise

Pilote :

Coralie Coumert

Contributeurs :

Coralie Coumert

Sylvain Lamare

Table des matières du chapitre 1

Chapitre 1. Objectifs, matériel et méthodes de l'expertise	10
1.1. Cadres de référence et périmètre de l'expertise	10
1.1.1. Ressources minérales marines profondes : définition et limitations	12
1.1.2. Les ressources concernées	14
1.1.3. Les milieux et écosystèmes concernés	15
1.2. Objectifs et méthodologie	15
1.2.1. Objectifs de l'ESCo	15
1.2.2. L'expertise scientifique collective, principes et méthodes	15
1.2.3. L'équipe-projet de l'ESCo	17
1.2.4. Qualification des sources et des corpus bibliographiques	24
Premiers résultats de l'analyse bibliométrique à partir de Web of Sciences	26
Première analyse des champs thématiques couverts par le corpus bibliographique	28
1.3. Structure du rapport	29
Bibliographie	30

Liste des figures du chapitre 1

Figure 1-1 Distribution globale des ressources minérales marines (Rona, 2008).	13
Figure 1-2 Distributions des sites hydrothermaux, version 2.0 InterRidge (InterRidge, 2009).	13
Figure 1-3 Types de documents cités dans le rapport d'expertise.	26
Figure 1-4 Evolution chronologique du nombre de publications sur les ressources minérales et les environnements marins profonds.	27

Liste des tableaux du chapitre 1

Tableau 1-1 Date estimée d'épuisement de certains métaux	10
--	----

Chapitre 1. Objectifs, matériel et méthodes de l'expertise

1.1. Cadres de référence et périmètre de l'expertise

Les métaux sont des matières premières indispensables et stratégiques pour nos sociétés. La demande mondiale en métaux ne cesse d'augmenter, renforcée par les besoins croissants des pays en développement (Chine et Inde, notamment).

Cette augmentation de la demande s'accompagne d'une envolée du cours des métaux concomitante à l'épuisement des gisements terrestres (Cf. Tableau 1-1). L'approvisionnement en métaux est donc un enjeu économique très fort.

Tableau 1-1 Date estimée d'épuisement de certains métaux

(Valerian et du Fou de Kerdaniel, 2013 reprenant les estimations du service géologique des Etats-Unis, USGS Minerals)

Métal	Date d'épuisement ¹
Zinc	2025
Etain	2028
Plomb	2030
Cuivre	2039
Nickel	2048
Fer	2087
Aluminium	2139

Ces ressources sont majoritairement localisées sur un nombre limité de pays. Le Chili est le principal producteur de cuivre, suivi des États-Unis, du Pérou, de l'Australie et de la Russie. L'argent se trouve principalement au Mexique, au Pérou, en Chine, en Australie et au Chili. L'Australie, l'Afrique du Sud, la Russie et le Chili possèdent les principales mines d'or. Les grands producteurs de fer sont la Chine, l'Australie, le Brésil et l'Inde. La Chine et l'Australie possèdent également les principaux gisements de zinc (<http://www.coursdesmetaux.fr/>, consulté en 2013). La Chine est enfin le premier producteur de terres rares et contrôle 95% du marché mondial. (http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf)

La recherche de nouvelles ressources exploitables est aujourd'hui une priorité pour de nombreux états. A ce titre, les ressources minérales marines profondes constituent des réserves potentiellement importantes de métaux, en particulier cobalt, fer, manganèse, platine, nickel, or, argent, cuivre, terres rares, etc...

Présentes dans tous les océans, elles sont généralement situées à de grandes profondeurs (entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de mètres), les rendant auparavant difficilement accessibles ; les progrès techniques permettent aujourd'hui d'envisager leur exploitation industrielle.

L'écologie des écosystèmes associés à ces ressources minérales est encore très mal connue, de même que les liens et interactions avec les sites plus distants. Les conséquences environnementales que pourrait avoir l'exploitation des ressources minérales sont encore aujourd'hui très largement méconnues. Ces sites rendent de nombreux services écologiques, de manière plus ou moins directe, et sont pour certains directement exploités par l'Homme, (cas de la pêche par exemple).

Les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Russie ou encore l'Inde ont été les premiers pays à s'intéresser aux ressources minérales marines profondes. Actuellement, ces mêmes pays mais aussi la Chine, la Corée du Sud, le Japon ou la Nouvelle-Zélande souhaitent les exploiter et disposer de permis d'exploration.

La France est un acteur majeur de la recherche sur la géologie, la géochimie et l'écologie des environnements marins profonds. Elle possède une longue expérience et un savoir-faire avéré dans les domaines de l'exploration et de l'étude de ces milieux, ainsi que dans les technologies dédiées que sont les submersibles des grandes profondeurs habités (Cyana, Nautilo) ou inhabités (ROV pour Remotely Operated Vehicle, AUV pour Autonomous Underwater Vessel) et leur instrumentation associée.

De larges zones ont été explorées lors de nombreuses campagnes de plongée et d'exploration (cf. annexe 3) : dorsale médio-atlantique (campagnes Serpentine, MomarDream, BICOSE, par exemple), zone Pacifique (dont les campagnes Wallis et Futuna, BioNod dans la province Clarion-Clipperton, Zepolyf en Polynésie Française...), dorsale Est-Pacifique (HOT, HOPE, Phare), dorsale Pacifique-Antarctique (campagne PacAntarctic) et dorsales indiennes (campagnes Edul, Gimnaut, Geiseir, SmoothSeafloor).

Les équipes et chercheurs français sont ou ont été partenaires ou membres des comités de pilotage de nombreux programmes européens et internationaux tels que le réseau européen CAREX pour la recherche sur la vie dans les environnements extrêmes, le programme international IODP Integrated Oceanic Drilling Program, le projet d'infrastructure de recherche européenne EMSO, le réseau d'excellence européen ESONET, les programmes intégrés HERMES et HERMIONE, les programmes de coopération internationale comme InterRidge, GEOTRACES ou Census of Marine Life...

La France bénéficie également d'atouts importants dans le domaine industriel, au travers d'entreprises leaders dans les secteurs miniers et de l'ingénierie maritime et sous-marine.

La France dispose donc d'une capacité importante d'exploration et d'accès à ces nouvelles ressources minérales à de grandes profondeurs en mer. Elle possède actuellement un permis d'exploration pour les nodules dans la province Pacifique de Clarion-Clipperton et un autre permis est en cours de signature pour les gisements de sulfures hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique.

Les campagnes océanographiques menées à Wallis et Futuna ont permis de localiser des sulfures polymétalliques et des encroûtements de manganèse qui pourraient aussi faire l'objet d'une exploitation future (Compte-rendu du Sénat n°31, 2013).

L'exploitation de ces ressources pourrait avoir des impacts sur la biodiversité, les milieux et le fonctionnement des écosystèmes qui leur sont associés. L'Etat souhaite donc évaluer les conséquences écologiques et économiques de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

La présente expertise scientifique collective (ESCo) sur les impacts environnementaux de l'exploitation s'inscrit dans l'engagement 12.a du Grenelle de la Mer, qui prévoyait de

conduire une évaluation des impacts environnementaux des différentes phases d'exploitation dans l'objectif d'inscrire ces activités sous-marines dans un cadre respectueux des principes du développement durable.

Une première synthèse sur les ressources minérales marines (REMIMA) a été réalisée par l'Ifremer en 2010. L'ESCo permet d'actualiser, compléter et approfondir les informations apportées par la prospective REMIMA, en y intégrant un volet sur les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes, ainsi que leurs conséquences économiques potentielles.

1.1.1. Ressources minérales marines profondes : définition et limitations

Le milieu marin regorge de ressources minérales potentielles et avérées (Ifremer, 2013) :

A) De faible profondeur :

- schistes noirs,
- sapropels,
- granulats,
- placers (accumulation de minéraux lourds (étain, or, platine, titane...) dans les sédiments),
- phosphorites,
- gisements de diamants transportés depuis les continents adjacents par érosion (par exemple au large de la Namibie et de la côte sud-africaine voisine),
- solutions marines (eau, sel, magnésium).

B) De grande profondeur :

- nodules polymétalliques,
- encroûtements de manganèse,
- sulfures polymétalliques hydrothermaux,
- saumures métallifères (dans la Mer Rouge),
- boues métallifères (au large de l'Alaska, de la Thaïlande, du Myanmar et de l'Indonésie, mais également dans le Pacifique),
- sédiments métallifères (Méditerranée),
- oxydes de fer et de manganèse,
- fluides enrichis en hydrogène.

La carte de Rona de 2008 (Figure 1-1), illustre la diversité des ressources minérales marines et leur localisation dans tous les océans.

Depuis 2008, diverses études ont permis de préciser ou de découvrir de nouveaux gisements. Pour les sulfures hydrothermaux en particulier, les membres d'InterRidge tiennent et mettent régulièrement à jour la carte des sites hydrothermaux actifs et inactifs (Figure 1-2).

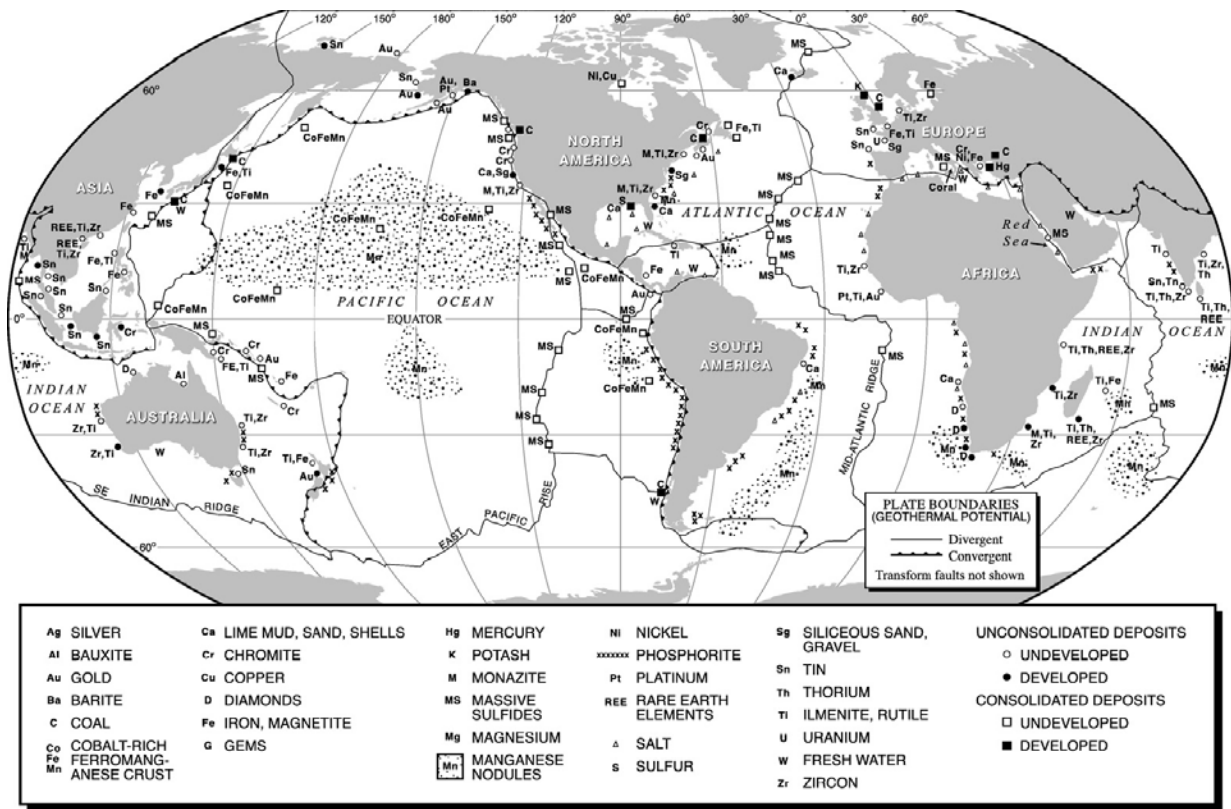


Figure 1-1 Distribution globale des ressources minérales marines (Rona, 2008).

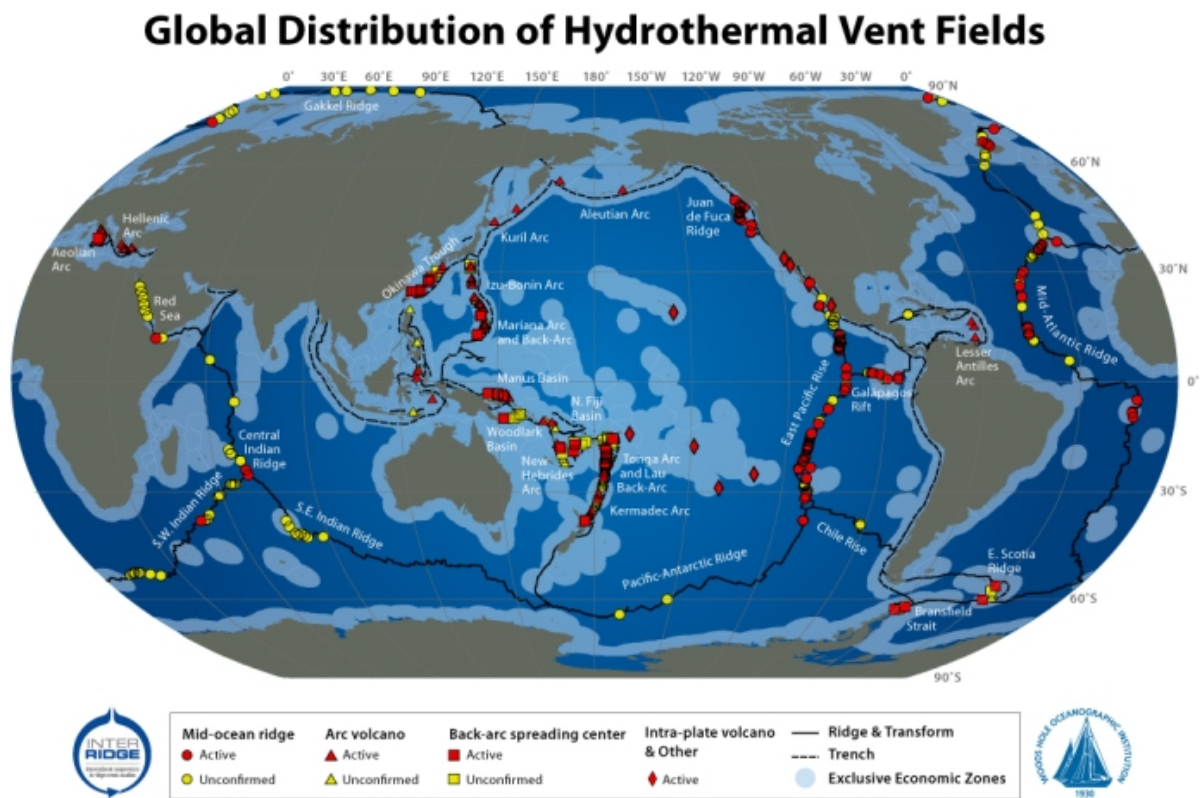


Figure 1-2 Distributions des sites hydrothermaux, version 2.0 InterRidge (InterRidge, 2009).

Les hydrocarbures et les hydrates de méthane ne sont pas des ressources minérales *stricto sensu*. Avec le charbon, ils sont généralement classés parmi les ressources énergétiques. Ces ressources ont donc été exclues du champ de l'expertise.

Les gisements diamantifères connus sont localisés entre 200 et 300m, bien que des zones plus profondes soient en cours d'exploration. De même, les placers et les phosphorites ne sont présents qu'en contexte de marge et à faible profondeur. Ils sont également exclus du champ d'expertise. **Les ressources minérales profondes ne seront considérées dans cette étude que pour des profondeurs supérieures à 300m, correspondant à des profondeurs situées sous la zone photique.**

1.1.2. Les ressources concernées

Les ressources concernées spécifiquement par l'ESCo sont, avant tout, celles dont dispose la France dans ses Zones Economiques Exclusives (ZEE) et dont l'inventaire reste encore très incomplet (Compte-rendu de la délégation sénatoriale à l'Outre-Mer, 2012; Lafoy et al, 1996; Ministère des Outre-Mer, 2012; Ifremer, 2010; Comité Interministériel de la mer, 2011) :

- La ZEE de l'île Clipperton donne accès à l'un des plus vastes champs de nodules polymétalliques.
- Dans la ZEE des Terres Australes et Antarctiques Françaises, la présence de nodules polymétalliques a été démontrée (Ifremer, 2011b) et des indices de sites hydrothermaux laissent présager la présence de sulfures polymétalliques (Ministère des Outre-Mer, 2012).
- La ZEE des îles Wallis et Futuna possède des sites hydrothermaux actifs et inactifs riches en sulfures polymétalliques.
- La ZEE de Nouvelle-Calédonie renferme des encroûtements de manganèse (Lafoy et al, 1996; cartes de l'AIFM).
- La ZEE de Polynésie Française présente un grand nombre d'encroûtements cobaltifères et des sulfures polymétalliques (Ifremer, 2011 a et c).

Comme mentionné précédemment, la France a obtenu, dans la Zone Internationale, un permis d'exploration des sulfures polymétalliques le long d'une portion de la dorsale médio-atlantique. Les sites hydrothermaux espérés dans cette région pourraient être associés parfois à de fortes émissions d'hydrogène.

L'expertise se concentre donc essentiellement sur :

- **les nodules polymétalliques**
- **les sulfures polymétalliques**
- **les encroûtements de manganèse**
- **et l'hydrogène naturel associé à certains sites hydrothermaux, de manière plus spéculative quant à son potentiel en tant que ressource.**

Les saumures, argiles et boues métallifères sont également traitées mais de façon moins approfondie, la France n'y ayant pas d'accès envisageable à court et moyen terme.

1.1.3. Les milieux et écosystèmes concernés

Différents milieux et écosystèmes directement associés à ces ressources ont été répertoriés par les experts, en fonction de leurs connaissances et des publications parues en lien avec chacune des ressources minérales. Toutefois, l'étude s'intéresse également à des écosystèmes adjacents, fonctionnellement reliés aux précédents, qui peuvent potentiellement être impactés par une exploitation des ressources minérales.

1.2. Objectifs et méthodologie

L'ESCo répond à une demande du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Conduite par le CNRS et l'Ifremer, elle a vocation :

- (1) à donner aux pouvoirs publics tous les éléments scientifiques disponibles et fiables, leur permettant d'évaluer et de répondre le plus justement possible aux demandes qui leur sont soumises sur les ressources minérales marines profondes;
- (2) à mettre en évidence les lacunes dans nos connaissances et les études scientifiques nécessaires pour les combler.

Les résultats de l'expertise pourront également nourrir les réflexions afin de définir le cadre réglementaire que devront respecter les industriels dans la perspective d'une exploitation future des ressources minérales marines dans la ZEE française.

1.2.1. Objectifs de l'ESCo

Le premier objectif de l'ESCo est de faire le point des connaissances scientifiques disponibles à l'échelle mondiale sur les écosystèmes et milieux concernés, en s'intéressant non seulement à leur biodiversité mais aussi à leur fonctionnement, ainsi qu'aux services qu'ils rendent ou qu'ils sont susceptibles d'assurer à l'avenir.

Le second objectif de cette expertise est de caractériser les impacts potentiels de l'exploitation minière sur ces milieux, ces services et ces usages, ainsi que d'identifier les mesures nécessaires pour suivre l'évolution de ces environnements et contrôler les impacts des différentes phases d'exploitation.

L'objectif à terme de l'ESCo est d'aider les demandeurs de permis de recherche ou d'exploitation dans leur réflexion lors de l'élaboration des études réglementaires relatives à l'incidence de leur activité sur l'environnement et d'aider la puissance publique dans sa prise de décision lors de l'expertise de ces études.

1.2.2. L'expertise scientifique collective, principes et méthodes

La convention signée par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie et du Développement Durable, le CNRS et l'Ifremer stipule que :

- le Ministère est commanditaire de l'expertise,
- les représentants du CNRS et de l'Ifremer au sein de l'équipe-projet sont libres de choisir les contributeurs à leur convenance

Il n'existe pas dans les chartes du CNRS et de l'Ifremer de terme correspondant exactement à ce cas de figure. Cet exercice de synthèse correspond à une « Expertise Scientifique Collective » telle que définie par l'INRA. Cette appellation a donc été adoptée.

L'ESCo obéit aux principes de la Charte nationale de l'expertise du 22 décembre 2009 à laquelle ont adhéré le CNRS et l'Ifremer, ainsi qu'à la charte de l'expertise au CNRS adoptée le 23 juin 2011 et la charte de l'expertise et de l'avis à l'Ifremer adoptée le 17 juin 2010.

La réalisation de l'ESCo consiste en l'analyse et la synthèse des connaissances sur les ressources minérales profondes, les environnements et les écosystèmes profonds susceptibles d'être impactés par l'exploration et l'exploitation de ces ressources, les impacts potentiels ainsi que les conséquences économiques de ces impacts. L'ESCo aborde également la question des stratégies de préservation de ces environnements et écosystèmes et les axes de recherche à développer et soutenir dans ce domaine.

Cette analyse répond à un cahier des charges défini après concertation entre le ministère, le CNRS et l'Ifremer (Annexe 1). Ce cahier des charges identifie les problématiques scientifiques sous-jacentes aux questions initialement posées et détermine les limites de l'expertise.

Un comité de pilotage, dont la composition est donnée en annexe 2, a été constitué à l'initiative du ministère en vue de suivre l'avancée des travaux. L'Institut Ecologie et Environnement (InEE) et l'Institut des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS ainsi que l'Ifremer en sont membres. Il est régulièrement informé de l'avancée des travaux par l'équipe-projet, présentée ci-dessous.

Cinq experts scientifiques ont été désignés. Chacun est responsable des questions relevant de son domaine de compétence et identifie un certain nombre de contributeurs spécialisés dans les diverses thématiques abordées, de manière à rendre l'expertise la plus juste et la plus complète possible. Une équipe de coordination a été également constituée afin de faciliter la communication et l'assemblage du rapport.

L'équipe-projet de l'expertise respecte les principes de rigueur, de compétence, d'impartialité, de fiabilité, de transparence, de clarté et d'exhaustivité du rapport final requis par les Chartes de l'expertise du CNRS et de l'Ifremer :

- La rigueur et la compétence s'entendent par la sélection fine des experts sollicités. Tous travaillent sur des thématiques en lien avec les environnements marins profonds considérés et disposent d'une longue expérience sur ces sujets. Ils sont reconnus par leurs pairs pour leur implication, tant au niveau des publications que par leur participation aux campagnes ou dans les projets et rapports scientifiques internationaux sur le milieu marin. Leurs compétences et leurs relations complémentaires assurent la couverture de l'ensemble des questions posées à l'ESCo. Eux-mêmes ont choisi les contributeurs aux différents chapitres en fonction de leur domaine de spécialisation. Les membres de l'équipe de coordination, biologistes, sont également spécialistes ou ont reçu une formation sur les milieux marins.
- L'impartialité a été imposée par l'engagement moral et légal des membres du comité de travail à ne pas s'impliquer dans des projets concurrents avant le terme de la réalisation de l'ESCo en 2014 et à ne pas en divulguer les résultats obtenus avant la tenue d'un colloque de restitution.

- La fiabilité des sources documentaires et des compétences des membres du comité de travail est une nécessité et justifie la robustesse et l'exactitude des affirmations apportées par l'ESCO.
- La transparence est apportée par la soumission de l'expertise au jugement de la communauté scientifique au cours d'un colloque, par le référencement pour chaque chapitre des publications et rapports utilisés et par l'accessibilité de son contenu à un large public.
- La clarté rédactionnelle est vérifiée par de multiples relectures au sein de l'équipe-projet et par le comité de pilotage. Le rapport d'expertise, est ensuite condensé en une synthèse de quelques dizaines de pages et en un résumé exécutif.
- Compte-tenu de la masse d'information existante et de sa dispersion, nous ne pouvons pas garantir l'exhaustivité, mais la représentativité des recherches est garantie par la constitution rigoureuse du corpus de références, et par la fiabilité des sources documentaires validées grâce aux compétences des membres de l'équipe-projet et des contributeurs.

A la demande du Ministère en charge de l'Écologie, le Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel et de la Biodiversité (CSPNB) a été saisi d'une version préliminaire du rapport d'expertise dans le but d'apporter un éclairage sur la méthodologie utilisée dans l'ESCO et d'émettre des recommandations, qui ont été mises à profit pour la rédaction de la synthèse et du résumé exécutif.

1.2.3. L'équipe-projet de l'ESCO

Cinquante-cinq chercheurs et ingénieurs, principalement du CNRS et de l'Ifremer, ont été mobilisés pour l'ESCO. Leurs compétences relèvent de la géologie, de la géochimie, de la biochimie, de l'écologie, de la génétique, de l'économie, du droit...

Le présent rapport d'expertise est étayé par un corpus total d'un peu plus de 13900 références bibliographiques, tous chapitres confondus, composées essentiellement d'articles scientifiques et de rapports techniques. Les experts en ont extrait, analysé et assemblé les éléments les plus pertinents pour éclairer les questions posées, soit une sélection d'environ 2000 références.

- L'équipe-projet de l'expertise

Responsables de la coordination

Sylvain LAMARE, CNRS, Directeur adjoint scientifique à l'Institut Ecologie et Environnement (InEE) et professeur des universités à l'Université de la Rochelle.

Coralie COUMERT, CNRS, Ingénieure en biologie industrielle R&D. Spécialisée en microbiologie et biologie moléculaire. Chef de projet et coordinatrice de l'ESCO pour le CNRS; Co-organisatrice du colloque.

Marie MORINEAUX, Ifremer, Ingénieure en biologie marine, spécialisée dans l'étude des milieux chimiosynthétiques profonds. Coordinatrice de l'ESCo pour l'Ifremer. Chargée de la gestion de projets de recherche.

Julie TOUROLLE, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond, Ingénieur en écologie marine, en charge de la cartographie des habitats. Coordinatrice de l'ESCo pour l'Ifremer. Elle a travaillé 5 ans en bureau d'études spécialisé dans la réalisation d'études réglementaires et environnementales en milieu marin (granulats marins, EMR).

Pilotes scientifiques et auteurs

Coralie COUMERT, CNRS, Ingénieure en biologie industrielle R&D.

Jérôme DYMENT, CNRS, Directeur de Recherche au CNRS, membre de l'UMR 7154 Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) (CNRS/PRES Sorbonne Paris Cité), ancien chargé de mission INSU sur les Géosciences Marines (2007-2011), membre du Steering Committee d'InterRidge (2001-2012), responsable de l'équipe de Géosciences marines de l'IPGP (depuis 2013). Spécialiste en géosciences marines, notamment des dorsales et des bassins océaniques et à ce titre participant ou chef de mission de nombreuses campagnes océanographiques. Ses travaux récents traitent notamment de la signature magnétique des sites hydrothermaux actifs et fossiles et de sa possible utilisation pour détecter et caractériser ces sites.

François LALLIER, CNRS, Directeur de l'UMR 7144 Adaptation et diversité en milieu marin (CNRS/UPMC) à la station biologique de Roscoff, directeur du G DR ECCHIS « Biologie des Ecosystèmes Chimiosynthétiques Profonds » de 2009 à 2012 et professeur des universités à l'Université Pierre et Marie Curie. Spécialiste en écophysiologie et adaptation des organismes marins en milieu extrême, des sources hydrothermales profondes et de la zone intertidale, de la respiration, des équilibres acide-base et de la chimiosynthèse en milieu marin.

Sylvain LAMARE, CNRS, Directeur adjoint scientifique à l'Institut Ecologie et Environnement (InEE) et professeur des universités à l'Université de la Rochelle.

Nadine LE BRIS, CNRS, Directrice de l'UMR 8222 Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB) (CNRS/UPMC), à la station marine de Banyuls sur Mer, professeure des universités à l'Université Pierre et Marie Curie et titulaire de la chaire « Environnement marin extrême, biodiversité et changement global ». Elle était l'un des membres du comité de pilotage du réseau européen CAREX 2007-2011 consacré aux recherches sur le vivant en milieu extrême et l'animatrice du groupe de travail international d'InterRidge « Biogeochemical interaction at deep-sea vent » (2004-2008). Spécialiste en chimie, biogéochimie et écologie marine, ses recherches sont consacrées à la dynamique des communautés, aux propriétés des habitats et aux interactions organismes-environnement dans les écosystèmes profonds sur la base d'approches expérimentales interdisciplinaires.

Olivier ROUXEL, Ifremer, Cadre de Recherche au Laboratoire Géochimie et Métallogénie (LGM), titulaire de la chaire internationale Europôle Mer « Environnements Profonds » et géochimiste à l'Université Européenne de Bretagne (UEB), à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), à l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) entre 2009 et 2012 et au Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) entre 2003 et 2009. Il est spécialiste en biogéochimie et en géochimie isotopique des métaux dans les océans, les systèmes hydrothermaux et les dépôts métallifères océaniques. Il est coordinateur de l'Axe 3 du Labex MER « Interactions géobiologiques dans les environnements extrêmes » et membre scientifique du Dark Energy Biosphere Institute, financé par la National Science Foundation.

Pierre-Marie SARRADIN, Ifremer, Responsable de l'Unité de Recherche Etudes des Ecosystèmes Profonds à Brest, coordinateur du projet EXOCET/D entre 2004 et 2007, sur le développement, la validation et la mise en œuvre d'une instrumentation spécifique qui permettra d'explorer, de décrire, de quantifier et d'observer la biodiversité dans les écosystèmes fragmentés profonds et d'identifier les liens existant entre les communautés d'organismes et leur environnement, et actuellement co-responsable de l'observatoire fond de mer MoMARSAT, sur les processus géophysiques et l'évolution des environnements hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique, au sud des Açores (EMSO-Açores). Spécialiste en biogéochimie, en chimie analytique et du fonctionnement des habitats hydrothermaux et des interactions organismes-habitat.

Les contributeurs

Anne-Sophie Alix, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Technicienne supérieure SIG/géologie - Ressources minérales

Sophie Arnaud-Haond, Ifremer, Laboratoire Ressources Halieutiques de Sète. Spécialiste en écologie évolutive en environnement marin, en génétique des populations et théorie de l'évolution et en application des résultats scientifiques à la gestion et à la conservation de l'environnement et des ressources génétiques marines.

Claude Augris, Ifremer, Laboratoire Environnements Sédimentaires. Géologue, il dirige la réalisation de cartes et d'atlas géologiques du domaine marin côtier et les études sur les granulats. Dans ce cadre, il coordonne la fourniture d'avis pour le compte des services de l'État.

Florian Besson, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Ingénieur géologue Ressources Minérales Marines, ayant une expérience de forage de sulfures hydrothermaux avec Neptune Minerals en 2012.

Catherine Borremans, Ifremer, Service des Systèmes d'Informations Scientifiques pour la MER (SISMER). Ingénieur Exploitation et Développement des Systèmes d'Information - Biologie Marine. Responsable de la gestion des données des engins sous-marins de l'Ifremer et des données à caractère biologique (taxinomie, biogéographie, biodiversité), en environnement profond plus particulièrement.

Cédric Boulart, CNRS, Laboratoire des mécanismes et transferts en géologie (LMTG – CNRS/Université Toulouse III/IRD). Il a fait son post-doctorat en chimie des fluides et gaz hydrothermaux, a participé au développement de capteurs chimiques *in situ* pour le méthane et l'hydrogène dissous et a participé à la campagne MomarSat 2010. Actuellement en séjour post doctoral à l'Ifremer (REM-GM).

Jacqueline Boutin, CNRS, Chargée de mission à la Direction adjointe scientifique Océan Atmosphère de l'Institut National des Sciences et de l'Univers (INSU), Directrice de recherche au Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN - UMR 7159 CNRS/UPMC/IRD/MNHN) et spécialiste du rôle de la couche de surface océanique dans le couplage océan-atmosphère.

Gaëtan Burgaud, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Biodiversité et Ecologie Microbienne. Enseignant-Chercheur en Mycologie Marine, spécialisé dans l'étude des communautés fongiques associées aux environnements marins profonds. S'intéresse à la description taxonomique de nouveaux taxons et à la valorisation biotechnologique des champignons marins isolés.

Nolwenn Callac, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Microbiologie des Environnements Extrêmes (UMR 6197 Ifremer/UBO/CNRS). Chercheur, géomicrobiologiste spécialiste des interactions micro-organismes/minéraux/fluide et du traçage isotopique des cycles biogéochimique du fer et du soufre en contexte hydrothermal.

Marie-Anne Cambon-Bonavita, Ifremer, Laboratoire de Microbiologie des Environnements Extrêmes, (UMR 6197 Ifremer/ UBO/ CNRS), Chercheur en microbiologie, spécialiste en symbioses et interactions microbiennes (interactions entre micro-organismes, avec l'hôte et l'environnement). Elle a participé aux campagnes FUTUNA et à des projets liés aux ressources minérales et aux permis d'exploration.

Mathilde Cannat, CNRS, Equipe de Géosciences Marines de l'UMR 7254, Institut de Physique du Globe. Chercheuse, géophysicienne et géologue. Spécialiste du magmatisme et de la tectonique des dorsales océaniques.

Frederico Cardigos, Biologiste marin à l'Université des Açores au Portugal. Directeur Régional du gouvernement des Açores entre 2006 et 2013 pour l'Environnement et les Affaires Maritimes. Directeur du parc marin des Açores entre 2011 et 2013.

Antoine Carlier, Ifremer, Chercheur au laboratoire Ecologie benthique (Unité Dynamique des écosystèmes côtiers); spécialiste des réseaux trophiques; en charge de l'évaluation des impacts écologiques des projets d'exploitations des énergies marines renouvelables (éolien en mer, hydrolien) sur les écosystèmes benthiques.

Coralie Coumert, CNRS, Ingénieure en biologie industrielle R&D.

Richard Cosson, CNRS-Université de Nantes, équipe "Mer, Molécules, Santé", EA2160 ISOMER (Université de Nantes). Il a participé à 8 campagnes dédiées à l'étude des écosystèmes chimiosynthétiques. Spécialisé en écologie, écophysiologie et écotoxicologie marines.

Yannis Cuypers, Université Pierre et Marie-Curie, Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN - UMR 7159 CNRS/UPMC/IRD/MNHN). Maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie, spécialiste de la dynamique interne des vagues et des mélanges turbulents dans les écoulements stratifiés en rotation.

Stéphanie Dupré, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Chercheur Géophysicienne, spécialiste des systèmes fluides.

Thierry Dutoit, CNRS, Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE, UMR CNRS 7263 - IRD 237, UAPV-AMU), équipe « Ingénierie de la restauration des patrimoines naturel et culturel ». Directeur de Recherches spécialisé dans la dynamique à long terme et la résilience des communautés végétales herbacées : applications à la conservation et restauration écologique des écosystèmes. Conseiller scientifique CNRS-InEE pour l'ingénierie écologique.

Jérôme Dymont, CNRS, Directeur de Recherche au CNRS.

Yves Fouquet, Ifremer, chercheur en métallogénie océanique ; responsable du Laboratoire Géochimie et Métallogénie. 30 d'expérience en recherche sur la métallogénie des grands fonds en particulier les systèmes hydrothermaux. Coordinateur Ifremer du projet ressources minérales profondes ; 34 campagnes en mer dans l'océan Atlantique est et le Pacifique sud-ouest.

Françoise Gaill, CNRS. Conseiller scientifique CNRS InEE, présidente du Comité pour la recherche marine, maritime et littorale (COMER) du Conseil national de la mer et des littoraux (CNML), présidente du comité stratégique et scientifique (COSS) de la TGIR "Flotte océanographique française" (FOF). Spécialiste de l'adaptation aux milieux extrêmes et des milieux profonds. Elle a dirigé le département Environnement et Développement Durable puis l'Institut Ecologie et Environnement du CNRS de 2008 à 2013. Elle a également participé aux travaux de la fondation européenne de la science et du Census of Marine Life.

Arnaud Gaillot, Ifremer, Service Cartographie, Traitement de données et Instrumentation, UR Géosciences Marines. Ingénieur hydrographe, spécialisé dans les systèmes acoustiques de cartographie des fonds marins. Il a participé à la mission d'exploration FUTUNA 2 en 2011.

Anne Godfroy, Ifremer, Responsable du Laboratoire de Microbiologie des Environnement Extrêmes, Directrice de l'UMR 6197 (Ifremer/CNRS/UBO). Microbiologiste, spécialiste de l'écologie microbienne (approches culturales et moléculaires de la diversité) des écosystèmes hydrothermaux (Pôle chaud).

Stéphane Hourdez, CNRS, Équipe Génétique et Adaptations aux Milieux Extrêmes, UMR 7144 (UPMC/CNRS), Station Biologique de Roscoff. Spécialiste en écophysiologie. Ses travaux concernent les adaptations respiratoires.

Cécile Konn, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Chercheur en géochimie des fluides, spécialisée dans la détection et l'étude des panaches hydrothermaux ainsi que dans l'étude de la géochimie des gaz, minérale et organique des fluides hydrothermaux. Elle a participé aux missions d'exploration SERPENTINE en 2007; FUTUNA 1, 2 et 3 en 2010, 2011, 2012.

Elie Jarmache, Chargé de mission au Secrétariat Général de la Mer (SGMer) mis à disposition par l'Ifremer et membre de la Commission juridique et technique de l'Autorité Internationale des Fonds Marins. Spécialiste en Droit de la Mer.

Didier Jollivet, CNRS, Chargé de Recherche et responsable de l'équipe « Génétique de l'Adaptation en Milieux Extrêmes » UMR 7144 (UPMC/CNRS), Station Biologique de Roscoff. Il a participé aux groupements de recherche ECCHIS et MarCo et aux programmes européens CAREX et HERMIONE. Spécialiste de la dynamique de l'écosystème hydrothermal profond (écologie des communautés, dynamique et génétique des populations, fonctionnement des métapopulations marines, histoire évolutive des populations hydrothermales) et de la génomique des populations dans le cadre de l'adaptation locale dans l'évolution des espèces vivants en milieux extrêmes.

Kim Juniper, Ecole des sciences de la Terre et des sciences marine, Université de Victoria, Canada. Professeur en microbiologie et écologie marine. Directeur scientifique des observatoires sous-marins du Réseaux Océaniques Canada. Spécialiste de l'écologie des sources hydrothermales sous-marines. Membre du Comité technique consultatif pour la Zone de protection marine des champs hydrothermaux Endeavour.

François Lallier, CNRS, Directeur de l'UMR 7144 Adaptation et diversité en milieu marin (CNRS/UPMC) à la station biologique de Roscoff.

Sylvain Lamare, CNRS, Directeur adjoint scientifique à l'Institut Ecologie et Environnement (InEE) et professeur des universités à l'Université de la Rochelle.

Franck Lartaud, Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (CNRS/UPMC). Enseignant-chercheur, spécialiste en écologie et géologie marine, en scléronologie, en géochimie des carbonates et des eaux, des écosystèmes profonds (sources hydrothermales, canyons) et des communautés benthiques, en particulier des espèces-clés de bivalves *Bathymodiolus* et des coraux froids

Marc Le Boulluec, Ifremer, Laboratoire « Comportement des Structures en Mer », Unité « Recherches et Développements Technologiques ». Ingénieur hydrodynamicien, spécialiste du comportement des structures fixes ou flottantes soumises à houle, vent et courant, responsable du projet Energies Marines Renouvelables.

Nadine Le Bris, CNRS, Directrice de l'UMR 8222 Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB) (CNRS/UPMC), à la station marine de Banyuls sur Mer.

Harold Levrel, Ifremer, UMR AMURE, Département Economie Maritime. Spécialiste des services écosystémiques, des mesures de compensation et de la conservation de la biodiversité.

Marcia Maia, CNRS, Directrice de Recherche au CNRS, membre de l'UMR 6538 CNRS/Université de Bretagne Occidentale Domaines Océaniques, de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), chargée de mission Géosciences Marines à l'INSU depuis 2012, membre du Steering Committee d'InterRidge. Gravimétricienne et spécialiste des dorsales océaniques. Elle a participé et été chef de mission sur de nombreuses campagnes océanographiques ayant comme objectif l'étude des processus géologiques actifs à l'axe des dorsales. Elle travaille actuellement sur le développement d'un capteur gravimétrique pour les véhicules sous-marins, destiné, entre autres, à étudier la structure de détail des sites hydrothermaux.

Marjolaine Matabos, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond. Chercheur en écologie benthique, spécialisée dans l'étude de la biodiversité et de la dynamique des écosystèmes profonds (écologie des communautés, dynamique des populations). Elle s'intéresse en particulier à la dynamique temporelle des écosystèmes avec l'utilisation des données d'observatoires fond de mer (suivi vidéo).

Lenaïck Menot, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond, chercheur en biologie des communautés benthiques profondes, spécialisé dans l'étude des écosystèmes associés aux ressources minérales (nodules et sulfures polymétalliques) et des risques environnementaux liés à l'exploitation de ces ressources.

Marie Morineaux, Ifremer, Ingénieure en biologie marine.

Hélène Ondréas, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Géologue. Spécialiste du contexte géologique des sorties de fluides, impliquée dans le développement des engins *in-situ* et des nouvelles méthodes d'étude "haute résolution" pour l'exploration des grands fonds.

Ewan Pelleter, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Chercheur en métallogénie, spécialisé depuis 2010 dans les minéralisations océaniques profondes. Il a participé aux missions d'exploration FUTUNA 2 et FUTUNA 3 en 2011 et 2012.

Sylvain Pioch, Université de Montpellier 3, Maître de conférences à l'Université Montpellier 3, chercheur au sein de l'UMR 5175 CEFE (CNRS-UM3). Spécialiste en restauration des habitats marins à l'aide de récifs artificiels et d'approches de gestion intégrée des zones côtières proactives, en ingénierie écologique côtière et des outils de dimensionnement des mesures compensatoires, ainsi qu'en évaluation des services écosystémiques pour la compensation des impacts anthropiques. Il enseigne l'aménagement du territoire, environnement et gestion des milieux naturels maritimes et côtiers à l'université Montpellier III.

Benjamin Ponge, Agence des aires marines protégées, Service Protection et usages du milieu marin. Spécialisé dans les méthodes d'analyses spatiales pour la mise en place et l'évaluation des réseaux d'aires marines protégées. Chargé du suivi de la création d'aires marines protégées en haute mer et de leur mise en gestion au sein des conventions des mers régionales.

Marie Portail, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond, doctorante. Spécialisée dans l'étude comparée de la structure et du fonctionnement des communautés de faune associées aux sources hydrothermales et aux sources froides (encadrement : Jozée Sarrazin et Karine Olu, 2012-2015).

Florence Pradillon, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond. Spécialiste en écologie des environnements marins profonds à base chimiosynthétique, s'intéressant en particulier aux processus de dispersion larvaire et de colonisation.

Walter Roest, Ifremer, Laboratoire Géophysique et Géodynamique. Chercheur en géologie. Responsable du programme Extraplac (Extension raisonnée du plateau continental) et membre de la Direction scientifique de l'Ifremer, a été élu en 2012 pour un mandat de 5 ans à la Commission des Limites du Plateau Continental de l'ONU.

Olivier Rouxel, Ifremer, Cadre de Recherche au Laboratoire Géochimie et Métallogénie (LGM).

Philippe Saget, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie. Géologue « Ressources Minérales » ayant participé aux campagnes d'exploration sur les nodules polymétalliques depuis 1976.

Jean-Michel Salles, CNRS, Directeur de recherche au Laboratoire Montpellierain d'Economie Théorique et Appliquée (LAMETA - UMR5474). Spécialiste en économie de l'environnement et des ressources naturelles, économie de la biodiversité.

Sarah Samadi, Museum National d'Histoire Naturelle, Département Systématique et Evolution. Experte en biologie évolutive et systématique, professeur du MNHN, responsable de deux modules de l'école doctorale du MNHN « Taxonomie intégrative et expertise taxonomique dans le contexte des projets code-barres ADN » et « Mécanismes de l'évolution ». Elle a, entre autres, été chef de mission principal dans plusieurs campagnes (Vanuatu, îles Salomon, Papouasie Nouvelle-Guinée, Nouvelle Calédonie) de la série « Tropical Deep-Sea Benthos ». Spécialiste des monts sous-marins et des environnements profonds associés aux débris organiques coulés et experte dans le domaine de la connectivité des environnements fragmentés en milieu profond.

Pierre-Marie Sarradin, Ifremer, Responsable de l'Unité de Recherche Etudes des Ecosystèmes Profonds à Brest.

Jozée Sarrazin, Ifremer, Responsable du Laboratoire Environnement Profond. Chercheur en écologie benthique, spécialisée dans l'étude de la biodiversité, du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes chimiosynthétiques profonds et impliquée dans les projets d'observatoires fond de mer Momar (dorsale médio-atlantique) et Neptune (dorsale du Nord-Est Pacifique).

Carla Scalabrin, Ifremer, Laboratoire Géophysique et Géodynamique. Spécialiste de la colonne d'eau.

Laure Simplet, Ifremer, Laboratoire Environnements Sédimentaires. Géologue en charge de la cartographie géologique du domaine marin côtier. Elle participe aux études sur les granulats et à l'expertise des dossiers de demande de concession minière pour le compte des services de l'État.

Eric Thiébaud, CNRS-Université Pierre et Marie Curie, Unité Adaptation et diversité en milieu marin UMR 7144 (CNRS/UPMC). Responsable la spécialité "Océanographie et Environnements Marins" du master "Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie" à l'Université Pierre et Marie Curie. Spécialiste de la structure et du fonctionnement d'écosystèmes hydrothermaux et expert dans le domaine de la connectivité des milieux marins profonds.

Julie Tourolle, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond, Ingénieur en écologie marine.

Daniela Zeppilli, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond. Post-doctorante Internationale d'Excellence en Sciences de la Mer Labex MER, spécialiste de la méiofaune des environnements profonds et des écosystèmes chimiosynthétiques. Utilisation de la méiofaune dans des études d'impact et de protection de la biodiversité.

Documentation : constitution du corpus et analyses bibliométriques

Coralie Coumert, CNRS.

Marie Morineaux, Ifremer.

Annick Salaün, Ifremer, ingénieur documentaliste, chargée de la bibliométrie, Bibliothèque La Pérouse (Centre de Documentation sur la Mer, Plouzané).

1.2.4. Qualification des sources et des corpus bibliographiques

Il existe trois types de sources bibliographiques :

- **Littérature blanche** : toute information écrite et éditée, commerciale et conventionnelle. Ce sont les revues scientifiques et techniques, les livres, les ouvrages de référence, les bases de données...
- **Littérature grise** : tout document écrit, produit à l'intention d'un public restreint, en dehors des circuits commerciaux de l'édition et de la diffusion et en marge des dispositifs de contrôle bibliographiques. Ce sont les rapports scientifiques et techniques, les thèses, les comptes-rendus de congrès, les brevets, les normes...
- **Littérature noire** : Documents confidentiels, secrets et uniquement accessibles aux personnes autorisées.

Dans le cadre de l'ESCo, les membres de l'équipe-projet se sont basés préférentiellement sur les articles scientifiques, dont la fiabilité et la valeur scientifiques sont garanties par les comités de lecture, le facteur d'impact des revues et les taux de citation des articles.

La littérature grise a également été considérée, en tenant compte de sa pertinence, en cherchant à revenir aux travaux originaux cités par ces rapports et thèses.

Les premières recherches bibliographiques menées par le CNRS et l'Ifremer ont permis de réunir, tous types de documents confondus :

- Un ensemble d'un peu plus de **9200 références sur la géologie, la géochimie et les technologies d'exploration et d'exploitation des ressources minérales**, issus de la veille scientifique menée jusqu'en 2010 par le laboratoire Géochimie et Métallogénie de l'unité de recherche Géosciences Marines du centre Ifremer de Brest
- Un ensemble d'un peu plus de **5000 articles, actes de conférence et chapitres de livres sur les mêmes thématiques**, permettant la réactualisation et la complétion du premier ensemble de données
- Un troisième ensemble d'environ **4700 références sur l'écologie des milieux marins profonds** potentiellement impactés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes
- Les corpus ayant servi de base aux chapitres sur l'économie et les stratégies de préservation sont beaucoup plus réduits (**de l'ordre de quelques centaines de références**).

Les références de publications scientifiques ont été majoritairement obtenues à partir de la base de données Web of Science. Le choix de cette base de données se justifie par son statut d'outil de bibliométrie de référence. Développée par Thomson Reuters, Web of Science répertorie les publications de plus de 12000 journaux scientifiques parmi les plus cotés, ainsi que les comptes rendus de plus de 150 000 conférences scientifiques depuis 1900, couvrant ainsi plus de 250 thématiques de recherche (Thomson Reuters). Ces 12 000 journaux résultent du croisement des sept plus grandes bases de données scientifiques auxquelles Web of Sciences donne accès :

- Science Citation Index Expanded ®, qui recense plus de 8300 journaux majeurs dans 150 thématiques, depuis 1900.
- Social Sciences Citation Index ®, qui recense plus de 4500 journaux couvrant une cinquantaine de thématiques des sciences sociales ainsi que 3500 journaux techniques et scientifiques, depuis 1900.
- Arts & Humanities Citation Index ®, qui recense plus de 2300 journaux spécialisés ainsi que plus de 6000 autres journaux scientifiques et de sciences sociales, depuis 1975.
- Conference Proceedings Citation Index, qui recense plus de 148000 journaux et résumés de d'ouvrages et couvre 256 disciplines.
- Index Chemicus ®, qui recense plus de 6 millions de composés chimiques, depuis 1993.
- Current Chemical Reactions ®, qui recense plus d'1 million de réactions, collectées depuis 1986, et avec les archives de l'INPI, de 1840 à 1985.

Sans fournir un corpus totalement exhaustif, l'analyse de la littérature scientifique par Web of Science a permis de donner une vision des efforts de recherche dans le domaine des ressources minérales marines profondes et de l'écologies des milieux et écosystèmes marins profonds sur ces vingt-deux dernières années. Cette première étape a permis d'identifier les publications et groupes d'auteurs les plus impliqués sur la question des impacts de l'exploitation des ressources minérales marines sur la biodiversité et les écosystèmes et les enjeux de conservation qui leur sont associés.

La comparaison des différents ensembles de références constitués par le CNRS et l'Ifremer respectivement sur les ressources minérales et les écosystèmes et milieux marins profonds ont mis en évidence **un recoupement sur à peine un peu plus de 200 références**.

Dans le but de valider et compléter les informations fournies par Web of Science, d'autres bases de données ont été interrogées : la base de données des thèses françaises "theses.fr", le catalogue Sudoc, le catalogue WorldCat, la base de données internationale Networked Digital Library of Theses and Dissertations (NDLTD)... Le moteur de recherche spécialisé en sciences Google Scholar a également permis l'accès à de nombreux documents.

Parmi toutes les références identifiées, certaines se rapportaient à des documents de travail confidentiels, dont les membres de l'équipe-projet connaissent l'existence mais auxquels ils n'ont pu avoir accès.

D'autre part, certaines données connues des membres de l'équipe-projet mais n'ayant pas encore été publiées n'ont pas été intégrées dans le rapport d'expertise.

Ces articles ont également permis d'identifier les points moins bien documentés par la littérature blanche, nécessitant d'être complétés par d'autres types de documents.

L'équipe-projet a sélectionné de préférence :

- les articles scientifiques de synthèse,
- les articles scientifiques ayant un fort taux de citation,
- les articles ou des rapports permettant de compléter des points précis,
- les informations émanant d'organismes gouvernementaux (ministères, CNRS, Ifremer, MNHN, INSEE, AAMP, NOAA, universités...),
- et, par exemple, les informations technologiques, économiques ou réglementaires provenant d'institutions internationales, européennes ou autres (FAO, UNESCO,

SOPAC, ISA, IUCN...), d'industriels (Nautilus Minerals, Technip...) et d'organisations non gouvernementales de protection de la nature reconnues (WWF...).

Chaque expert a pu compléter son propre inventaire des publications majeures incontournables et les plus fiables dans son domaine de recherche.

Au total, ce sont environ 2000 documents qui ont été exploités pour la réalisation de cette expertise. Les articles scientifiques, les chapitres de livres scientifiques et les actes de conférences, colloques, symposia et séminaires, constituent les trois quarts du corpus cité.

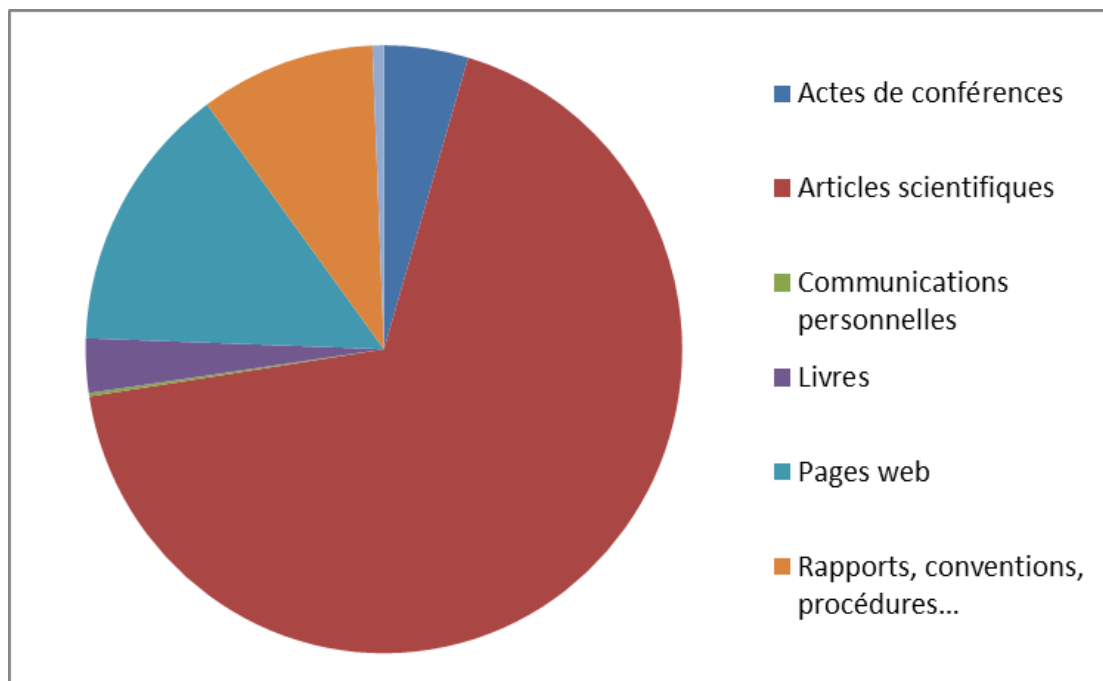


Figure 1-3 Types de documents cités dans le rapport d'expertise.

Premiers résultats de l'analyse bibliométrique à partir de Web of Sciences

Le but de cette démarche était de s'assurer d'avoir une vue d'ensemble des travaux réalisés à l'échelle internationale sur ces thématiques, au cœur du rapport d'expertise.

L'analyse bibliométrique des différents corpus a permis de mettre en évidence que :

- 1) L'observation de l'évolution temporelle de la recherche sur les ressources minérales marines profonde a débuté dès les années 70 alors que la recherche sur les milieux marins profonds (dorsales, sites hydrothermaux, bassins d'arrière-arc, canyons et monts sous-marins) a commencé plutôt au début des années 80. **La comparaison des deux ensembles met toutefois en évidence un réel essor de la recherche à partir du début des années 90 pour les deux domaines thématiques.**

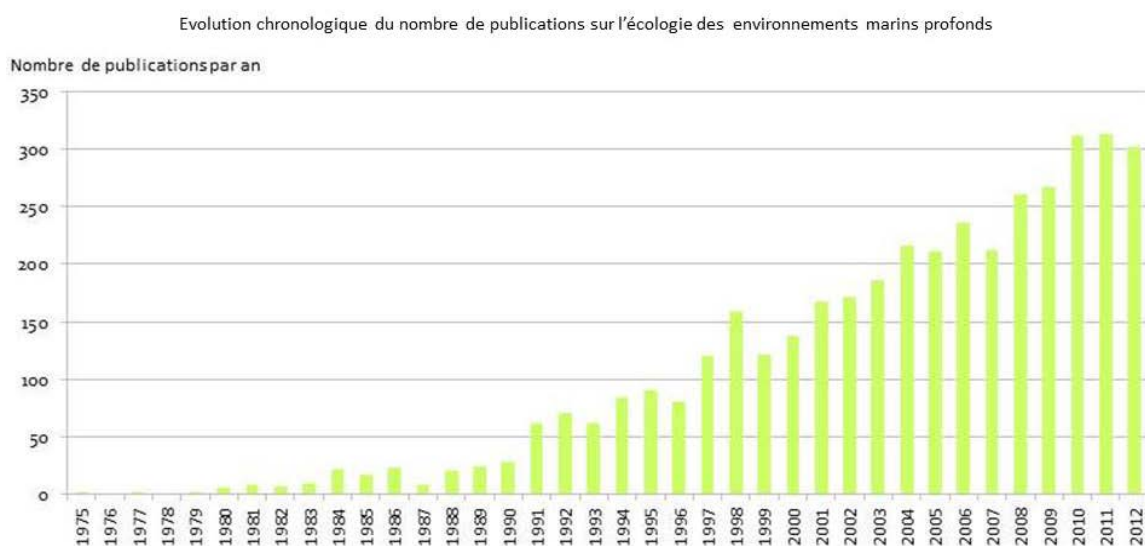
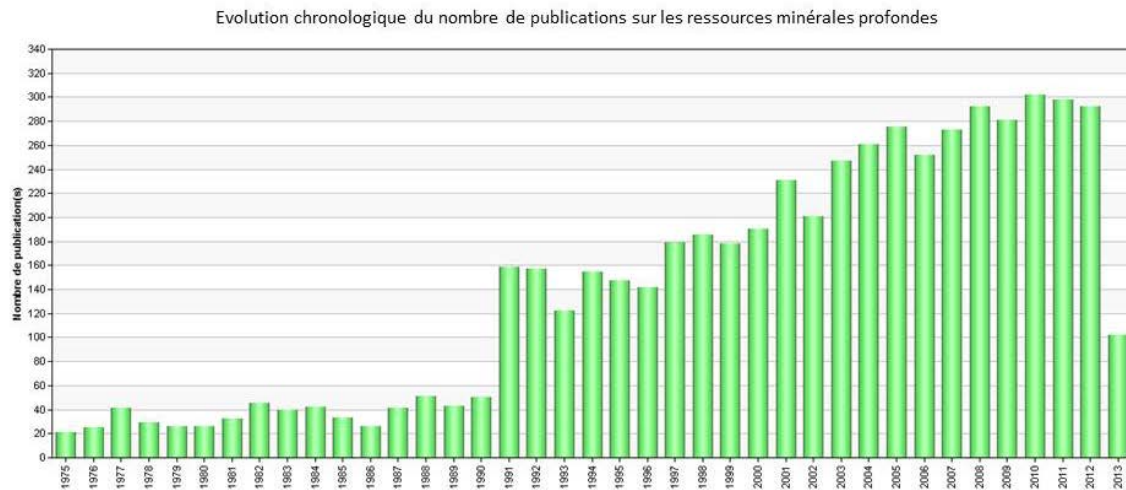


Figure 1-4 Evolution chronologique du nombre de publications sur les ressources minérales et les environnements marins profonds.

- 2) **Plus de 90 pays se sont intéressés aux ressources minérales marines profondes.** Parmi ceux-ci, les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Chine, le Japon, le Canada, la Russie, l'Inde et l'Australie se distinguent particulièrement en termes de nombre de publications. Ce sont également ces mêmes pays, auxquels il faut ajouter le Portugal et l'Espagne, qui se sont le plus impliqués dans l'étude de l'écologie des environnements associés ou susceptibles d'être associés à des ressources.

Dans le domaine de la biodiversité et de l'écologie des environnements, les pays mentionnés ont produits à eux seuls plus de 96% des articles parus jusqu'en mars 2013.

- 3) Les publications des années 80 traitent principalement des nodules. La comparaison avec la littérature grise de la même époque montre que celle-ci est plus importante en quantité. Cela peut s'expliquer par le fait que leur contenu est fortement lié au potentiel d'exploitation des nodules, avec une part importante des rapports et des conférences axées sur les méthodes d'exploitation. L'intérêt suscité par les nodules a stimulé les projets d'étude de la biodiversité et des écosystèmes associés, ce qui a amené à un pic de production d'articles sur la faune et ses réponses aux essais-pilotes d'exploitation minière sous-marine au début des années 2000.

- 4) Les sites hydrothermaux, auxquels sont associés les sulfures, ont suscité un très fort engouement chez les scientifiques, car ils présentent une biodiversité plus faible que les environnements sédimentaires mais avec un endémisme fort et une productivité importante ainsi que des caractéristiques fascinantes, concernant notamment les extrémophiles et les micro-organismes chimiosynthétiques. Ces sites ont un double intérêt industriel : les sulfures polymétalliques d'une part, et sa faune source de nouvelles molécules d'autre part. Pour ces différentes raisons, bien que les premières sources hydrothermales n'aient été découvertes qu'en 1977, les articles parus sur les sulfures représentent plus de la moitié des articles identifiés sur les ressources et environ les 2/3 des articles identifiés sur la biodiversité et l'écologie des environnements profonds.
- 5) Les encroûtements cobaltifères sont un peu moins bien renseignés. Ils sont principalement associés aux volcans et aux monts sous-marins. Même si une recherche bibliographique fait état de plusieurs milliers de publications sur les monts sous-marins (un peu plus de 4500 dans Web of Science), car ce sont des points chauds de biodiversité, seuls 600 articles, chapitres de livres et actes de conférence environ traitent des monts sous-marins profonds.
- 6) Les flux naturels d'hydrogène, enfin, n'ont quasiment pas encore été étudiés et très peu de données sont disponibles à leur sujet.

Première analyse des champs thématiques couverts par le corpus bibliographique

Les ressources minérales marines et de la biodiversité et l'écologie des milieux marins profonds sont des thématiques qui apparaissent particulièrement bien renseignées par les publications scientifiques, comparativement aux technologies d'exploration et d'exploitation, qui ne font l'objet que d'un petit nombre d'articles scientifiques. La littérature grise est plus abondante sur ce sujet. N'ayant pas accès à la littérature noire, les technologies d'exploration, bien connues des chercheurs, ont pu être décrites de manière détaillée, mais les informations récentes sur les technologies d'exploitation manquent.

L'étude des impacts environnementaux et de leurs impacts possibles sur les services écosystémiques fournis par les milieux marins profonds potentiellement exploitables s'appuie pour un peu plus de la moitié de ses sources sur de la littérature blanche. Les impacts environnementaux sont principalement renseignés par des publications scientifiques alors que les services écosystémiques font plutôt l'objet de rapports de différentes commissions économiques et d'organismes gouvernementaux.

Concernant la préservation de l'environnement et la gestion des impacts, l'information provient essentiellement de la littérature grise : conventions, comptes-rendus de « workshops » et rapports de diverses commissions de protection de l'environnement.

1.3. Structure du rapport

Les auteurs du rapport ont choisi une structure basée sur un ordre logique de causalité.

- Le Chapitre 2 rappelle les connaissances acquises (géographie, géologie, minéralogie) sur les différentes ressources minérales marines profondes, ainsi que le degré d'évaluation et d'exploitation actuel de ces ressources.
Les aspects juridiques de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales marines sont également abordés.
- De la nature, de la forme de ces ressources, des caractéristiques des formations géologiques qui les abritent et de leur localisation en profondeur dépendent directement les technologies d'exploration et d'exploitation utilisées.
Ces technologies sont exposées dans le Chapitre 3 ainsi que les techniques de suivi des écosystèmes et les acteurs impliqués au niveau international.
- A la localisation et à la nature des différentes ressources correspondent également des milieux et des écosystèmes bien particuliers.
Le Chapitre 4 a pour rôle dans une première partie de décrire la biodiversité, les milieux et les écosystèmes associés à chaque type de ressources. La deuxième partie synthétise les connaissances sur le fonctionnement de ces écosystèmes et leurs relations avec les écosystèmes adjacents ou les autres compartiments de la biosphère.
- A partir des informations des chapitres précédents et de la littérature scientifique et technique, le Chapitre 5 établit, dans un premier temps, les impacts attendus d'une activité d'exploitation minière et la manière dont les communautés biologiques sont susceptibles de répondre à ces impacts.
Dans un deuxième temps, après une courte introduction sur les méthodes d'évaluation économique des services écosystémiques en général, il présente les divers services rendus par la biodiversité et les environnements profonds associés aux ressources minérales marines profondes, leur vulnérabilité ou leur influence potentielles par rapport aux impacts environnementaux.
Ce chapitre conclut sur les conséquences économiques prédictibles de ces impacts.
- Le Chapitre 6 fait l'inventaire des stratégies de préservation des écosystèmes en fonction des types d'exploitation minière lorsqu'elles existent et des stratégies de gestion, de suivi et de compensation des conséquences négatives des activités minières sur les écosystèmes profonds.
- Le Chapitre 7, enfin, conclut sur les domaines de connaissances à développer, ainsi que sur les moyens techniques et méthodologiques disponibles pour y arriver et limiter si possible ou gérer au mieux les impacts environnementaux occasionnés par une exploitation des ressources minérales marines profondes.

Chaque chapitre comporte une analyse bibliométrique des références retenues pour l'étayer.

Bibliographie

Autorité Internationale des Fonds marins (AIFM) <http://www.isa.org.jm/fr/home>

Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). (2013). Cartes de répartition des ressources minérales marines. <http://www.isa.org.jm/fr/scientific/exploration/maps>

CNRS. (2011). Charte d'expertise.

Comité Interministériel de la Mer. (2011). Dossier de presse. http://www.sgmer.gouv.fr/IMG/pdf/2011-06-15_-_Dossier_de_presse_Comite_interministeriel_de_la_mer_du_10_juin_2011.pdf

Convention de subvention de l'expertise collective RMMP

Ifremer. (2010). Chartes d'expertise.

Ifremer - département Géosciences marines. (2013). Article sur les ressources minérales marines. <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales>

Ifremer - département Géosciences marines. (2011 a). Section sur les encroûtements cobaltifères. <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Encroûtements-cobaltiferes>

Ifremer - département Géosciences marines. (2011 b). Section sur les nodules polymétalliques. <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Nodules-polymetalliques>

Ifremer - département Géosciences marines. (2011 c) Section sur les sulfures polymétalliques. <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Sulfures>

Ifremer. (2010). Communiqué de presse - Exploration et mise en valeur des ressources minérales et de la biodiversité de la Zone Economique Exclusive (ZEE) française : la campagne d'exploration des fonds sous-marins au large de Wallis et Futuna est en cours. http://wwz.ifremer.fr/institut_eng/Documental-resources/Medias/Press-release/Archives/2010/Campagne-FUTUNA3

Ifremer. Synthèses des prospectives « Les ressources minérales marines profondes. » et « Les énergies renouvelables, synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030. » <http://wwz.ifremer.fr/institut/Les-ressources-documentaires/Prospectives>

InterRidge, consulté en 2013. <http://www.interridge.org/>

InterRidge. (2009). Carte des sites hydrothermaux dans le monde <http://www.interridge.org/irvents/maps> et http://maps.google.com/?q=http://www.interridge.org/irvents/files/vents_InterRidge_2011_all.kml

IODP <http://www.iodp.org/>

Lafoy, Y. S., Van de Beuque, J., Perrier, et JM, Auzende. (1996). Bilan des connaissances et potentialités des ressources minérales profondes. ZoNéCo.

Ministère des Outre-Mer. (2012). "Les terres australes françaises, au cœur des enjeux majeurs du XXIe siècle." <http://www.outre-mer.gouv.fr/?les-terres-australes-francaises-au-coeur-des-enjeux-majeurs-du-xxie.html>

Rona, P. A. (2008). "The changing vision of marine minerals." *Ore Geology Reviews* 33(3): 618-666.

Sénat. (2012). "La zone économique exclusive des outre-mer : quels enjeux ?" - Audition de Mme Nathalie Bassaler, conseil scientifique en prospective auprès du Centre d'analyse

stratégique (CAS). Comptes-rendus de la Délégation Sénatoriale à l'Outre-Mer <http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20120528/outremer.html>

Sénat. (2013). Propos d'Yves Fouquet au Sénat lors de la séance de 9h30, le mercredi 23 janvier 2013, c ompte-rendu n°31. <http://www.assemblee-nationale.fr/14/cr-dvp/12-13/c1213031.asp>

Thomson Reuters. Page de présentation de Web of Sciences, consulté en 2013. http://thomsonreuters.com/products_services/science/science_products/a-z/web_of_science/

Valerian, F. et F. du Fou de Kerdaniel. (2013). "L'industrie du recyclage en France : changer de dimension pour créer des emplois ?" Ministère du redressement productif et Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie. http://www.cgeiet.economie.gouv.fr/Rapports/2014_01_06_industrie_du_recyclage.pdf

Chapitre 2

Les ressources minérales marines profondes

Pilote scientifique :

Olivier Rouxel

Contributeurs :

Anne-Sophie Alix
Florian Besson
Catherine Borremans
Cédric Boulart
Jérôme Dymont
Yves Fouquet
Elie Jarmache
Lenaïck Menot
Marie Morineaux
Ewan Pelletier
Benjamin Ponge
Walter Roest
Olivier Rouxel
Philippe Saget
Annick Salaün
Julie Tourolle

Table des matières du chapitre 2

Chapitre 2. Les ressources minérales marines profondes	41
2. 1. Introduction	41
2.2. Analyse bibliométrique	49
2.2.1. Introduction	49
2.2.2. Méthodologie	49
2.2.3. Le Web of science	50
2.2.3.1. Méthodologie de recherche	50
2.2.3.2. Résultats et discussion	50
2.2.4. Base de référence Ifremer	55
2.2.4.1. Présentation	55
2.2.4.2. Résultats et discussion	56
2.2.5. Conclusion	57
2.3. Cadre réglementaire	58
2.3.1. Législation internationale (la Zone)	58
2.3.1.1. Convention des Nations Unies sur le droit de la Mer (CNUDM - 1982)	58
2.3.1.2. Convention sur la Diversité Biologique (CDB - 1992)	66
2.3.1.3. Ecosystèmes marins vulnérables (VMEs - 2006)	69
2.3.1.4. Autres conventions internationales visant la protection du milieu marin	69
2.3.2. Autorité Internationale des Fonds Marins et la Zone (AIFM)	73
2.3.2.1. Présentation	73
2.3.2.2. Organes	73
2.3.2.3. Les Règlements	75
2.3.2.4. Procédures	75
2.3.2.5. Livrables	77
2.3.2.6. Secteur d'exploration attribué au contractant	78
2.3.2.7. Etat des contrats d'exploration	79
2.3.2.8. Protection et préservation du milieu marin	81
2.3.3. Législation européenne	85
2.3.3.1. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM)	85
2.3.3.2. Réseau Natura 2000	87
2.3.4. Législation française (DPM, ZEE et plateau continental)	88
2.3.4.1. Rappel des limites des zones maritimes et des législations associées	88
2.3.4.2. Législation relative à au x responsabilités des Etats dans la Zone via les entreprises qu'ils patronnent	90
2.3.4.3. Législation nationale	91
2.3.5. Spécificités Outre-Mer	96
2.3.5.1. Les régimes législatifs et réglementaires applicables outre-mer	96
2.3.5.2. La répartition des compétences entre l'Etat et les collectivités pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes	97
2.3.6. Législations nationales autres que française	102
2.3.6.1. Les Etats-Unis	102
2.3.6.2. Le Brésil	103

2.3.6.3.	Les Iles Cook	103
2.3.6.4.	Les Iles Fidji	103
2.3.6.5.	La Nouvelle-Zélande	103
2.3.6.6.	La Papouasie-Nouvelle-Guinée	104
2.3.4.	Conclusion	104
2.4.1.	Les ressources minérales de faible profondeur	106
2.4.1.1.	Placers de minéraux lourds	106
2.4.1.2.	Diamants	106
2.4.1.3.	Phosphates	106
2.4.1.4.	Sables et graviers marins	107
2.4.1.5.	Les sels marins	107
2.4.2.	Les nodules polymétalliques	108
2.4.2.1.	Introduction et contexte	108
2.4.2.2.	Localisation	108
2.4.2.3.	Composition	109
2.4.2.4.	Classification, source des éléments, et mode de formation	111
2.4.2.5.	Importance du contexte géologique: cas de la zone Clarion- Clipperton (CCFZ)	116
2.4.3.	Les encroûtements	117
2.4.3.1.	Introduction et contexte	117
2.4.3.2.	Localisation	118
2.4.3.3.	Composition	118
2.4.3.4.	Source des éléments et mode de formation	120
2.4.4.	Les sulfures hydrothermaux	123
2.4.4.1.	Introduction	123
2.4.4.2.	Localisation	125
2.4.4.3.	Composition chimique	130
2.4.4.4.	Mode de formation	133
2.4.4.5.	Les panaches hydrothermaux	139
2.4.5.	Les autres types de ressources minérales marines profondes	148
2.4.5.1.	Les sites de production d'hydrogène naturel	148
2.4.5.2.	Les sédiments métallifères et saumures de la Mer Rouge	149
2.4.5.3.	Les boues métallifères riches en terres rares	150
2.5.	Degré d'évaluation et d'exploitation actuel des ressources minérales marines.	152
2.5.1.	Enjeux économiques	152
2.5.2.	Les nodules polymétalliques	156
2.5.2.1.	Historique de la prospection minière française	156
2.5.2.2.	Historique de la prospection au niveau international	161
2.5.2.3.	Stratégie des acteurs pionniers	163
2.5.2.4.	Les nouveaux acteurs majeurs	164
2.5.2.5.	Les acteurs émergents	166
2.5.2.6.	Stratégie de la France dans le cadre du contrat quinquennal	170
2.5.2.7.	Les permis en cours	173
2.5.3.	Les encroûtements hydrogénétiques	175
2.5.3.1.	Les critères d'exploration	176
2.5.3.3.	Les zones potentielles	178
2.5.3.2.	Degré d'exploration des encroûtements en Polynésie Française	179
2.5.4.	Les sulfures hydrothermaux	184

2.5.4.1. Les acteurs principaux de l'exploration minière des sulfures hydrothermaux	186
2.5.4.2. L'exploration minière des gisements de Solwara 1 et 12	187
2.5.4.3. Les ressources en sulfures de la dorsale Atlantique	198
2.5.4.4. Les activités minières en mer Rouge	199
2.6. Conclusion	202
Acronymes	204
Bibliographie	207

Liste des figures du chapitre 2

Figure 2-1 Localisation des principaux types de ressources minérales marines.	41
Figure 2-2 Classification des ressources et réserves utilisées par l'industrie minière.	43
Figure 2-3 Les 3 types de ressources minérales marines profondes.	45
Figure 2-4 Carte de localisation des principaux champs à nodules et zone à encroûtements ainsi que les principaux sites hydrothermaux dans les grands fonds océaniques.	47
Figure 2-5 Les principaux concepts des publications issues du Web of Science.	51
Figure 2-6 Evolution temporelle du nombre de publications issues du Web of Science.	52
Figure 2-7 Couverture géographique des publications issues du Web of Science.	53
Figure 2-8 Evolution temporelle de la contribution des principaux pays en fonction du nombre de publications issues du Web of Science.	54
Figure 2-9 Principales collaborations mondiales selon les publications issues du Web of Science.	54
Figure 2-10 Répartition de l'ensemble des notices issues de la base de référence Ifremer (principalement nodules polymétalliques et encroûtements) par type de document.	56
Figure 2-11 Evolution temporelle du nombre de notices recensés sur l'ensemble de la base de référence Ifremer concernant principalement les nodules et encroûtements.	57
Figure 2-12 Délimitation des zones maritimes selon l'UNCLOS © Le Cedre.	64
Figure 2-13 Critères de construction de la limite extérieure du plateau continental étendu.	65
Figure 2-14 La ZEE française (en orange) et les extensions du plateau continental (en rouge).	66
Figure 2-15 Identification des espèces et habitats prioritaires dans la zone OSPAR (http://jncc.defra.gov.uk/page-1583).	70
Figure 2-16 Identification des zones marines protégées (OSPAR, 2010).	70
Figure 2-17 Schémas des plans de travail pour les permis sulfures et encroûtements cobaltifères. © Ifremer, Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie.	79
Figure 2-18 Eaux sous juridiction française, aires marines protégées, stratégie nationale d'action à court terme (source : AAMP, 2012)	88
Figure 2-19 Facteur d'enrichissement des éléments majeurs et traces dans les nodules.	110
Figure 2-20 Schéma du contexte favorable à la formation des nodules.	111
Figure 2-21 Les hypothèses concernant les différentes sources de métaux impliquées dans la formation de nodules de la zone de CCZ.	112
Figure 2-22 Diagramme ternaire montrant les différents domaines de classification des dépôts métallifères océaniques : "hydrogénétique", "hydrothermal" et "diagénétique".	114
Figure 2-23 Lien entre productivité planctonique en surface et formation des nodules sur le fond.	115
Figure 2-24 Facteur d'enrichissement des éléments majeurs et traces dans les encroûtements.	119
Figure 2-25 Modèle de genèse des encroûtements hydrogénétiques par la formation de complexes et phases colloïdales facilitant l'adsorption des métaux.	121
Figure 2-26 Distribution globale des systèmes hydrothermaux actifs océaniques.	124
Figure 2-27 Estimation de la taille des dépôts (en tonnes) des sites hydrothermaux majeurs en fonction de leur profondeur.	126
Figure 2-28 Coupe des amas sulfurés de Middle Valley (dorsale de Juan de Fuca) formés sur une dorsale couverte de sédiments. <i>D'après Fouquet 2002.</i>	129

Figure 2-29 Principe général de la convection hydrothermale sur une coupe de dorsale océanique.	134
Figure 2-30 Courbe d'ébullition de l'eau de mer en fonction de la pression et de la température.	135
Figure 2-31 Illustration des différents types de cheminées hydrothermales.	136
Figure 2-32 Solubilité de la chalcopryrite (CuFeS ₂) et de la sphalérite (ZnS) en fonction de la température et du pH (d'après (Hannington et al, 1995).	138
Figure 2-33 Représentation schématique d'un système hydrothermal MOR et ses effets sur la colonne d'eau sus-jacente.	140
Figure 2-34 Profil de concentration en Fer total dissous (diagramme au dessus) et en Manganèse total dissous (diagramme en dessous) le long d'une section E-O de l'Atlantique Sud Equatorial. (D'après Saito et al, 2013)	143
Figure 2-35 Taux de sédimentation moyens total (diagramme au dessus) et du Fe, Mn, Cu et Zn (diagramme au dessous) dans le panache hydrothermal de EPR à 13°N, en fonction de la distance par rapport aux sources hydrothermales.	145
Figure 2-36 Vitesse d'oxydation du Fer ferreux dissous (rapportée en demi-vie) dans les panaches hydrothermaux de différents sites hydrothermaux.	146
D'après Field and Sherrell, 2000	146
Figure 2-37 Photographie de sections de carottes (VA22-146KS) dans les sédiments métallifères de la mer Rouge (Fosse Atlantis II Deep).	150
Figure 2-38 Distribution des teneurs moyennes en terres rares dans les premiers 2 m des sédiments marins dans l'océan Pacifique. D'après (Kato et al, 2011).	151
Figure 2-39 Localisation des permis d'exploration et d'exploitation attribués dans les ZEE et des permis d'exploration attribués par l'AIFM.	155
Figure 2-40 Photo et principe de fonctionnement de l'Engin Double (ED1).	157
Figure 2-41 Sondeurs à faisceau large, à faisceau étroit et multifaisceaux.	160
Figure 2-42 Epaulard et RAIE.	160
Figure 2-43 Outils de prélèvements - Drague épibenthique, carottier multitubes, carottier USNEL.	173
Figure 2-44 Position des permis accordés par l'AIFM dans la zone à nodules de Clarion-Clipperton.	175
Figure 2-45 Mont sous-marin caractérisé par une zone sommitale en forme de plateau, idéale pour la prospection des encroûtements hydrogénétiques.	177
Figure 2-46 Carte du Pacifique présentant les ZEE des USA, de France et de Kiribati.	178
Figure 2-47 Localisation des campagnes NODCO et ZEPOLYF.	180
Figure 2-48 Zones sous contrat ou approuvées par l'AIFM dans l'océan Atlantique.	185
Figure 2-49 Zones sous contrat ou approuvées par l'AIFM dans l'océan Indien.	186
Figure 2-50 Carte de localisation des permis d'exploration accordés (rouge) et demandés (jaune) par la société Nautilus Minerals Inc.	187
Figure 2-51 Carte de localisation des sites Solwara 1 à Solwara 19.	188
Figure 2-52 Contexte tectonique du bassin arrière-arc de Manus et localisation des sites hydrothermaux (Vienna Woods, PACMANUS, DESMOS, SuSu Knolls).	189
Figure 2-53 Carte bathymétrique de la caldera Desmos et localisation des sites minéralisés Onsen et Solwara 12.	190
Figure 2-54 Localisation des principales zones de sulfures massifs (contour noir) estimées à partir des données d'électromagnétisme.	191
Figure 2-55 Coupe transverse de la zone minéralisée n°2 issue des interprétations lithologiques de sondages.	191
Figure 2-56 Coupe au travers du "block model" établi pour le site de Solwara 1.	193

Figure 2-57 Localisation des ressources indiquées (contours violets) et de la ressource totale (contour vert).	194
Figure 2-58 Carte bathymétrique présentant la zone minéralisée de Solwara 12 et la position des sondages réalisés. (Lipton, 2012)	196
Figure 2-59 Coupe interprétative du site minéralisé de Solwara 12.	197

Liste des tableaux du chapitre 2

Tableau 2-1 Compositions moyennes des principaux types de minéralisations des grands fonds océaniques pour les principaux environnements dans lesquels ils se forment (Fouquet and Lacroix, 2012).	46
Tableau 2-2 Historique de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (source AIFM).	59
Tableau 2-3 Définition et délimitation des différentes sections des mers et des océans suite à la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer.	63
Tableau 2-4 Orientations scientifiques pour la sélection des aires, afin d'établir un réseau représentatif d'aires marines protégées, y compris dans la haute mer et les habitats des grands fonds marins. (UNEP/CDB/COP/DEC/IX/20, Mentionnées au paragraphe 3 de l'annexe II de la décision VIII/24)	68
Tableau 2-5 Quatre premières étapes à prendre en considération dans l'établissement de réseaux représentatifs d'aires marines protégées (UNEP/CDB/COP/DEC/IX/20.)	69
Tableau 2-6 Conventions internationales liées au domaine maritime.	71
Tableau 2-7 Carte d'identité de l'Autorité Internationale des Fonds Marins – AIFM. (http://www.isa.org.jm/fr/home)	73
Tableau 2-8 Les différentes phases relatives à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques, sulfures hydrothermaux et encroûtements cobaltifères (juin 2013).	75
Tableau 2-9 Superficie du secteur attribué pour l'exploration au contractant suite à l'approbation d'un plan de travail.	78
Tableau 2-10 Contrats d'exploration des nodules polymétalliques.	79
Tableau 2-11 Contrats d'exploration des sulfures polymétalliques.	80
Tableau 2-12 Contrats d'exploration des encroûtements cobaltifères (juin 2013).	81
Tableau 2-13 Recommandations émises par l'Autorité internationale des fonds marins.	83
Tableau 2-14 Catégories de données à recueillir en vue de la mise en place de l'état initial et de l'évaluation des impacts.	83
Tableau 2-15 Activités nécessitant et ne nécessitant pas d'évaluation de l'impact environnemental.	85
Tableau 2-16 Législation nationale visant spécifiquement l'exploration et la mise en valeur des ressources de la « Zone ».	90
Tableau 2-17 Répartition des compétences en matière de réglementation et d'exercice des droits d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles biologiques et non biologiques en mer (Com. Pers. Ministère de l'Outre-Mer, 2013).	101
Tableau 2-18 Comparaison des législations nationales (Sénat, 2013) relatives aux ressources minérales marines profondes.	105
Tableau 2-19 Comparaison des flux hydrothermaux (fluides chauds) calculés par des méthodes géophysiques avec les apports fluviaux. D'après Elderfield et Schultz, 1996.	141
Tableau 2-20 Estimation des temps nécessaires pour une dissolution complète des minéraux de sulfures et sulfates principaux de panaches hydrothermaux, en fonction de la taille des particules.	147
Tableau 2-21 Compositions chimiques types des fluides hydrothermaux en différents contextes géodynamiques et en fonction de la nature de la roche du substratum.	148

Tableau 2-22 Estimation des tonnages (x106 tonnes) en nodules de la zone de Clarion-Clipperton en comparaison avec les réserves terrestres et zones à encroûtements les plus riches d'après les données de l'USGS.	152
Tableau 2-23 Contrats d'exploration des nodules polymétalliques (CCFZ: zone de fracture Clarion-Clipperton).	174
Tableau 2-24 Critères régionaux définis aux fins de la prospection des encroûtements Fe-Mn source (ISA, 2002)	177
Tableau 2-25 Critères particuliers au site définis aux fins de la prospection des encroûtements.	178
Tableau 2-26 Descriptions lithologiques des facies hydrothermaux rencontrés sur le site de Solwara 1.	192
Tableau 2-27 Estimation des ressources du gisement de Solwara 1.	195
Tableau 2-28 Estimation des ressources du gisement de Solwara 1 exprimées en cuivre équivalent.	195
Tableau 2-29 Estimation des ressources du gisement de Solwara 12.	198
Tableau 2-30 Historique des estimations de ressources du gisement Atlantis II Deep exprimé en métal contenu.	200
Tableau 2-31 Nombre de stations de carottage dans la fosse Atlantis II Deep ayant servi à réaliser l'estimation des ressources de DFI selon la norme NI 43-101.201	
Tableau 2-32 Comparaison des estimations de ressources historique et actuelle.	201

Chapitre 2. Les ressources minérales marines profondes

2.1. Introduction

L'économie mondiale, notamment liée à la forte demande des grands pays émergents, traverse de profondes mutations qui ont des conséquences considérables pour la demande globale en ressources naturelles. En un siècle, la consommation mondiale des quinze principaux métaux a été multipliée par 20 en tonnage, alors que la population mondiale n'était multipliée que par 3,6. Cette forte demande, accompagnée d'une envolée des cours des ressources énergétiques et minérales a obligé les pays industrialisés à diversifier les approvisionnements et donc à rechercher de nouveaux gisements "non conventionnels" tels que ceux rencontrés dans les grands fonds marins. A l'échelle internationale, nous observons donc une relance dans l'exploration non seulement sur les continents, mais aussi dans les océans, qui couvrent 71 % de la surface terrestre et dont 60 % atteignent des profondeurs dépassant les 2 000 mètres.

Que ce soit à terre ou dans le domaine marin, une ressource minérale peut être définie comme toute substance minérale concentrée par des processus géologiques et qui pourrait être utilisée par l'homme (cf. encadré). Actuellement on peut distinguer 8 principaux types de ressources minérales dans les océans (Figure 2-1) parmi lesquelles il convient de distinguer les minéralisations de faible profondeur (< 300 m) faisant déjà l'objet d'exploitations et les minéralisations de grande profondeur (> 300 m). Il est en revanche important de souligner que la majorité des ressources marines qui intéressent de plus en plus les compagnies minières se situent à des plus grandes profondeurs (> 1000 m).

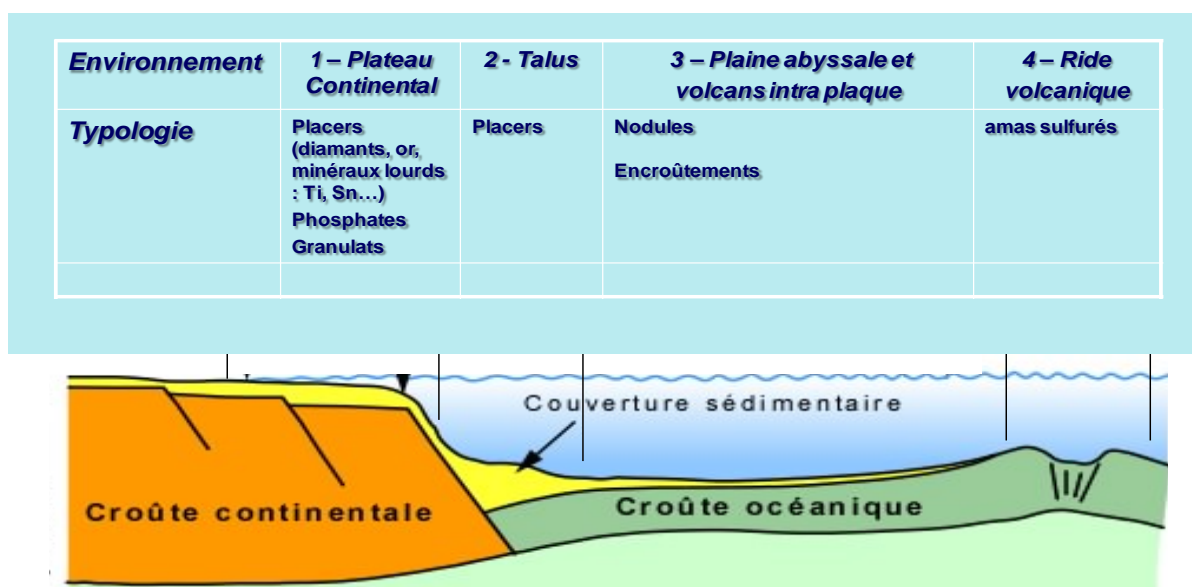


Figure 2-1 Localisation des principaux types de ressources minérales marines.
(D'après Cronan, 1985; Cronan, 1999; Fouquet and Lacroix, 2012; ISA, 2004; Rona, 2008).

Les premières ressources minérales exploitées se situent à très faible profondeur sur le plateau continental (Figure 2-1) – Cf. le paragraphe 2.3.1.

Les ressources minérales marines profondes qui ont suscité un intérêt particulier en vue d'une exploitation minière sont classiquement groupées en 3 types (Figure 2-3): (1) les **nodules**, souvent connus sous les termes de nodules polymétalliques ou nodules manganifères; (2) les **encroûtements**, souvent connus sous les termes d'encroûtements (ou croûtes) de manganèse, cobaltifères, hydrogénétiques ou thalassiques; (3) les **sulfures hydrothermaux**.

D'autres ressources marines profondes peuvent également être ajoutées à cette liste, mais constituent soit un intérêt ponctuel comme les **sédiments métallifères de la Mer Rouge** qui n'ont pas d'équivalent dans d'autres domaines océaniques, soit un intérêt marginal compte-tenu de la difficulté d'extraction des ressources, telles que les **sites de production d'hydrogène naturel** ou les **sédiments enrichis en terres rares**.

Encadré : Définition des termes « ressources » et « réserves »

Ressources

Il existe une différence fondamentale entre l'utilisation du mot « ressources » dans le vocabulaire minier et l'utilisation de ce même mot dans le domaine scientifique.

Dans plusieurs revues scientifiques (hors revues spécialisées dans la géologie économique), le mot ressources est utilisé dès qu'un objet géologique (appelé minéralisation) présente des valeurs anormales en un ou plusieurs éléments qui sont utilisés dans la société. Ainsi une « ressource potentielle » d'un point de vue scientifique ne prend en compte que la nature chimique de la minéralisation. De plus, les estimations de ressources réalisées lors d'études scientifiques représentent des extrapolations hasardeuses sur des volumes arbitraires (sans réalité géologique) et parfois réalisées à partir d'un seul échantillon ou carottage. Les valeurs de tonnages métal issues de ces extrapolations sont donc extrêmement douteuses.

A l'inverse, au niveau minier, une ressource est un volume minéralisé calculé à partir d'un groupe d'échantillons suffisants (généralement prélevé selon un maillage régulier) et selon des méthodes géostatistiques adaptées aux données disponibles. Le calcul ne se fait qu'à l'intérieur du ou des volumes minéralisés qui sont définies grâce aux études lithologiques des échantillons prélevés. Ces volumes sont loin d'être arbitraires et s'appuient donc sur une véritable connaissance géologique. En fonction de la robustesse du modèle géologique, de la représentativité de l'échantillonnage, de la qualité des données lithologiques, minéralogiques et géochimiques, un degré de confiance est associé à la ressource. Il s'agit de la classification de la ressource qui existe également pour la réserve (Figure 2-2). On parle alors de **ressources estimées** lorsque le degré d'incertitude est fort, de **ressources indiquées** lorsque le degré d'incertitude est raisonnable et de **ressources mesurées** lorsque le degré de d'incertitude est faible. Même si les chiffres associés à une ressource sont principalement calculés en fonction des seules données géologiques *s.l.* parfois d'autres paramètres externes sont pris en compte. Il s'agit généralement de paramètres économiques de base comme le taux de perte lors de l'extraction du minerai ou du transport, le taux de récupération de chaque métal au cours du traitement, ou encore les prix des métaux.

Réserves

Le terme « réserve » est uniquement associé au vocabulaire minier. Tout comme la ressource, il s'agit d'un volume minéralisé ou les teneurs en certains métaux ont été estimées. Elle est calculée à partir d'une ressource déjà estimée ; le volume d'une réserve appartient donc au volume de la ressource à partir de laquelle elle est calculée. La principale différence se situe

dans les paramètres utilisés lors de l'estimation. Les réserves prennent en compte une liste exhaustive de « facteurs modificateurs » : (i) les paramètres liés aux coûts des infrastructures, du type d'extraction, de traitement ou de transport, (ii) les paramètres économiques (ex. prix des métaux, marché mondial ou local), (iii) les facteurs environnementaux, (iv) sociaux, (v) légaux ou (vi) gouvernementaux. Ainsi, la réserve représente un volume économiquement rentable et techniquement extractible à l'instant de l'estimation. Comme pour les ressources, il existe différents degrés de confiance. Toutefois, étant donné que l'on ne calculera pas de réserves sur la base de ressources estimées (c.-à-d. avec plus de 50 % d'incertitude), il n'existe que deux degrés de confiance possibles pour une réserve (Figure 2-2). Cette dernière sera donc soit une **réserve probable** lorsqu'elle est calculée à partir d'une ressource indiquée, soit une **réserve prouvée** lorsqu'elle est calculée à partir d'une ressource mesurée.

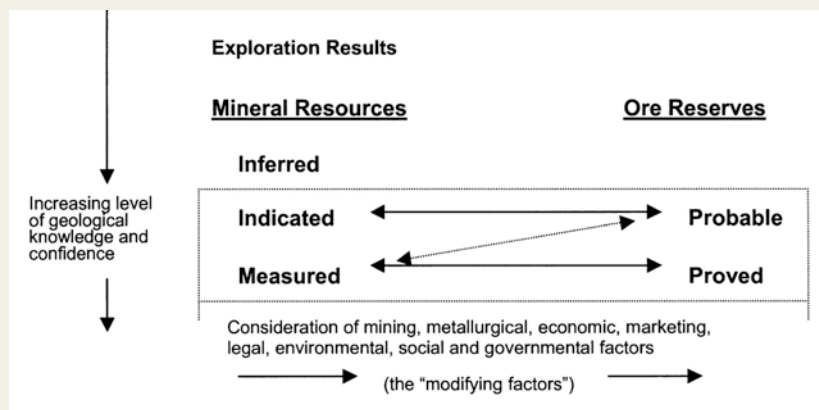


Figure 2-2 Classification des ressources et réserves utilisées par l'industrie minière.

Les normes ou codes de classification

Dans l'industrie minière, les chiffres de ressources et réserves et leur classification (estimée, indiquée, mesurée, probable, prouvée) sont toujours rapportés à des normes ou codes de classification. Parmi les normes les plus utilisées, nous pouvons citer la classification NI 43-101 de la CIM (*Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*), le code australien JORC (*Joint Ore Reserves Committee Code*) et le code sud-africain SAMREC (*South African Mineral Resource Committee*).

Ainsi, contrairement au chapitre 2.1 où le terme « ressources » est utilisé d'un point de vue scientifique, dans le chapitre 2.2, l'utilisation du mot « ressources » se fera selon les critères de l'industrie minière. Il n'est donc pas possible de comparer les chiffres issus des ressources présentés dans le chapitre 2.1 et ceux qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Les explorations scientifiques menées depuis une quarantaine d'années ont identifié la diversité et la complexité des processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration des métaux dans les grands fonds. A titre d'exemple, 214 campagnes océanographiques françaises ont été réalisées depuis 1972 sur les ressources minérales marines profondes (la liste de ces campagnes est disponible en annexe de la présente expertise) : 38 sur les nodules, 142 sur les sources hydrothermales et 34 sur les encroûtements cobaltifères ou autres. Cette liste, établie à partir des données du Sismer, a été obtenue en s'appuyant sur une extraction faite selon les critères suivants :

- campagnes françaises profondes,
- campagnes non confidentielles,

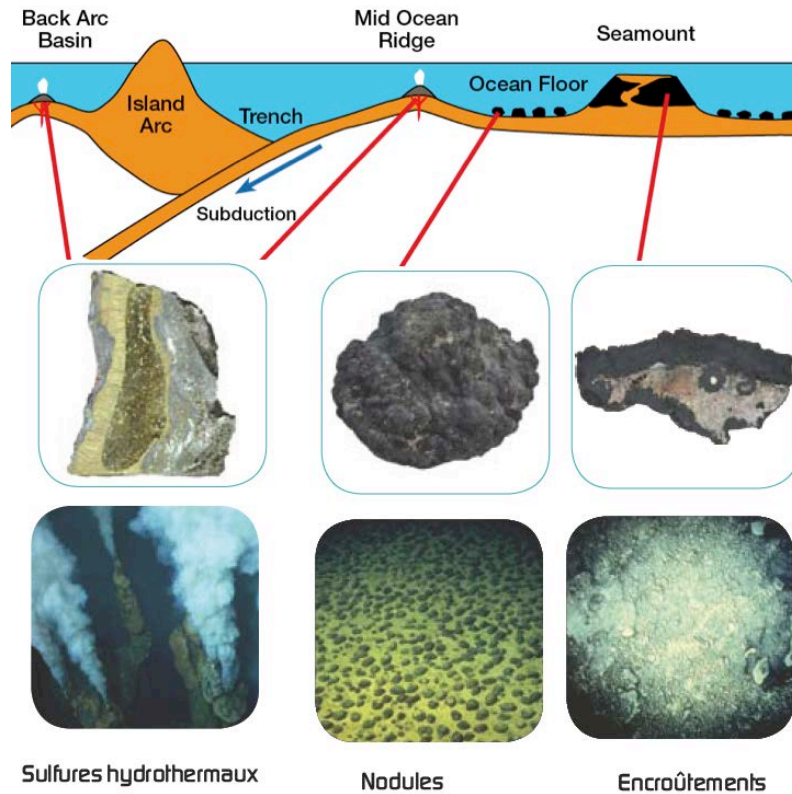
- campagnes de type « campagne océanographique » et « prestation commerciale » (les transits, les transits valorisés et les essais n'ont pas été pris en compte).

Une grande partie de ces 214 campagnes a été réalisée en Atlantique ou dans le Pacifique :

- Pour les campagnes sur les sources hydrothermales, près de 48% ont été réalisées en Atlantique, près de 34% dans le Pacifique et 12% dans l'Océan Indien
- Pour les campagnes sur les nodules, 92% ont été réalisées dans le Pacifique.
- Pour les autres, elles se répartissent essentiellement entre le Pacifique (44%) et l'Atlantique (32%). On retrouve tout de même quelques campagnes en Méditerranée (8%), en Antarctique (8% également) et dans l'océan Indien (6%).

Tous types de campagnes confondus, les trois navires océanographiques qui ont été les plus utilisés sont l'Atalante (23%), le Jean Charcot (15%) et Le Nadir (15% également).

Les études de la circulation de fluides, du contexte tectono-magmatique et sédimentaire ont été déterminantes à la fois pour la compréhension des dépôts métallifères océaniques, mais aussi de la construction et de l'évolution spatio-temporelle des habitats océaniques profonds. Il est maintenant bien admis que les nodules polymétalliques sont présents dans tous les océans et sous toutes les latitudes (Figure 2-4) ainsi que dans certains lacs. Ils se forment dans des zones caractérisées par un faible taux de sédimentation et par des boues à radiolaires. Dès 1973, des champs à forte densité de nodules ont été trouvés le long d'une ceinture est-ouest dans le Pacifique nord (zone dite « Clarion-Clipperton »), qui a fait l'objet de nombreuses campagnes d'exploration en vue d'exploitation minière. Les encroûtements hydrogénétiqes ont également été répertoriés dans tous les océans dans les environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant des millions d'années (Figure 2-4). En général, ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Découvert en 1979, les systèmes hydrothermaux sous-marins se retrouvent le long des 60 000 km de dorsales océaniques et dans les bassins arrière-arc (Figure 2-4). Ces zones résultent du mouvement des plaques tectoniques terrestres et de l'activité volcanique qui en découle. Les sulfures hydrothermaux sont ainsi le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. On les trouve sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique.



Sulfures hydrothermaux

Nodules

Encroûtements

Figure 2-3 Les 3 types de ressources minérales marines profondes.

Modifié d'après <http://www.sopac.org/dsm/public/files/resources/>; et (Fouquet and Lacroix, 2012).

Les nodules et encroûtements d'hydroxydes de fer et de manganèse sont intéressants pour leurs concentrations en nickel, cuivre et cobalt mais ils peuvent également être enrichis en platine, titane, terres rares (en particulier le cérium), zirconium, molybdène, vanadium, tellure, thallium et phosphore. Selon le contexte et la nature du substratum impliqué, les sulfures hydrothermaux peuvent être fortement concentrés en cuivre, zinc, or, argent, cobalt, plomb, baryum mais aussi en éléments plus rares tels que cadmium, antimoine, cobalt, germanium, indium, sélénium, mercure. En raison de la salinité de l'eau de mer et de l'augmentation de la température d'ébullition avec la profondeur, les fluides les plus profonds ont une plus grande capacité à transporter les métaux.

En fonction des concentrations, de la configuration électronique des éléments, de leur utilisation, de l'intérêt économique, et des phases minérales en présence, on peut distinguer différentes catégories de métaux au sens chimique (tels que les "métalloïdes", les "métaux de transition", les "métaux lourds") au sens économique (tels que les "métaux précieux", les "métaux de base", les métaux "stratégiques"), et en fonction de leur abondances (tels que les "métaux majeurs", les "métaux traces", et les "métaux ultra-traces") (cf. encadré).

Tableau 2-1 Compositions moyennes des principaux types de minéralisations des grands fonds océaniques pour les principaux environnements dans lesquels ils se forment (Fouquet and Lacroix, 2012).

	<i>Nodules</i>		<i>Encroutements</i>		<i>Sulfures hydrothermaux</i>		
	<i>Clipperton</i>	<i>Pacific Ocean</i>	<i>Pacific Ocean</i>	<i>Polynésie</i>	<i>SW pacific</i>	<i>East Pacifique</i>	<i>Atlantic</i>
% poids							
Iron	6,90	12,70	15,99	15,08	11,22	25,45	27,64
Manganese	25,40	18,50	21,95	19,48	0,18	0,05	0,04
Copper	0,82	0,42	0,09	0,27	3,48	3,85	8,49
Zinc	0,14	0,09	0,07	0,06	16,28	10,46	6,64
Cobalt	0,24	0,24	0,69	0,79	0,00	0,04	0,11
Nickel	1,28	0,63	0,41	0,38	0,00	0,00	0,02
Titanium	0,53	0,78	1,20	0,93	-	-	-
Sulfur	-	-	-	-	21,46	33,34	31,59
Baryum	0,28	0,20	0,18	0,14	12,19	1,99	3,35
Silica	7,60	8,80	4,14	2,40	14,84	11,48	8,24
grammes/tonne							
Lead	450	820	1626	1163	14493	1180	450
Platinum	0,10	0,10	0,64	1,05	-	-	-
Gold	-	-	-	-	2,44	0,61	3,40
Silver	<0,2	<0,2	<0,2	<10	404	115	81
Arsenic	159	159	272	248	1484	351	211
Cérium	530	530	1605	702		-	-
Molybdenum	520	360	442	307	132	103	55
Zirconium	350	620	618	484	-	-	-

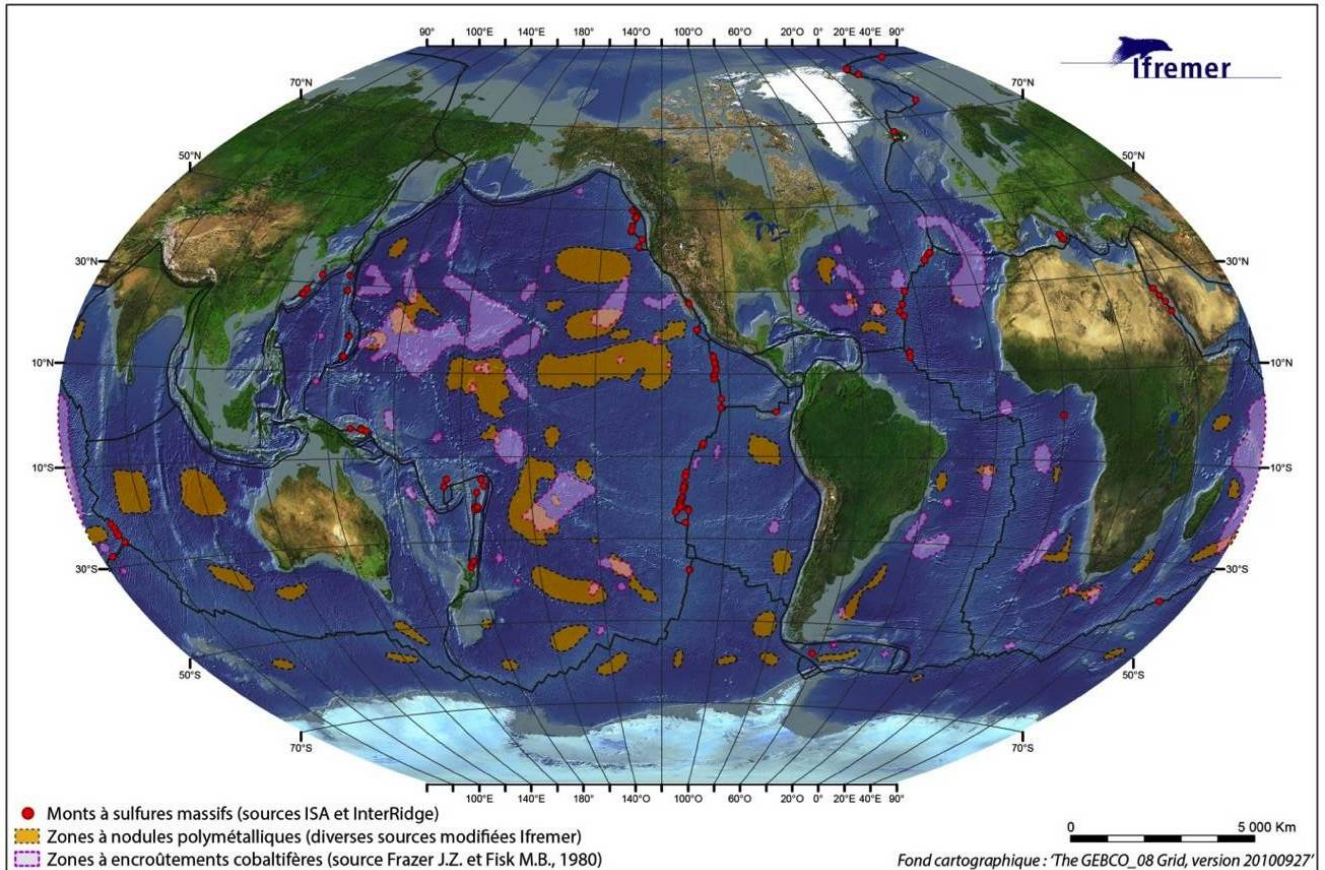


Figure 2-4 Carte de localisation des principaux champs à nodules et zone à encroûtements ainsi que les principaux sites hydrothermaux dans les grands fonds océaniques.

Source Ifremer, Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie, InterRidge, ISA

Encadré : Définition des termes relatifs aux métaux

Stricto sensu, les **métaux** regroupent les éléments chimiques pouvant perdre des électrons et former des liaisons métalliques ainsi que des liaisons ioniques. Les métaux regroupent à la fois :

- (1) **les métaux alcalins**: Césium (Cs), Lithium (Li), Potassium (K), Rubidium (Rb), Sodium (Na);
- (2) **les métaux alcalino-terreux**: Baryum (Ba), Béryllium (Be), Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Radium (Ra), Strontium (Sr);
- (3) **les métaux de transition** qui regroupent 29 éléments chimiques sont classiquement considérés comme étant les métaux principaux;
- (4) **les métaux pauvres**: Aluminium (Al), Bismuth (Bi), Etain (Sn), Indium (In), Plomb (Pb), Thallium (Tl).

D'autres éléments peuvent également être assimilés aux métaux *lato sensu* tels que :

- (4) **les terres rares** (*rare earth elements* ("REEs") ou *rare earth metals* en anglais) qui constituent un groupe métaux aux propriétés voisines comprenant le Scandium (Sc), l'Yttrium (Y), le Lutécium (Lu) et les quinze lanthanides (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu).
- (5) **les métalloïdes**: Germanium (Ge), Arsenic (As), Antimoine (Sb), Tellure (Te).
- (6) **les non-métaux** tels que le Sélénium (Se).

Parmi les métaux de transition, il est possible de classer:

Les métaux précieux: Or (Au), Argent (Ag), Platine (Pt), Rhodium (Rh) et Palladium (Pd).

Les platinoïdes correspondent aux métaux du groupe du platine (PGE) : Ruthénium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir), Platine (Pt), et, selon les sources, Rhénium (Re).

Les chalcophiles regroupent un grand nombre d'éléments qui sont associés au soufre (S) pour former des minéraux de sulfures.

Les métaux de base regroupent différents éléments en fonction des sources et du contexte (scientifique, minier, ou économique) mais incluent généralement les métaux non-ferreux essentiels à l'industrie tels que le Manganèse (Mn), le Cuivre (Cu), le Plomb (Pb), le Nickel (Ni), et le Zinc (Zn) - le Fer (Fe) étant l'élément principal.

Les métaux majeurs incluent les métaux présents à forte concentration (> 1%) et qui peuvent être constitutifs des minéraux principaux d'un gisement. Dans le cas des ressources minérales marines, les métaux majeurs sont classiquement: Fe, Cu, Zn, Mn, (Ni, Pb, Co).

Les métaux traces incluent les métaux présents dans les minéralisations à des concentrations de l'ordre de quelques g/tonnes. Ils peuvent être constitutifs des minéraux accessoires d'un gisement. Dans le cas des ressources minérales marines, les métaux traces sont classiquement: Pt, Or, Ag, As, Ce, Mo, Zr, Ti, Se, Sb, Te, Tl, Sn, REE.

Les métaux ultra-traces incluent les métaux présents dans les minéralisations à de très faibles concentrations de l'ordre de quelques microgrammes par tonnes et forment rarement des minéraux (présents en inclusions). Dans le cas des ressources minérales marines, les métaux ultra-traces varient largement d'un gisement à l'autre.

L'intérêt de l'industrie et des pays dans les ressources minérales marines n'est pas nouveau puisque les nodules polymétalliques ont été considérés comme des ressources potentielles depuis les années 1950. En revanche, l'émergence d'une industrie minière sous-marine a été favorisée par l'exploration scientifique systématique des minéralisations hydrothermales sous-marines depuis la fin des années 1970. D'un point de vue juridique, l'accès aux ressources minérales marines aux fins d'exploration et d'exploitation n'est pas libre (ISA, 1998; ISA, 2007a; ISA, 2007b; ISA, 2011c). Ces activités ont un régime dépendant de leur localisation : la zone économique exclusive (ZEE) ou les grands fonds marins au-delà des limites de juridiction des Etats, appelée la Zone (Nations-Unies, 1983). Des conventions et des règlements internationaux et nationaux viennent petit à petit encadrer l'accès aux ressources minérales marines profondes mais la méconnaissance de ces environnements induit un faible nombre de législations spécifiquement applicables à ces ressources minérales sous-marines (Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations, 2013b). **Afin de donner un cadre réglementaire à cette étude, le chapitre 2.3. traitera des aspects juridiques liés à l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines dans la Zone ainsi que de la législation nationale française dans la ZEE.**

Il est important de souligner que les minéralisations des grands fonds (sulfures hydrothermaux, nodules et encroûtements de manganèse) ne se distinguent pas seulement des autres ressources minérales par leur grande profondeur et leur environnement géologique, mais également par des modes de formation qui impliquent des processus sous-marins qui n'ont pas d'équivalent en domaine continental. Cette spécificité ne se retrouve pas dans le cas des ressources minérales marines de faible profondeur (placers, diamants) qui sont associées à des processus continentaux. De plus, contrairement aux ressources énergétiques marines actuellement exploitées par forage, les ressources minérales marines accessibles reposent directement sur le plancher océanique. Les exploitations ne se feront pas en galeries et ne

gèneront donc pas de volumes importants de stériles miniers. Ces facteurs convergent pour minimiser les coûts (infrastructures facilement transportables par voie de mer), et la dépense énergétique nécessaire aux exploitations. En cas d'exploitation, les incidences sur l'environnement seront très différentes en fonction du contexte géologique et du type de ressource considéré. **Le Chapitre 2.4. donnera un aperçu des connaissances scientifiques actuelles concernant la localisation, formation et composition des différentes ressources minérales marines. Cet état des connaissances permettra de présenter le degré d'évaluation de l'exploitation des ressources minérales qui font l'objet de permis d'exploration en vue d'exploitation minière. Ce point sera abordé dans le chapitre 2.5.**

2.2. Analyse bibliométrique

2.2.1. Introduction

Le chapitre 2 de la présente expertise synthétise les connaissances sur la nature des ressources, leurs caractéristiques et leur localisation et précise le degré d'évaluation voire d'exploitation de ces ressources ainsi que les acteurs en présence. Le chapitre 3 identifie quant à lui les techniques d'exploration et d'exploitation afin d'envisager leurs impacts sur le milieu. La littérature associée à ces chapitres est reconnue pour être vaste, exceptée pour la partie technique d'exploitation (chapitre 3).

Une analyse bibliométrique a été réalisée sur la littérature associée aux chapitres 2 afin :

- d'analyser les références bibliographiques associées à ces sujets et de vérifier qu'aucune grande thématique ou qu'aucun grand acteur n'ait été oublié ;
- de mettre en évidence, pour l'ensemble des ressources minérales marines profondes mais également pour chacune des trois ressources, les grands acteurs, l'évolution temporelle de la bibliographie, les principaux concepts développés et les principales collaborations existantes.

2.2.2. Méthodologie

Le corpus bibliographique est composé de deux types de ressources :

- La base de références bibliographiques issues du Web of Science.
- La base de référence du laboratoire Géochimie et Métallogénie de l'unité de recherche Géosciences Marines du centre Ifremer de Brest (appelée dans ce document « base de références Ifremer ») essentiellement dédiée aux nodules.

L'analyse bibliométrique a essentiellement été réalisée sur les références issues du Web of Science.

Les mêmes critères d'analyse n'ont pas pu être utilisés sur la base de références de l'Ifremer, dû aux formatages différents de ces deux ressources.

2.2.3. Le Web of science

2.2.3.1. *Méthodologie de recherche*

Le *Web of Science* (WOS) est une base de données bibliographique de référence internationale développée par Thomson Reuters. Il s'agit de la source principale de références bibliographiques utilisée pour cette étude. Une recherche permet de sélectionner les références associées aux termes recherchés dans les titres, résumés et mots-clés. Seules celles associées aux documents suivant sont retenues : « article OR proceedings paper OR letter OR review OR editorial material OR book chapter ».

Trois équations ont été élaborées. Elles contiennent une série de termes généralement associés aux trois types de ressources visés par la présente expertise. Ces équations visent ainsi à sélectionner les références liées aux sulfures, nodules et encroûtements, que ce soit dans les thématiques de géosciences, géophysiques ou biologie. Il s'agit donc d'une recherche ciblée sur l'environnement dans son ensemble qui inclue les ressources minérales en question.

1^{ère} équation: ("hydrothermal" OR "thermal spring*" OR "sulfide*" OR "sulphid*") NOT ("ophiolit*" or "gas hydrate*" or "precambri*") AND ("rift*" OR "ridge*") AND ("submarine" OR "oceanic" OR "deep sea" or "seafloor") NOT ("volcanogenic")

2^{ème} équation: (("concretion*" OR "nodule*") AND (("submarine" OR "oceanic" OR "deep sea" or "seafloor") OR ("mangan*" or "ferromang*" or "polymetal*"))) NOT ("lake*" or "coast*" or "soil*"))

3^{ème} équation: ("crust") AND ("mangan*" or "ferromang*" or "polymetal*" or "FeMn" or "hydrogen*" or "Fe-Mn" or "FeMn" or "Co-rich" or "cobalt-rich")

La première équation a permis de sélectionner 2 594 références, la deuxième 2 089 références et la troisième 1 198 références. La combinaison de ces trois équations permet de sélectionner un total de 5 614 références (les références en doublon étant supprimées).

2.2.3.2. *Résultats et discussion*

Les 5 614 références issues du *Web of Sciences* ont été importées et analysées dans le logiciel *Intellixir*. Ce logiciel est un logiciel de veille concurrentielle, développé depuis une dizaine d'années par la société française *Intellixir*. Le système *Intellixir* permet d'analyser de l'information brevet et des articles scientifiques exportés depuis des bases de données privées, commerciales ou publiques. Ce système de veille concurrentielle et veille technologique est particulièrement utilisé dans les secteurs de l'industrie des sciences et technologies.

Principaux concepts

La base de référence issue du *Web of Science* est essentiellement composée de références associées à l'hydrothermalisme (2 429 références) (Figure 2-5). Le nombre de références associées aux nodules et aux encroûtements sont relativement similaires (1755 pour les encroûtements et 1379 références pour les nodules).

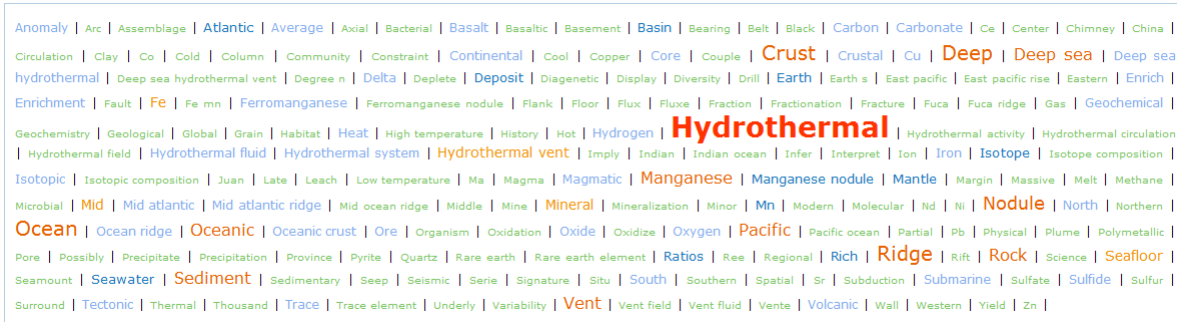


Figure 2-5 Les principaux concepts des publications issues du Web of Science.

Evolution temporelle sur l'ensemble des références et suivant le type de ressources

Les premières références issues du Web of Science datent de 1975 (environ 20 références) (Figure 2-6). Une très nette augmentation du nombre de publications est visible à partir de 1991, celui-ci passant de moins de 60 à plus de 120 à partir de 1990. Une augmentation du nombre de publications, plus faible, est également observable de 1991 à nos jours.

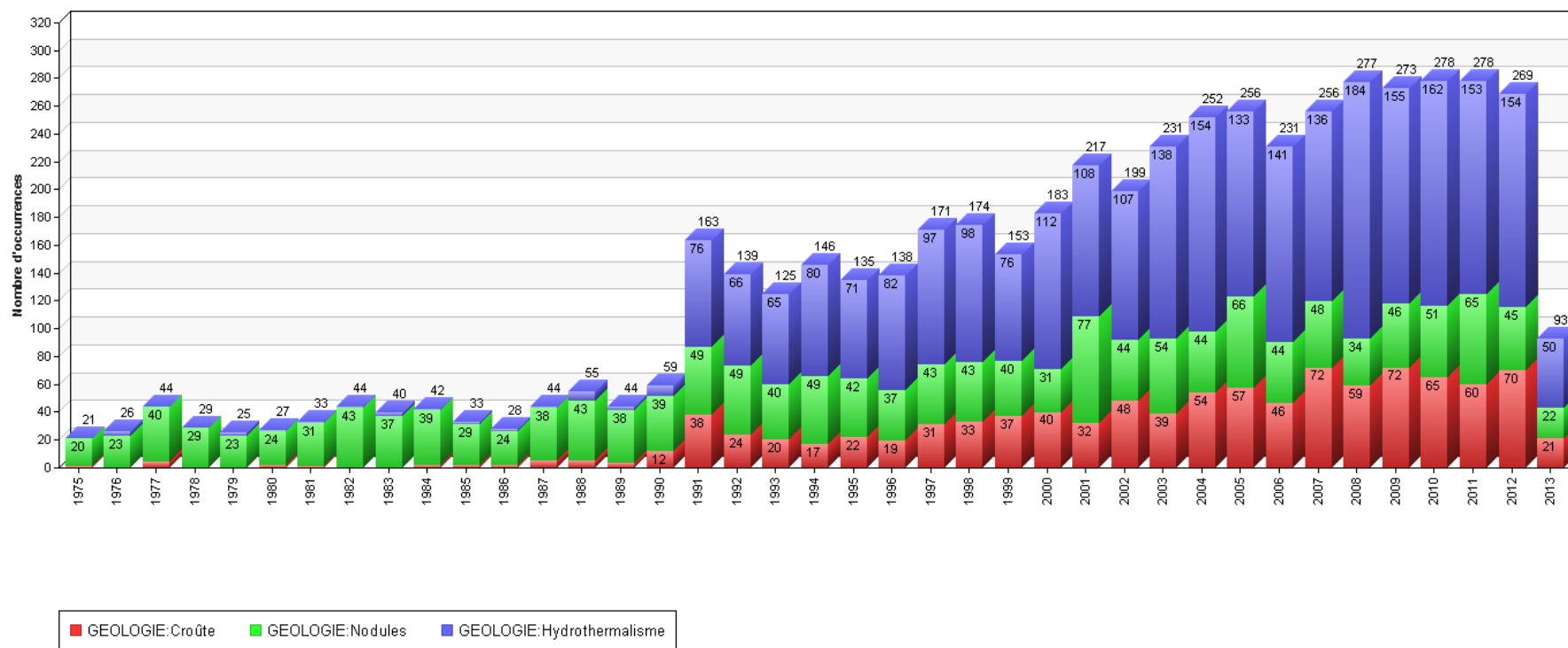


Figure 2-6 Evolution temporelle du nombre de publications issues du Web of Science.

Les références antérieures à 1987 sont quasi uniquement associées aux nodules. Le nombre de références associées aux nodules reste par ailleurs relativement constant de 1975 à nos jours. Le début des années 1990 voit le nombre de références associées à l'hydrothermalisme se multiplier. La très nette augmentation du nombre de références observées en 1991 dans la Figure 2-6 peut ainsi être associée aux références associées à l'hydrothermalisme. Ce pic de publication peut également être associé au développement de l'informatique et de l'internet et donc à un meilleur référencement des références bibliographiques.

Implication des pays

La Figure 2-7 présente les principaux pays publiant sur les thématiques recherchées. Les Etats-Unis (1 279 références) et la France (609) apparaissent comme étant les pays avec le plus grand nombre de publications. Les acteurs suivants sont l'Allemagne (512), le Royaume-Uni (387), la Chine (384), le Japon (327), le Canada (297), la Russie (288) et l'Inde (232). Les autres pays ont publié moins de 200 références de 1975 à nos jours.

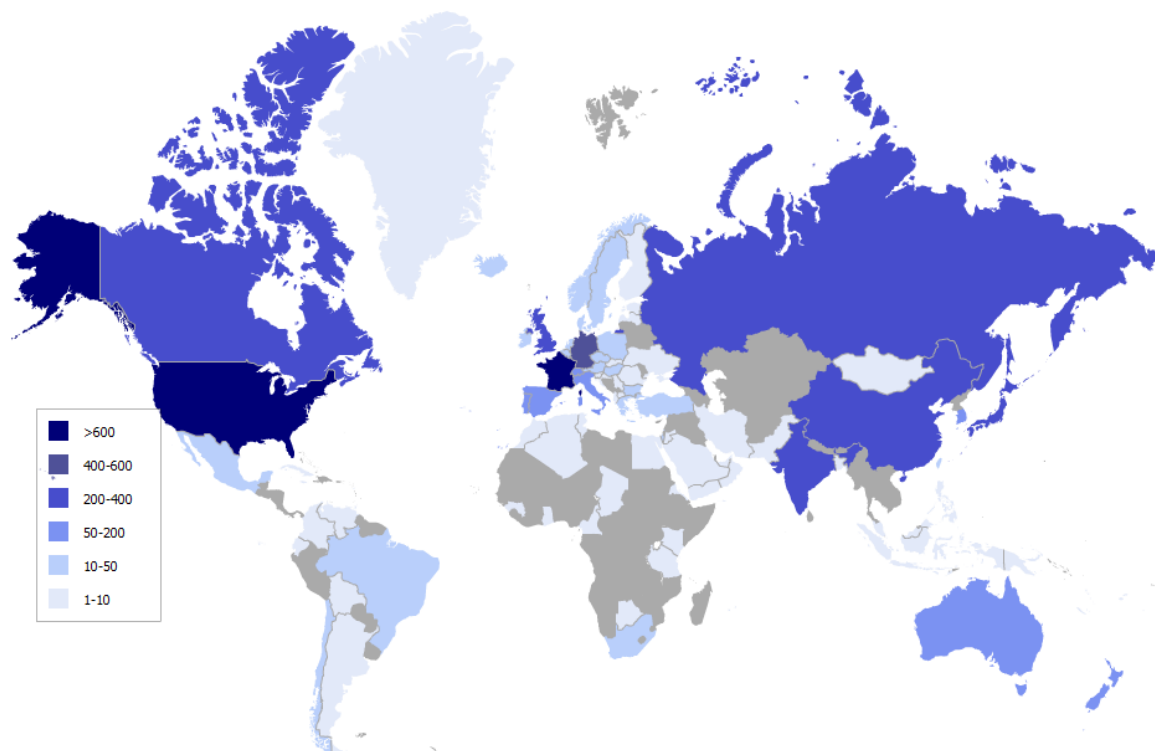


Figure 2-7 Couverture géographique des publications issues du Web of Science.

Evolution temporelle suivant les pays

L'évolution temporelle de la contribution des pays à la publication de références met de nouveau en avant une importante augmentation du nombre de publications à partir de 1991 (Figure 2-8). Cette forte augmentation est corroborée à la multiplication de pays impliqués dans la publication de références bibliographiques : 15 pays jusqu'en 1989 et jusqu'à 30 pays par la suite (Figure 2-8).

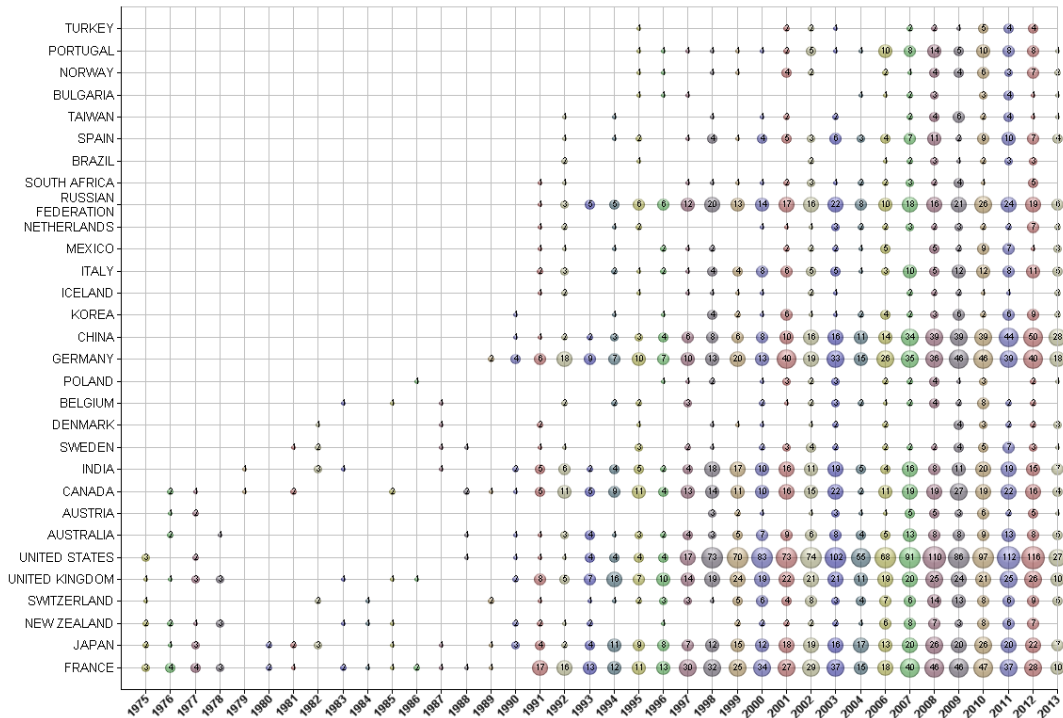


Figure 2-8 Evolution temporelle de la contribution des principaux pays en fonction du nombre de publications issues du Web of Science.

Principales collaborations

La Figure 2-9 présente les principales collaborations entre les organismes publiant les références issues de la recherche Web of Science. Cette figure met particulièrement en avant l'isolement de la Chine (ovale rouge), l'importance des collaborations entre les pays anglo-saxons (Etats-Unis, Royaume-Unis et Nouvelle-Zélande – ovales vert, gris et violet), mais également entre la France (ovale bleu) et les Etats-Unis et la France et le Royaume-Unis.

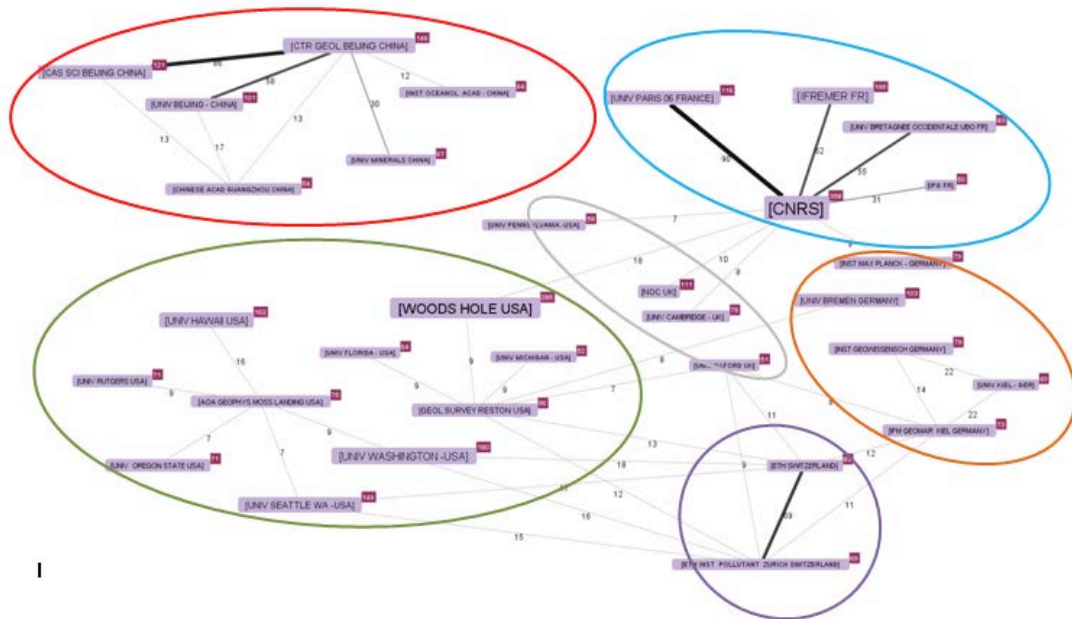


Figure 2-9 Principales collaborations mondiales selon les publications issues du Web of Science. Rouge : Chine, bleu : France, vert : Etats-Unis, gris : Royaume-Uni, orange : Allemagne, violet : Nouvelle-Zélande

2.2.4. Base de référence Ifremer

2.2.4.1. *Présentation*

Le laboratoire de Géochimie et Métallogénie de l'UR Géosciences Marines du centre Ifremer de Brest possède une importante base de références bibliographiques concernant principalement les ressources en nodules polymétalliques. Cette base de référence est le fruit d'une recherche de plus de 30 années par l'équipe de Géosciences Marines de l'Ifremer et plus particulièrement par Philippe Saget sur les nodules polymétalliques, et les encroûtements. Cette recherche bibliographique s'est concentrée sur les articles scientifiques et la littérature grise. La base de référence du laboratoire Géochimie et Métallogénie de l'unité de recherche Géosciences Marines du centre Ifremer de Brest contient 9 243 notices, classées sous le logiciel Endnote®.

Depuis les années 1972, une équipe de géologie « appliquée » d'une vingtaine de personnes a été recrutée au CNEXO pour participer à l'exploration des nodules polymétalliques dans le Pacifique. Afin de centrer la prospection de l'institut sur le terrain (Pacifique Sud puis Pacifique Nord), des recherches bibliographiques ont débutées. Tout en gardant un œil sur la bibliographie dite « économique ou industrielle », les articles scientifiques internationaux dont des guides de prospection ont été recherchés (guides mentionnant la relation entre la bathymétrie et la géochimie, par exemple). La possibilité d'obtenir un permis minier avec l'AIFM a permis de créer de nombreux contacts avec des collègues d'autres consortia dits « Pionniers » (Japon, Russie, Pologne, Inde, USA...). Le développement à Toulon de GEMONOD a ouvert les portes des sociétés industrielles et, par conséquent, des congrès techniques comme ISOPE, OTC. La recherche bibliographique s'est donc étoffée de références sur les techniques de ramassage, de minéralurgie. Dans les années 2000, au début du contrat de 15 ans entre Ifremer et l'AIFM, des notices sur la biologie et l'écologie ont été insérées.

Ainsi, tous ces contacts ont permis de faire des recherches bibliographiques sur tous les domaines concernant les nodules, de l'aspect scientifique à l'aspect technico-économique. Les nombreux contacts ont également permis de récupérer des documents non publiés comme des thèses, des rapports de campagne, des documents de travail confidentiels (qui n'ont pas été référencés pour cette étude).

Au contraire du Web of Sciences (WoS), les références bibliographiques contenues à la Bibliothèque La Pérouse (BLP) concernent donc pour une bonne part la littérature grise. Des informations importantes disponibles via la BLP ne sont pas accessibles via WoS

L'ensemble des thématiques abordées dans les chapitres 2 et 3 de la présente expertise (connaissances, degré d'évaluation, techniques d'exploration et d'exploitation) sont ainsi couverts pour les nodules et les encroûtements mais pas pour les sulfures hydrothermaux.

2.2.4.2. Résultats et discussion

Parmi les 9 243 notices, sont retrouvées 6 015 notices issues de journaux scientifiques, 1 372 notices issues de conférences, 1 182 notices issues de rapports, 491 notices issues de livres et 152 notices issues de thèses (Figure 2-10).

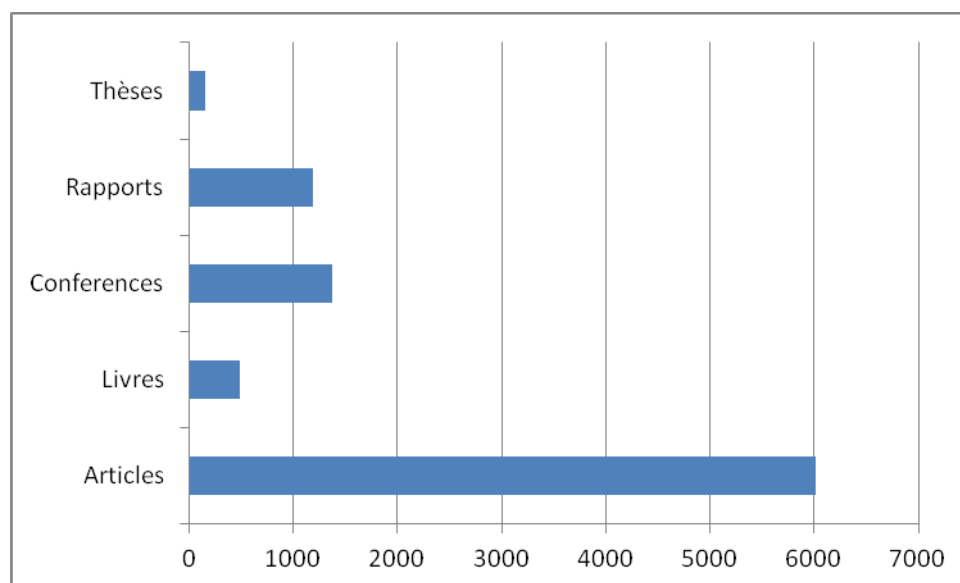


Figure 2-10 Répartition de l'ensemble des notices issues de la base de référence Ifremer (principalement nodules polymétalliques et encroûtements) par type de document.

La base de références Ifremer est ainsi composée à 65 % d'articles scientifiques publiés et de 19,7 % de littérature grise (livres, thèses et rapports). Parmi cette littérature grise (1825 notices), le nombre de rapports est important (64,8 %). Les rapports confidentiels recueillis au fur et à mesure des travaux menés par l'équipe Ifremer représente ainsi une part non négligeable des notices disponibles pour l'expertise en cours.

Les premières publications enregistrées dans la base de référence Ifremer datent de 1873, année de l'expédition du Challenger et de découverte de deux des trois ressources minérales marines visées par la présente expertise : les nodules et les encroûtements (Figure 2-11).

Le nombre de notices reste par la suite très faible - inférieur à 10 - jusqu'en 1957, date à partir de laquelle une augmentation croissante du nombre de publications est observée jusqu'en 1984. Deux pics de publication sont observés, le premier en 1975 (375 notices) et le deuxième en 1984 (475 notices). Ces pics sont associés aux périodes où l'intérêt des pays dits « pionniers » visant l'exploitation des nodules était fort. C'est à ces périodes qu'ont eu lieu les premières expéditions scientifiques sur la zone Clarion-Clipperton ainsi que les premières études d'évaluation des ressources minérales marines profondes sur cette zone. Suite au pic de 1975, le nombre de notices décroît progressivement jusqu'aux années 1990, date à partir de laquelle il décroît très progressivement (une centaine de notices répertoriées par an).

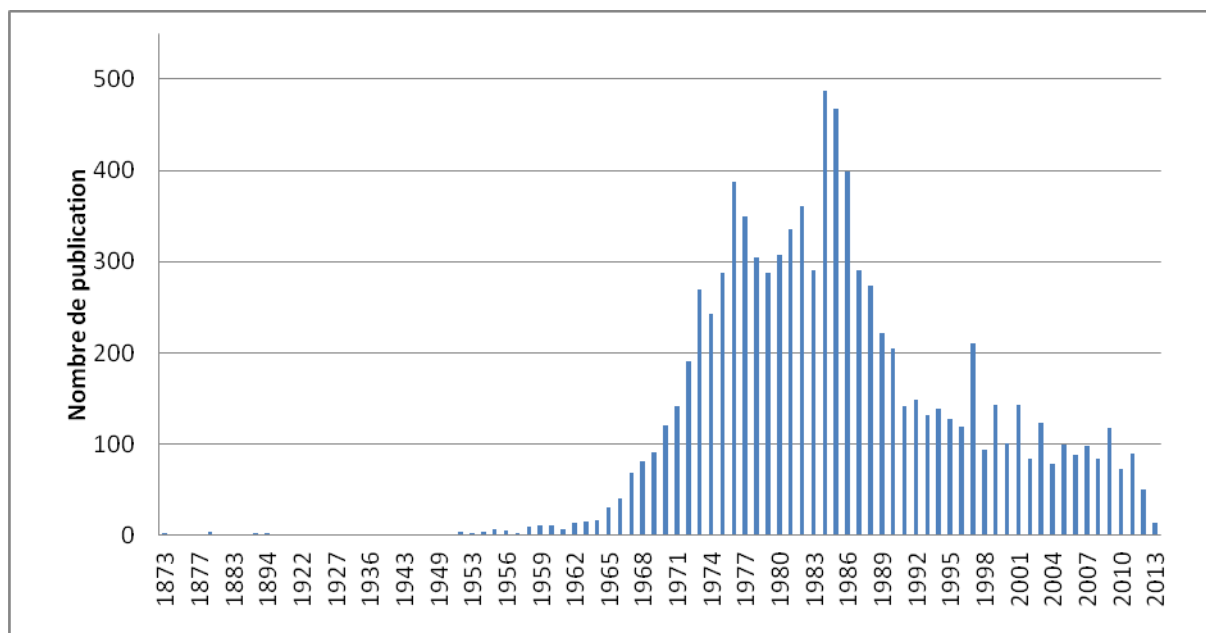


Figure 2-11 Evolution temporelle du nombre de notices recensés sur l'ensemble de la base de référence Ifremer concernant principalement les nodules et encroûtements.

2.2.5. Conclusion

La base de références de l'Ifremer contient 9 243 références directement associées aux thématiques des chapitres 2 et 3 de la présente expertise. Cette base est constituée au 2/3 d'articles publiés et au tiers à de la littérature grise. La littérature grise étant essentiellement composée de rapports confidentiels, fruit de collaborations et de recherche de plus de 30 ans. Cette base de données est essentiellement consacrée aux thématiques « nodules » et « encroûtements ». Les premières publications sont apparues en 1873 avec l'expédition du NO *Challenger*, date à laquelle les nodules et les encroûtements ont été découverts. C'est entre 1979 et 1985 que le nombre de publications est le plus important. Cette période correspond à la période d'exploration des pays dits « pionniers » sur la zone à nodules entre les fractures de Clarion et de Clipperton dans le Pacifique Nord équatorial.

5614 références sont issues du Web Of Science et sont principalement consacrées à l'étude des sources hydrothermales (2429 références soit 43 % des références). C'est à partir de 1990 qu'est observée une nette augmentation du nombre de publications. Cette date correspond à la multiplication des acteurs associés à la recherche dans le milieu « hydrothermal » (passage de 15 à 30 pays) ainsi qu'au développement de programmes de recherches dédiés à cet environnement. Les principaux acteurs sont les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Chine, le Japon, le Canada, la Russie, l'Inde et l'Australie. Des collaborations nationales et internationales sont mises en évidence, particulièrement entre les Etats-Unis, le Royaume-Uni, la Nouvelle-Zélande et la France. La Chine semble par contre être très isolée dans le cadre de ses publications.

Au sein du chapitre 2, nous avons réalisé un choix parmi l'ensemble des références issues des deux corpus bibliographiques. Il était en effet impossible de citer plus de 10 000 références pour ce seul chapitre, même si un certain nombre de publications concernent plus précisément les chapitres 3 et 4. Le choix des références s'est effectué selon l'impact scientifique des publications; les documents de synthèse ont également été privilégiés. Certains contributeurs ont, de plus, utilisé leur propre base de références bibliographiques personnelles pour abonder leurs textes.

Il est également important de noter que l'exhaustivité relative aux références citées dans ces chapitres ne peut pas être atteinte. Il est en effet impossible de rassembler toutes les publications existantes sur le sujet, notamment parce qu'un certain nombre de revues ne sont tout simplement pas disponibles via les moteurs de recherches actuels ou ne sont pas soumis à une évaluation par les pairs (*peer review*).

2.3. Cadre réglementaire

L'accès aux ressources minérales marines aux fins d'exploration et d'exploitation n'est pas libre. Ces activités ont un régime dépendant de leur localisation: la zone économique exclusive (ZEE) et le plateau continental ou les grands fonds marins au-delà des limites de juridiction des Etats, appelée la Zone (Nations-Unies, 1983). Des conventions et des règlements internationaux et nationaux viennent petit à petit encadrer l'accès aux ressources minérales marines profondes mais la méconnaissance de ces écosystèmes induit un faible nombre de législations spécifiquement applicables à ces ressources minérales sous-marines (Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations, 2013b).

La partie suivante synthétise, dans la mesure du possible, la réglementation en vigueur applicable à l'exploration et à l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Elle ne prétend en aucun cas à l'exhaustivité.

Ce texte ne relève pas *stricto sensu* d'un état de l'art scientifique, attendu dans le cadre d'une expertise scientifique collective. Toutefois, son intégration au rapport d'expertise a paru utile en vue de proposer un état des lieux complet du sujet abordé.

Ces éléments ont été rédigés par les experts mobilisés pour l'expertise, en relation avec les services compétents du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et du Ministère des Outre-Mer.

2.3.1. Législation internationale (la Zone)

2.3.1.1. *Convention des Nations Unies sur le droit de la Mer (CNUDM - 1982)*

Contexte

La Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM), également appelée « Convention de Montego Bay » ou « United Nations Convention on the Law Of the Sea » (UNCLOS) est un traité international fondamental. Il reconnaît :

- aux Etats côtiers le droit d'exercer des droits souverains sur la ZEE et le plateau continental
- la non-appropriation nationale des ressources du fond des mers au-delà des juridictions nationales et l'affirmation qu'elles sont réservées à l'humanité. Les fonds marins et

leur sous-sol, au-delà des limites de la juridiction nationale, deviennent patrimoine commun de l'humanité (Tableau 2-2).

La CNUDM comprend 320 articles répartis en 17 parties et 9 annexes. Elle a été adoptée et signée en 1982 à Montego Bay (Jamaïque) après plus de 10 ans de négociations et est entrée en vigueur le 16 novembre 1994. Elle a été complétée par deux accords :

- l'Accord relatif à l'application de la Partie XI de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982 (New York, 28 juillet 1994),
- l'Accord aux fins de l'application des dispositions de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982, relatives à la conservation et à la gestion des stocks de poissons dont les déplacements s'effectuent tant à l'intérieur qu'au-delà de zones économiques exclusives (stocks chevauchants) et des stocks de poissons grands migrateurs (New York, 4 août 1995).

En janvier 2013, la Convention comptait 165 Parties dont 164 Etats et l'Union Européenne (ratification de la France en 1996 et adhésion formelle de l'Union Européenne en 1998). Les Etats-Unis n'ont ni signé ni ratifié la convention, tout comme le Venezuela, le Pérou, la Turquie, la Syrie et l'Israël (juin 2013).

Tableau 2-2 Historique de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (source AIFM).

Dates	Evènements liés à la Convention des Nations unies sur le droit de la mer
Depuis le XVII ^{ème} siècle et jusque dans les années 50	Principe de liberté des mers : limite les droits et la juridiction d'un État sur les océans à une zone maritime étroite le long de son littoral ; le reste des mers et océans n'appartient à personne et sont ouverts à tous. En 1945, Déclaration TRUMAN sur les droits de l'Etat côtier sur les ressources de son PC
1958	Première Conférence des Nations Unies sur le droit de la mer, organisée par l'ONU à Genève. Adoption de quatre conventions le 29 avril 1958: 1- la mer territoriale et la zone contiguë ; 2- la haute mer ; 3- le plateau continental ; 4- la pêche et la conservation des ressources biologiques de la haute mer.
1960 1967 (novembre)	Deuxième Conférence des Nations Unies sur le droit de la mer. Discours d'Arvid Pardo ambassadeur de Malte aux NU pour que les fonds marins soient déclarés PCH. Mise en place d'un Comité spécial des fonds marins par l'AGNU
1970	L'Assemblée générale des Nations Unies déclare à l'unanimité que les fonds marins et leur sous-sol, au-delà des limites de la juridiction nationale, sont le patrimoine commun de l'humanité. Résolution 2749 du 17 décembre 1970
1973 1976	Ouverture de la troisième Conférence des Nations Unies sur le droit de la mer. L'assemblée générale des Nations Unies confirme le principe de la souveraineté permanente d'un Etat sur ses ressources naturelles. Adoption par la Conférence du principe de la ZEE
1982 1982-1993	Adoption et ouverture de la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM) ou United Nations Convention on the Law Of the Sea (UNCLOS) à Montego Bay (Jamaïque). Mise en place de la Commission Préparatoire à l'installation de l'AIFM .Gestion intérimaire des fonds marins et de leurs ressources
16 nov. 1994	Entrée en vigueur de la Convention sur le droit de la mer.
1995	Entrée en activité de l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM ou ISA pour International Seabed Authority).
11 avril 1996	Ratification par la France de la Convention sur le droit de la mer.

1996	Entrée en activité du Tribunal international du droit de la mer.
1997	Première session de la Commission des limites du plateau continental.
1 avril 1998	Adhésion de l'UE de l'Union Européenne à la Convention sur le droit de la mer.

Champs d'application et application aux ressources minérales marines profondes

Le champ d'application de la CNUDM est vaste. Elle vise à traiter l'ensemble des problèmes concernant le droit de la mer et à mettre en place « *un ordre économique international juste et équitable dans lequel il serait tenu compte des intérêts et besoins de l'humanité tout entière et, en particulier, des intérêts et besoins spécifiques des pays en développement, qu'ils soient côtiers ou sans littoral* » (Préambule de la CNUDM).

La CNUDM :

- substitue à l'approche sectorielle retenue à Genève en 1958 une approche unique, globale qui rassemble en un seul traité toutes les questions du droit de la mer au point que la CNUDM est à la fois une œuvre de codification du droit antérieur et un développement du droit de la mer
- introduit un ordre juridique de la côte vers le large, de la surface vers les profondeurs au point qu'il n'est pas d'espace de non droit en mer,
- introduit une clarification des compétences sur des espaces maritimes
- précise les droits d'accès des Etats sans littoral à la mer et depuis la mer et la liberté de transit ; la protection et la préservation du milieu marin ; la recherche scientifique marine.

L'article 133 (a) de la convention définit le terme « *ressources* » par « *toutes les ressources minérales solides, liquides ou gazeuses in situ qui, dans la Zone, se trouvent sur les fonds marins ou dans leur sous-sol, y compris les nodules polymétalliques* ».

Le cadre juridique pour les activités portant sur les ressources minérales dans la Zone est fourni par la Partie XI de la CNUDM consacrée à « *la Zone* », ainsi que par l'annexe III « *Disposition de base régissant la prospection, l'exploration et l'exploitation* ». L'accord relatif à l'application de la Partie XI qui complète la CNUDM, vise à faciliter l'application cette partie (XI). L'Accord de 1994 est une véritable réécriture de la Partie XI puisqu'il en suspend de nombreux articles. Il faut mentionner aussi l'article 145 de la CNUDM qui traite du rôle de l'AIFM dans la protection de la faune et la flore, dans la lutte contre la pollution du milieu marin.

La partie XII de la CNUDM est consacrée à la « *protection et à la préservation du milieu marin* ». Elle mentionne que les Etats ont l'obligation de protéger et de préserver le milieu marin (Article 192, CNUDM) tout en réaffirmant le droit souverain des Etats d'exploiter leurs ressources naturelles (Article 193, CNUDM). Au-delà des juridictions nationales, les responsabilités de protection et de préservation de l'environnement sont donc partagées par tous les Etats partis à la convention.

Organismes internationaux créés

Trois nouveaux organismes internationaux ont été créés par la Convention.

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) ou International Seabed Authority (ISA) :

- basée à Kingston (Jamaïque), l'AIFM a été mise en place en 1994, au moment de l'entrée en vigueur de la Convention. Elle est entrée pleinement en activité en tant qu'organisation internationale autonome en juin 1996 ;
- l'AIFM est une organisation par l'intermédiaire de laquelle les Etats parties de la CNUDM organisent et contrôlent les activités menées dans la Zone, notamment aux fins de l'administration des ressources de celle-ci. Tous les Etats parties à la CNUDM sont membres de l'Autorité. Sa structure mérite d'être relevée : un organe restreint, le Conseil, et un organe plénier, l'Assemblée avec un rôle particulier dévolu à un organe subsidiaire du Conseil, la Commission Juridique et Technique (CJT)
- l'AIFM doit également prendre des mesures permettant de prévenir, réduire et contrôler les impacts sur l'environnement. Elle a ainsi adopté des Recommandations à cet effet et mis en place des zones préservées dans la région de Clarion-Clipperton en liaison avec l'exploration des nodules polymétalliques. (ISBA/17/LTC/7)

Le tribunal international du droit de la mer (TIDM)

- basé à Hambourg (Allemagne), le tribunal est entré en activité en octobre 1996, deux ans après l'entrée en vigueur de la Convention ;
- il est chargé de régler les différends portant sur l'interprétation de la CNUDM ou sur son application.
- La CNUDM a créé, au sein du Tribunal, une Chambre spéciale pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins

La commission des limites du plateau continental (CLPC)

- la Commission a tenu sa première session en juin 1997, trois ans après l'entrée en vigueur de la Convention ;
- elle est chargée de favoriser l'application de la Convention en ce qui concerne la fixation de la limite extérieure du plateau continental d'un Etat au-delà du rebord externe de la marge continentale et dans la limite des 350 milles nautiques (également au-delà des 200 milles marins). Elle adresse des recommandations aux Etats côtiers sur la fixation de ces limites.

Délimitation des espaces maritimes et juridictions associées

La CNUDM a défini les limites des mers et océans. Y sont retrouvées :

- les zones de souveraineté de l'Etat côtier, qui sont, en partant de la côte (Tableau 2-3 et Figure 2-12) :
 - les eaux intérieures,
 - la mer territoriale,
- la zone contiguë qui a un objectif précis de lutte contre certains trafics
- la zone économique exclusive (ZEE) qui est un espace fonctionnel qui contient l'énoncé de droits souverains à finalité économique. L'Etat côtier y exerce « *des droits souverains aux fins d'exploration et d'exploitation, de conservation et de gestion des ressources naturelles, biologiques ou non biologiques, des eaux surjacentes aux fonds marins, des fonds marins [eux-mêmes] et de leur sous-sol [...]* » (Articles 55 à 57, CNUDM). Si

l'Etat côtier n'explore pas le plateau ou n'en exploite pas les ressources naturelles, nul ne peut entreprendre de telles activités sans son consentement (Article 77, CNUDM).

Chaque pays est souverain dans sa mer territoriale (12 milles marins à partir de la ligne de base). La France y dispose par exemple du monopole de pêche (sous réserve de l'application de la politique de l'UE en matière de pêche) et les navires étrangers d'un droit de passage inoffensif « continu et rapide ». Plusieurs réglementations nationales y sont appliquées.

La CNUDM s'applique dès la mer territoriale. La loi n°76-655 du 16 juillet 1976 crée la zone économique et à la zone de protection écologique au large des côtes du territoire de la République¹. La France exerce sur sa ZEE des droits souverains en ce qui concerne l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles, biologiques ou non biologiques, du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux surjacentes (Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations, 2013b).

- au-delà des ZEE, les espaces maritimes internationaux.
 - La haute mer commence au-delà de la limite extérieure de la ZEE et représente 64 % de la surface des océans. Le principe de la liberté y prévaut : liberté de navigation, de survol, de la pêche, de la recherche scientifique, de poser des câbles et des pipe-lines, de construire des îles artificielles. L'ordre juridique qui s'y applique est celui des autorités de l'État dont le navire bat le pavillon. C'est donc une compétence personnelle, fondée sur la nationalité du navire. Les États côtiers disposent seulement d'un droit de poursuite en haute mer, lorsque la poursuite a commencé dans une zone relevant de la juridiction de l'État poursuivant.
 - La zone internationale des fonds marins (appelée la « Zone ») est constituée par les fonds marins. Elle commence là où sombrent les plateaux continentaux. La convention de Montego Bay consacre le principe issu de la résolution 2749 (XXV) de l'Assemblée générale : la Zone échappe à toute appropriation ; « Bien commun », elle doit être uniquement utilisée « à des fins exclusivement pacifiques » et exploitée « dans l'intérêt de l'humanité tout entière ». Si l'appropriation nationale des ressources de la Zone est interdite, la convention instaure un régime d'appropriation collective à travers l'Autorité internationale des fonds marins qui agit pour le compte de l'humanité tout entière, mais elle pourrait elle-même tirer un revenu (taxes) de cette exploitation par l'intermédiaire d'un organe spécifique, l'Entreprise (non encore mis en œuvre).

Une partie de l'espace maritime international peut être revendiqué par les états côtiers, en faisant une demande d'extension du plateau continental selon le paragraphe 8 de l'article 76 de la CNUDM : *L'Etat côtier communique des informations sur les limites de son plateau continental, lorsque celui-ci s'étend au-delà de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, à la Commission des limites du plateau continental constituée en vertu de l'annexe II sur la base d'une représentation géographique équitable. La Commission adresse aux Etats côtiers des recommandations sur les questions concernant la fixation des limites extérieures de leur plateau continental. Les limites fixées par un Etat côtier sur la base de ces recommandations sont définitives et de caractère obligatoire.*

¹ Légifrance [en ligne]. Page consultée le 10 juillet 2013.
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000879846&categorieLien=cid>

Tableau 2-3 Définition et délimitation des différentes sections des mers et des océans suite à la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer.

Zones maritimes sous juridiction nationale	
Eaux intérieures	Eaux comprises entre la terre et la ligne de base normale de la mer territoriale comprenant notamment les estuaires, les ports et les baies d'une ouverture inférieure à 24 milles.
Mer territoriale Loi 71-1060 du 24/12/71	<ul style="list-style-type: none"> • La largeur est fixée par l'État côtier et ne dépasse pas 12 milles marins [22,224 kilomètres] à compter des lignes de base. • Pour la France, la largeur de la mer territoriale est fixée, comme celles de la majorité des pays, à 12 milles marins [22,224 kilomètres]. (Direction de l'initiative parlementaire et des délégations, 2013a)
Zone contiguë	La zone contiguë ne peut s'étendre au-delà de 24 milles marins [44,448 kilomètres] des lignes à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale. Elle fait partie de la ZEE.
Zone économique exclusive (ZEE)	<ul style="list-style-type: none"> • La ZEE est « <i>une zone située au-delà de la mer territoriale et adjacente à celle-ci</i> » qui ne s'étend pas au-delà des 200 milles marins [370,4 kilomètres] des lignes de base à partir desquelles est mesurée l'étendue de la mer territoriale (Articles 55 à 57 de la CNUDM). • Pour la France, la ZEE s'étend jusqu'à 188 milles marins [348,176 kilomètres] au-delà de la limite des eaux territoriales (loi française n° 76-655 du 16 juillet 1976 relative à la zone économique et à la zone de protection écologique au large des côtes du territoire de la République). • Plateau continental par la loi 68-1181 du 30/12/1968
Plateau continental	
Extension du plateau continental	<ul style="list-style-type: none"> • Une extension du plateau continental au-delà des 200 milles marins et pouvant aller jusqu'à 350 milles marins voire plus est possible sur la base des recommandations de la Commission des limites du plateau continental. • Un Etat a 10 ans à compter de l'entrée en vigueur de la Convention à son égard pour soumettre une demande d'extension auprès de cette Commission. • Il doit mettre en application les Directives scientifiques et techniques adoptées par la CLPC dans la construction de son dossier
Zone maritime sous juridiction internationale	
La Zone	La Zone est constituée des fonds marins et de leur sous-sol au-delà des limites de la juridiction nationale. Elle dépend des limites extérieures des plateaux continentaux (articles 1, 139 et 153, CNUDM). Elle couvre au moins la moitié des fonds marins de la planète, soit 260 millions de km ² .

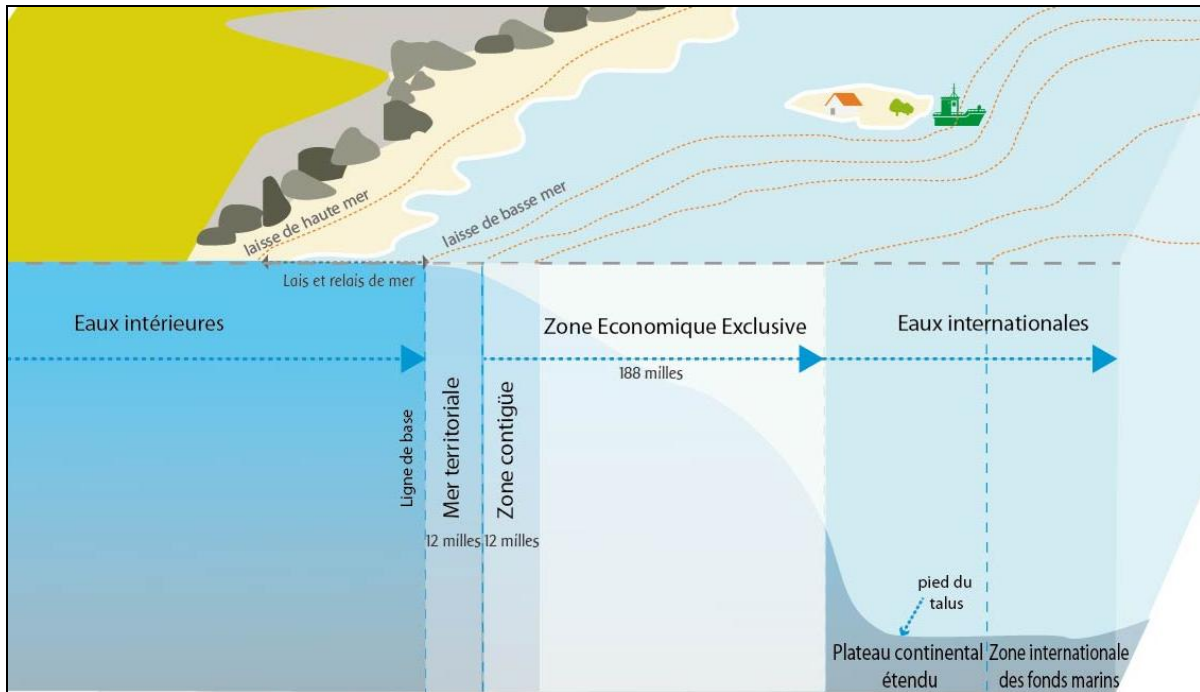


Figure 2-12 Délimitation des zones maritimes selon l'UNCLOS © Le Cedre.

Le plateau continental et son extension

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer donne une définition du plateau continental qui rompt avec celle issue de la précédente convention datant de 1958 assez proche de la conception qu'on les géologues du plateau continentale. La CNUDM précise que le plateau continental d'un Etat côtier comprend : « *les fonds marins et leur sous-sol au-delà de sa mer territoriale, sur toute l'étendue du prolongement naturel du territoire terrestre de cet État jusqu'au rebord externe de la marge continentale ou jusqu'à 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, lorsque le rebord externe de la marge continentale se trouve à une distance inférieure* » (article 76, CNUDM). La CNUDM a aligné la définition du plateau sur celle de la zone économique exclusive indépendamment de tout critère de profondeur ou d'exploitabilité retenu en 1958. L'État côtier y exerce « *des droits souverains [...] aux fins de son exploration et de l'exploitation de ses ressources naturelles* » qui sont « *exclusifs au sens que si l'État côtier n'explore pas le plateau continental ou n'en exploite pas les ressources naturelles, nul ne peut entreprendre de telles activités sans son consentement exprès* (article 77).

Le plateau continental nouveau est celui sur lequel un Etat côtier peut exercer des droits souverains jusqu'à la limite des 200 milles marins, mesurée à partir de ses côtes. L'harmonisation avec la ZEE a imposé le critère de distance. Cette tendance a eu un prolongement innovant, en droit, celui de la possibilité d'extension du plateau continental au-delà des limites des 200 milles marins. Sous certaines conditions, dont notamment le prolongement naturel de la masse terrestre sous la mer, un Etat peut prétendre à cette extension jusqu'à 350 milles marins, voire au-delà dans si le prolongement naturel a des profondeurs inférieures à 2500 m.

L'article 76 de la CNUDM fixe les règles qui permettent de déterminer si l'Etat côtier peut revendiquer un plateau continental et d'en fixer les limites. Ces extensions vers la haute mer concernent les fonds marins et le sous-sol de la mer, à l'exclusion des eaux surjacentes. Dans ces zones, les Etats côtiers disposeront de droits souverains pour l'exploitation des ressources naturelles (ressources minérales et fossiles, espèces vivant sur le fond).

Pour définir la limite extérieure du plateau continental étendu conformément aux dispositions de l'article 76 de la CNUDM, il faut démontrer que sont réunies un certain nombre de conditions géologiques, morphologiques et géophysiques et tracer au moins quatre lignes de référence déterminées comme suit :

Deux lignes de construction :

- par référence aux points fixes extrêmes où l'épaisseur des roches sédimentaires est égale au centième au moins de la distance entre le point considéré et le pied du talus ;
- à 60 milles du pied du talus.

Deux lignes de contrainte :

- à une distance de 350 milles des lignes de base à partir desquelles la largeur de la mer territoriale est mesurée ;
- à une distance de 100 milles de l'isobathe de 2500 mètres.

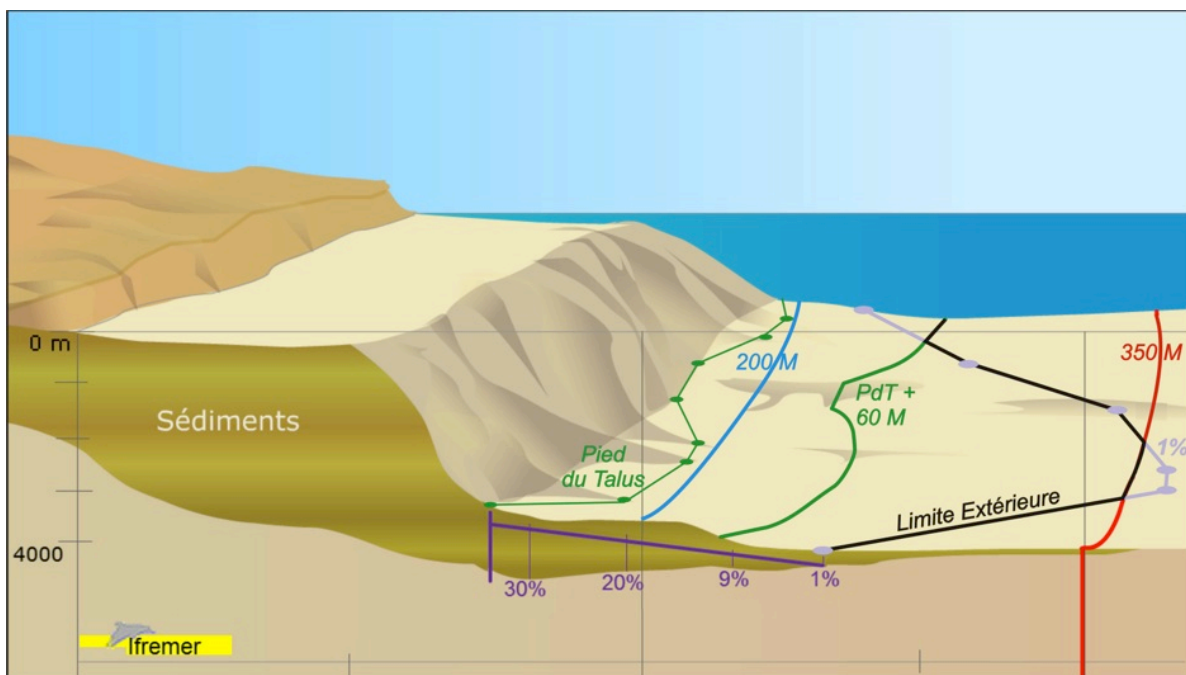


Figure 2-13 Critères de construction de la limite extérieure du plateau continental étendu.

Les extensions potentielles se retrouvent partout où la marge continentale s'étend à plus de 200 milles des lignes de base, par exemple, dans les zones où des fleuves importants ont déchargés des larges quantités de sédiments au cours de l'histoire géologique, mais aussi partout où la croûte continentale se prolonge sous la mer, quelle que soit l'origine géologique de la structure concernée. Toutefois, l'extension ne peut se faire à l'intérieur des 200 milles d'un autre Etat, voisin ou en face.

Aujourd'hui, plus de 65 demandes d'extension ont été déposées auprès de la Commission des limites du plateau continental. Parmi les demandeurs on trouve les principaux Etats maritimes: comme la France, les USA, l'Australie, la Canada, la Nouvelle-Zélande, l'Inde, l'Indonésie, le Chili, l'Argentine, le Brésil. Les conditions d'exploitation des ressources du plateau continental varieront cependant suivant leur localisation :

- Jusqu'à 200 milles, 100 % du produit de l'exploitation revient à l'Etat côtier
- Au-delà de 200 milles, il y a un système de redistribution vers les Etats les plus pauvres selon un mécanisme et des critères inconnus à ce jour ; l'AIFM s'occupe de la

redistribution. Au bout de 12 ans, l'Etat côtier doit verser des royalties à hauteur de 7 % de la valeur de la production annuelle.

Les demandes françaises d'extension du plateau continental

L'espace maritime français est aujourd'hui le deuxième au monde par sa superficie, de l'ordre de 11 millions de km² juste après celui des Etats-Unis. Il comprend des territoires dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique. Les zones d'extension potentielle du plateau continental français sont importantes et très morcelées. Elles concernent quasiment toutes les entités territoriales françaises. Par l'élargissement de son plateau continental, la France pourrait augmenter son domaine maritime (sous-marin) de plus de 1,5 millions de km² c'est-à-dire trois fois la superficie du territoire métropolitain.

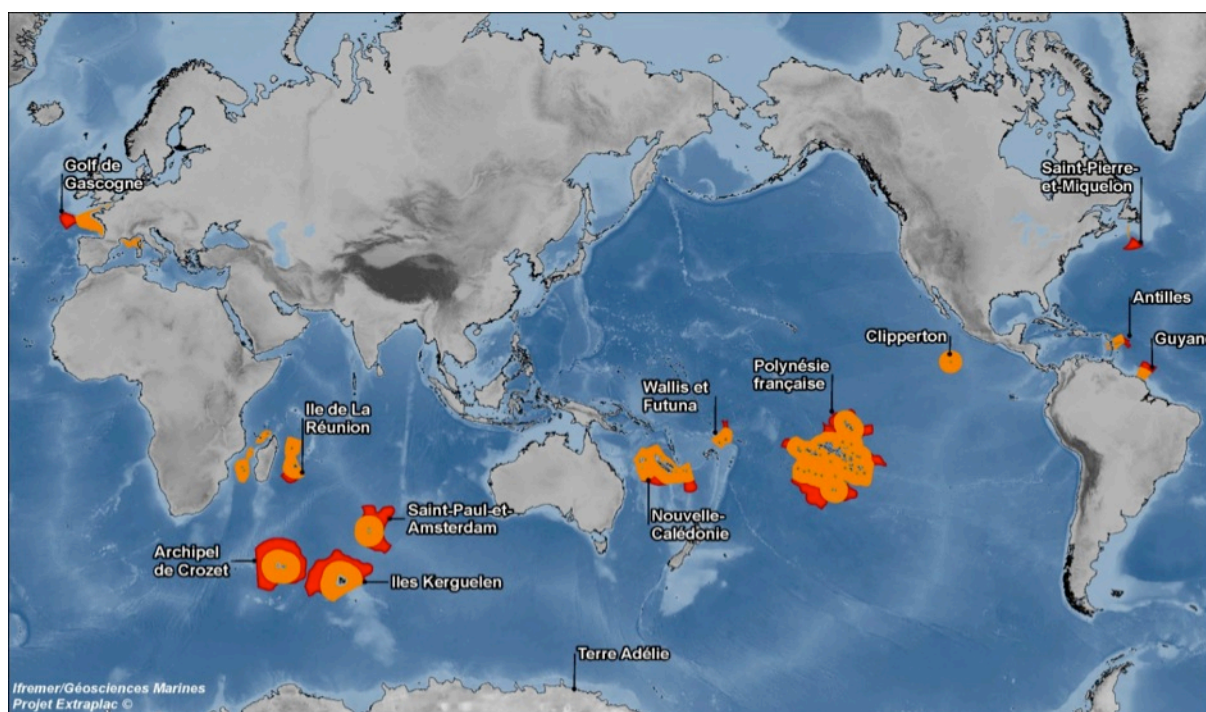


Figure 2-14 La ZEE française (en orange) et les extensions du plateau continental (en rouge). Les extensions sont rapportées selon les demandes déposées auprès de la Commission des limites du plateau continental (en rouge). Les limites reportées sur la carte sont indicatives (Ifremer/Extraplac, 2013).

2.3.1.2. Convention sur la Diversité Biologique (CDB - 1992)

Contexte

La Convention sur la Diversité Biologique (CDB), également appelée « Convention de Rio » (1992) est un traité international fondamental. La CDB représente le point de départ de nombreux règlements nationaux et intègre explicitement les écosystèmes marins dans la définition de la diversité biologique et complète ainsi la CNUDM dans le cadre de sa protection des mers dans les espaces maritimes sous compétence nationale (Van Dover et al., 2012).

Ouverte à la signature le 5 juin 1992 lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (le « Sommet de la Terre » de Rio), la CDB est entrée en vigueur le 29 décembre 1993 (<http://www.cbd.int/history/>). La France l'a signée en 1992

(Nations Unies, 1992). La Conférence des Parties (COP) est l'organe directeur de la convention. Elle se réunit tous les deux ans.

La CDB reconnaît que les Etats exercent leur souveraineté sur les ressources naturelles et que les écosystèmes, les espèces et les gènes doivent être utilisés pour le bénéfice des générations présentes et futures. Les Etats signataires de cette convention s'engagent à la protection de la biodiversité, l'utilisation durable de ses composantes et le partage juste et équitable des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques.

Principe de précaution

La CDB introduit le *principe de précaution* (principe 15 de la CDB) qui mentionne qu'« *en cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement.* Ce principe préconise ainsi l'adoption de mesures de protection avant l'obtention de preuves scientifiques suffisantes démontrant l'existence d'un risque.

Complexe et controversé, ce principe est maintenant reconnu comme un principe général du droit de l'environnement.

Mandat de Jakarta (1995)

La CDB a consacré un programme d'action spécifique à la biodiversité marine et côtière, le *Mandat de Jakarta*. Adopté par la conférence des parties en 1995, il « *encourage la gestion intégrée des zones marines et côtières car ce type de gestion institue le cadre le plus approprié pour s'attaquer au problème de l'incidence des activités humaines sur la diversité biologique marine et côtière et favoriser la conservation et l'utilisation durable de cette diversité* » (article 2, COP 2, Décision II/10).

Aires marines d'importance écologique ou biologique (EBSA - 2008)

Les Aires marines d'importance écologique ou biologique ou EBSA (pour « Ecologically or Biologically Significant Areas ») relèvent d'une décision de la neuvième conférence des parties de la CBD (COP 9, décision IX/20). Cette décision met en avant sept critères scientifiques pour l'identification d'aires marines d'importance écologique ou biologique devant être protégées au-delà de la juridiction nationale :

1. Caractère unique de rareté
2. Importance particulière pour les stades du cycle de vie des espèces
3. Importance pour les espèces et/ou les habitats menacés, en danger ou en déclin
4. Vulnérabilité, fragilité, sensibilité ou récupération lente
5. Productivité biologique
6. Diversité biologique
7. Caractère naturel.

Les milieux hydrothermaux sont cités en exemple, notamment pour le critère d'unicité et de rareté ainsi que pour le critère de productivité biologique.

Tableau 2-4 Orientations scientifiques pour la sélection des aires, afin d'établir un réseau représentatif d'aires marines protégées, y compris dans la haute mer et les habitats des grands fonds marins. (UNEP/CDB/COP/DEC/IX/20, Mentionnées au paragraphe 3 de l'annexe II de la décision VIII/24)

Propriétés et composantes requises pour le réseau	Définition	Facteurs pertinents propres au site (entre autres)
Aires d'importance écologique ou biologique	Les aires d'importance écologique ou biologique sont des aires bien définies sur le plan géographique ou océanique, qui procurent des services importants à une ou plusieurs espèces/populations d'un écosystème ou à l'écosystème dans son ensemble, lorsqu'on les compare aux aires avoisinantes présentant des caractéristiques écologiques semblables, ou qui satisfont autrement aux critères de l'annexe I de la décision IX/20.	<ul style="list-style-type: none"> • Caractère unique ou la rareté • Importance particulière pour les stades biologiques de l'espèce • Importance pour les espèces et/ou les habitats menacés, en danger ou en déclin • Vulnérabilité, fragilité, sensibilité ou récupération lente • Productivité biologique • Diversité biologique • Caractère naturel
Représentativité	Un réseau est représentatif lorsqu'il est constitué d'aires qui représentent les différentes subdivisions biogéographiques des océans du monde et des mers régionales, reflétant raisonnablement l'ensemble des différents écosystèmes, y compris la diversité biotique et des habitats de ces écosystèmes marins	Une gamme complète d'exemples dans un habitat biogéographique, ou la classification d'une communauté; la santé relative des espèces et des communautés; l'intégrité relative des habitats, leur caractère naturel
Connectivité	La connectivité dans la conception d'un réseau favorise les liens permettant ainsi aux aires protégées de profiter d'échanges de larves et/ou d'espèces ainsi que de liens fonctionnels provenant d'autres sites du réseau. Les sites individuels d'un réseau connecté profitent les uns des autres	Courants, tourbillons océaniques, goulots physiques, voies de migration, dispersion des espèces, détritiques, liens fonctionnels. Les sites isolés, tels que les communautés de monts sous-marins isolés, peuvent être aussi inclus.
Caractéristiques écologiques répétées	La répétition de caractéristiques écologiques signifie que ces caractéristiques seront présentes dans plus d'un site d'une région biogéographique donnée. Le mot « caractéristique » signifie « les espèces, habitats et processus écologiques » qui se produisent naturellement dans une aire biogéographique donnée.	Tenir compte des incertitudes, des variantes naturelles et de la possibilité de catastrophes naturelles. Les caractéristiques qui présentent moins de variantes naturelles ou sont définies avec précision exigent un niveau de répétition inférieur aux caractéristiques qui sont naturellement plus variables ou définies de façon très générale.
Sites adéquats et viables	Des sites adéquats et viables signifient que tous les sites d'un réseau doivent avoir une dimension et une protection suffisantes pour assurer la viabilité et l'intégrité écologiques de la caractéristique ou attribut pour laquelle ils ont été choisis.	Le caractère adéquat et la viabilité dépendent de la taille, de la forme, des zones tampons, de la persistance des caractéristiques, des menaces, du milieu environnant (contexte), des contraintes physiques; de l'échelle des caractéristiques/processus, des débordements et du caractère compact.

Tableau 2-5 Quatre premières étapes à prendre en considération dans l'établissement de réseaux représentatifs d'aires marines protégées (UNEP/CDB/COP/DEC/IX/20.)

N°	Étape	Description
1	Identification scientifique d'une première série d'aires d'importance écologique ou biologique	Les critères qui figurent à l'annexe I de la décision IX/20 devraient être utilisés, en tenant compte des meilleures informations scientifiques disponibles et en appliquant une approche de précaution. Cette identification devrait viser à l'établissement d'un premier groupe de sites à la valeur écologique reconnue, étant entendu que d'autres sites pourront s'ajouter au fur et à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles;
2	Établissement/choix d'un système de classification biogéographique, par habitat et/ou communauté.	Ce système devrait refléter l'échelle d'application et adresser les principales caractéristiques écologiques d'une aire donnée. Cette étape devra comprendre la séparation d'au moins deux domaines : pélagique et benthique;
3	En s'appuyant sur les étapes 1 et 2 ci-dessus, utilisation itérative des techniques qualitatives et/ou quantitatives pour identifier les sites à inclure dans un réseau.	Leur sélection en vue d'une gestion améliorée devrait refléter leur importance écologique ou vulnérabilité reconnues, et répondre à l'exigence d'une cohérence écologique, par le biais de la représentativité, de la connectivité et de la répétition
4	Évaluation du caractère adéquat et de la viabilité des sites sélectionnés	Il conviendra de tenir compte de la taille, de la forme, des frontières, des zones tampons et du caractère approprié du régime de gestion des différents sites.

2.3.1.3. *Ecosystèmes marins vulnérables (VMEs - 2006)*

Le 8 décembre 2006, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté la résolution 61/105 qui vise, entre autres mesures, la protection des écosystèmes marins vulnérables (VMEs pour « Vulnerable Marine Ecosystems ») en haute mer. Les écosystèmes identifiés comprennent notamment les sources hydrothermales et les monts sous-marins. Cette résolution vise l'élimination des pratiques de pêche destructrices de ces habitats et mentionne « *l'immense importance et valeur des écosystèmes marins profonds et de la biodiversité qu'ils contiennent* » (résolution 61/105 du 8 décembre 2006 des Nations Unies). Cette résolution fixe à 1000 mètres de profondeur la limite au-delà de laquelle il est interdit d'utiliser des engins de fond.

Cette résolution est mise en application dans la législation française dans le texte E 3676 - COM (2007) 605, adopté en juillet 2008 par le Sénat.

2.3.1.4. *Autres conventions internationales visant la protection du milieu marin*

Un nombre croissant d'accords internationaux concernant la protection du milieu marin, ainsi que l'exploitation, la conservation et la gestion des ressources marines, ont été adoptés dans le cadre de la CNUDM (Tableau 2-6).

La Commission OSPAR (Tableau 2-6) a par exemple lancé, en 2003, une démarche d'identification d'habitats et d'espèces prioritaires, parmi lesquels figurent les monts carbonatés et les sulfures hydrothermaux (Figure 2-15 et Figure 2-16). Les sources hydrothermales font également parties du plan d'aires marines protégées prévu par la commission OSPAR (OSPAR, 2010).

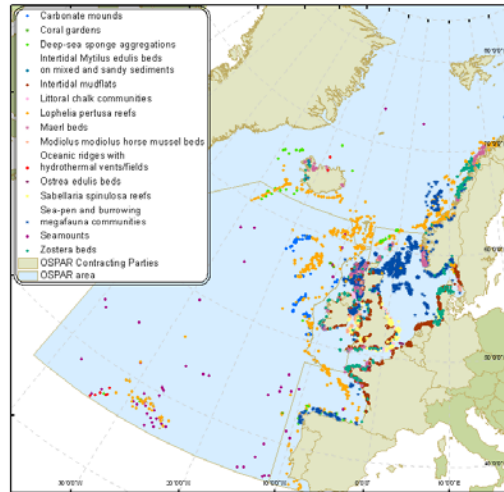


Figure 2-15 Identification des espèces et habitats prioritaires dans la zone OSPAR (<http://jncc.defra.gov.uk/page-1583>).

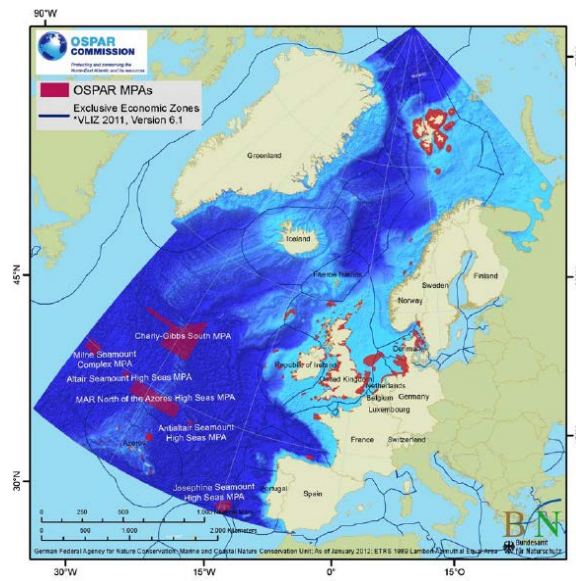


Figure 2-16 Identification des zones marines protégées (OSPAR, 2010).

Tableau 2-6 Conventions internationales liées au domaine maritime.

Nom de la convention	Zone concernée	Date de signature, d'entrée en vigueur ou d'amendement	Objectifs	Site internet
Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM)	Tous les espaces maritimes	Adoptée et signée en 1982	« Constitution pour les océans » vocation globale et portée universelle.	http://www.un.org/french/law/los/unclos/closindx.htm
Convention OSPAR (pour Oslo-Paris) : convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est	Atlantique nord-est	Entrée en vigueur le 25 mars 1998	Guide la coopération internationale pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-Est.	www.ospar.org/
Convention de Nouméa, ou Convention SPREP : convention pour la protection des ressources naturelles et de l'environnement dans la région du Pacifique Sud	Pacifique sud	Entrée en vigueur le 22 août 1990	Vise à prévenir, réduire et contrôler la pollution quelle qu'en soit la source, et d'assurer une gestion respectueuse de l'environnement et une exploitation raisonnée des ressources naturelles.	www.ecolex.org/server2.php/libcat/docs/TRE/Multilateral/Fr/TRE000892.pdf
Convention de Nairobi pour la protection, la gestion et le développement de l'environnement marin et côtier de la région de l'Afrique de l'Est	Afrique de l'Est	Signée le 21 juin 1985	Cadre privilégié pour les actions de coopération internationale relatives à la mer dans cette région.	www.reunion.pref.gouv.fr/livrebleu/IMG/pdf/Gouv_Convention_Nairobi_cle886867_cle8e7e38.pdf
CCAMLR : convention sur la conservation de la faune et la flore marine de l'Antarctique	Océan austral	Entrée en vigueur en 1982	Réponse multilatérale aux préoccupations concernant les dégâts que pourrait occasionner la hausse des captures de krill non réglementées dans l'Océan Austral sur les écosystèmes marins de l'Antarctique, notamment à l'égard des oiseaux de mer, phoques, cétacés et poissons dont l'alimentation repose sur le krill.	www.ccamlr.org/fr/
Convention de Barcelone et ses Protocoles	Méditerranée	1976, amendée en 1995	Vise à réduire la pollution dans la zone de la mer Méditerranée et de protéger et améliorer le milieu marin dans cette zone en vue de	www.unepmap.org/

			contribuer à son développement durable.	
Convention d'Helsinki : convention pour la protection du milieu marin dans la zone de la Mer Baltique	Baltique	Entrée en vigueur en 1980. Remplacée en 1992 par une nouvelle convention, entrée en vigueur le 17 janvier 2000	Vise à prévenir et à maîtriser la pollution des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux (objectifs proches de ceux de la Convention OSPAR)	www.helcom.fi/Convention/
Convention de Carthage : convention pour la protection et la mise en valeur du milieu marin dans la région des Caraïbes	Caraïbes	Signée le 24 mars 1983	Vise à promouvoir la lutte contre la pollution, la protection du milieu, la coopération en cas de risque environnemental majeur, l'évaluation des impacts sur l'environnement et la coopération scientifique et technique.	www.cep.unep.org/pubs/legislation/cartxt_fra.html
Convention de Djeddah : convention régionale pour la conservation de l'environnement de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden	Mer Rouge et Golfe d'Aden	Entrée en vigueur en 1985	Vise la conservation de l'environnement de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden.	www.ecolex.org/ecol ex/ledge/view/RecordDetails;DIDPFDSI?action=i18n.SetLocale&id=TRE-000743&index=treaties&locale=fr_FR

2.3.2. Autorité Internationale des Fonds Marins et la Zone (AIFM)

2.3.2.1. *Présentation*

L'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM ou ISA pour International Seabed Authority) est une organisation internationale autonome qui ne relève pas du système des Nations Unies et dont les activités sont menées pour le compte de l'humanité toute entière. L'AIFM a été créée par la convention des Nations Unies sur le droit de la mer (1982). C'est cette institution qui organise et contrôle les activités de prospection, d'exploration et d'exploitation des ressources minérales au-delà des juridictions nationales (dans la Zone). Tous les Etats-parties à la CNUDM sont membres de l'Autorité. Au 8 janvier 2013, 165 Etats étaient membres de l'AIFM, dont la France depuis sa ratification en 1996 et les Etats de l'Union Européenne.

Les entreprises publiques et privées, ainsi que les consortiums, doivent s'adresser à l'AIFM pour obtenir l'autorisation de mener des activités de prospection, d'exploration et d'exploitation minière du sous-sol marin. (<http://www.isa.org.jm/fr/home>) (Tableau 2-7).

Tableau 2-7 Carte d'identité de l'Autorité Internationale des Fonds Marins – AIFM.
(<http://www.isa.org.jm/fr/home>)

Nom	AIFM
Statut	Organisation internationale autonome
Siège	Kingston, Jamaïque
Date d'établissement	16 novembre 1994 (date d'entrée en vigueur de la CNUDM)
Date d'entrée en opération	Juin 1996 (l'autorité devient une organisation internationale indépendante)
Fonctions	<ul style="list-style-type: none"> • Réglemente l'exploitation des ressources minières des grands fonds marins. • S'assure que l'environnement marin est protégé de tous effets nuisibles potentiels des activités d'exploitation minière, dont l'exploration. • L'Autorité est chargée de promouvoir et d'encourager la recherche scientifique marine dans la zone internationale des fonds marins et de diffuser les résultats des recherches. • Réalisations : <ul style="list-style-type: none"> ○ organisation annuelle de workshops consacrés aux aspects scientifiques et techniques de l'exploitation, aux incidences environnementales engendrées ainsi qu'aux moyens d'harmoniser et de diffuser les données et renseignements recueillis, ○ mise en place d'un dépôt central de données (mis en place en 2000) pour l'harmonisation des données en vue de procéder à des évaluations quantitatives des ressources minérales, ○ mise en place d'une interface GIS interactive (www.mapserver.isa.org.jm/GIS/) <ul style="list-style-type: none"> ○ développement d'une bibliothèque interactive (http://biblio.isa.org.jm/wwwisis/ISBA.04/form.htm).

2.3.2.2. *Organes*

L'assemblée, « organe suprême de l'Autorité », chargée d'arrêter la politique générale de l'Autorité, se compose de toutes les parties de la CNUDM. Elle a plutôt un rôle de ratification des décisions du conseil.

Fonctions :

- élection des membres,
- adoption du budget biennal de l'Autorité,

- approbation des règles, règlements et procédures de l'Autorité,
- examen des rapports présentés par d'autres organes.

Lorsque l'exploitation minière sera commencée :

- partage équitable des avantages financiers et autres bénéfiques économiques tirés des activités menées dans la Zone.

Le conseil, « organe exécutif de l'Autorité », est responsable des politiques à suivre. Il est formé de 36 membres élus pour 4 ans.

Fonctions :

- fixer les clauses de ces contrats,
- approuver les demandes de contrat,
- superviser l'exécution des contrats,
- établir les normes environnementales et émettre des ordres en cas d'urgence, y compris l'ordre de suspendre ou de modifier les opérations afin de prévenir tout dommage susceptible d'être causé au milieu marin.
- Le conseil est doté de deux organes subsidiaires (Article 163, CN UDM) : la commission juridique et technique et la commission de planification économique supprimée et remplacée par un comité des finances chargé du budget (Accord de 1994). L'« Entreprise » est conçue comme un véritable opérateur minier international, concurrent des opérateurs de droit commun. Elle a, sinon disparu, du moins été suspendue lors de la restructuration issue de l'accord de 1994.

La commission juridique et technique, organe du Conseil de l'Autorité, en quelque sorte chargée du contrôle des contractants. Elle « *fait au conseil, à la demande de celui-ci, des recommandations concernant l'exercice des fonctions de l'Autorité* » (Article 163, CNUDM).

Fonctions :

- examen des demandes d'autorisation de plans de travail,
- surveillance des activités d'exploration ou de prospection,
- évaluation de l'incidence de ces activités sur l'environnement,
- conseils à l'Assemblée et au Conseil de l'Autorité.

Elle a également élaboré les textes les plus importants que sont les règlements relatifs à la prospection et à l'exploration des ressources minérales marines profondes.

Cette commission est composée de 15 à 25 membres, élus par le Conseil pour une période de cinq ans. Ce nombre varie selon les sensibilités géopolitiques et inclut toutes les facettes possibles des dossiers qu'elle examine (scientifiques, techniques, juridiques, écologiques). Les experts, dont la candidature est proposée par un Etat, sont dès l'élection réputés être indépendants afin d'éviter les conflits d'intérêt (Jarmache, 2012).

La commission des finances. Elle est chargée de surveiller la gestion financière de l'Autorité (obligations financières des contractants, conseille les autres organes de l'AIFM sur les aspects budgétaires, examine le projet budgétaire de l'AIFM). Elle comprend 15 membres élus par l'Assemblée pour une période de cinq ans.

Le secrétariat. Il comprend quatre services : le Bureau du Secrétaire général, le Bureau de la surveillance des ressources et de l'environnement, le Bureau des affaires juridiques et le Bureau de l'administration et de la gestion.

Fonctions :

- évaluer des ressources situées dans les secteurs réservés à l'Autorité,

- gérer une base de données spécialisée (POLYDAT) qui contient des données et informations sur les ressources de la zone internationale des fonds marins,
- suivre l'évolution des connaissances scientifiques sur le milieu marin profond dans le cadre de l'enrichissement continu du dépôt de données central.

2.3.2.3. Les Règlements

L'AIFM a mis en place une série de textes réglementaires improprement qualifiés de Code minier. Ce code contient « *un ensemble détaillé de règles, réglementations et procédures élaborées par l'Autorité internationale des fonds marins pour réglementer la prospection, l'exploration et l'exploitation des minéraux marins dans la Zone internationale des fonds marins (qui recouvre les fonds marins et leur sous-sol au-delà des limites de la juridiction nationale)* » (www.isa.org.jm/fr/mcode).

Le Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques fut le premier règlement émis par l'AIFM (2000). Le second fut celui relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques (2010). Le Règlement relatif à la prospection et à l'exploration encroûtements cobaltifères de ferromanganèse dans la Zone (ISBA/18/A/11) a été adopté par le Conseil puis validé par l'Assemblée lors de la 18^{ième} session de l'AIFM, tenue en 2012 (<http://www.isa.org.jm/files/documents/FR/18Sess/Assembly/ISBA-18A-11.pdf>).

Il est désormais entré en vigueur puisque c'est sur la base de ce dernier règlement que la demande japonaise sur les encroûtements a pu être approuvée en juillet 2013.

2.3.2.4. Procédures

Il existe trois grandes phases en vue de l'exploitation des ressources minérales profondes : la prospection, l'exploration et l'exploitation (Tableau 2-8). Alors que la prospection peut s'opérer librement, l'exploration et l'exploitation ne peuvent s'effectuer que lorsque le prospecteur s'est engagé à respecter la convention et que son plan de travail a été approuvé par l'Autorité (articles 2 et 3 de l'Annexe III de la CNUDM).

Tableau 2-8 Les différentes phases relatives à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques, sulfures hydrothermaux et encroûtements cobaltifères (juin 2013).

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
	Prospection	Exploration	Exploitation
Droits	S'opère librement. La prospection débute suite à l'envoi et l'examen d'une notification de prospection par l'Autorité.	Ne s'opère pas librement. L'exploration ne débute que lorsqu'un plan de travail a été approuvé par l'Autorité et qu'un contrat ait été émis.	Aucune réglementation émise actuellement (juin 2013).
	Les prospecteurs n'ont aucun droit exclusif sur les ressources de la zone prospectée. Des quantités raisonnables de minéraux peuvent toutefois être prélevées pour des fins expérimentales et non commerciales.	Les contractants ont les droits exclusifs sur les ressources de la zone prospectée (suite à l'approbation du plan de travail).	
	Plusieurs prospecteurs peuvent prospecter la zone visée simultanément.	Un seul contractant peut explorer la zone visée.	

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Demande auprès de l'AIFM	Envoi d'une « notification de prospection » www.isa.org.jm/files/documents/FR/Regs/Code-Annex1.pdf	Envoi d'un « plan de travail » www.isa.org.jm/files/documents/FR/Regs/MiningCode.pdf, annexe 2	
	La notification peut être présentée par : - Dans le cas d'un Etat, par l'autorité désignée à cet effet par ledit Etat ; - Dans le cas d'une entité, par les représentants désignés de celle-ci ; - Dans le cas de l'Entreprise, par l'autorité compétente de celle-ci.	Sous réserve de la Convention, le plan de travail peut être présenté par : • <i>l'Entreprise*</i> , en son nom propre, ou dans le cadre d'un accord de coentreprise ; • <i>les Etats Parties, les entreprises d'Etat ou les personnes physiques ou morales possédant la nationalité d'Etats Parties ou effectivement contrôlées par eux ou leurs ressortissants, lorsqu'elles sont patronnées par ces Etats, ou tout groupe des catégories précitées qui satisfait aux conditions stipulées sans présent Règlement.</i>	
	Examen de la notification de prospection sous 45 jours par le Secrétaire général. Le Secrétaire général informe de temps en temps tous les membres de l'Autorité de l'identité des prospecteurs et des zones prospectées.	Envoi du plan au secrétaire général qui le transmettra à la commission pour examen. C'est le conseil, sur les recommandations de la commission, qui approuvera ou non le plan de travail émis.	
Durée	Non limitée dans le temps.	15 ans, exécutés par tranches de 5 ans.	
Terme	Mis lors de l'approbation d'un plan de travail dans la zone de prospection.	Mis lors de : • l'approbation d'un plan de travail en vue de l'exploitation ; • le renoncement des droits par le contractant ; • la demande de prorogation du plan de travail en vue de l'exploration du contractant**.	
Droits afférents	Aucun	Des droits en dollars des Etats Unis ou l'équivalent en monnaie librement convertible doivent être payés à l'Autorité. • Nodules : 250 000 • Sulfures et encroûtements : 500 000 versés en une fois ou 50 000 dollars qui seront à compléter, lors de l'exploitation par un droit annuel qui prendrait en compte une forme d'intéressement offert à l'Entreprise, qui aurait alors la qualité de co-contractant.	
Secteur attribué	Maximum de 150 000 km ²	La superficie des secteurs attribués dépend des ressources visées. Sous certaine condition, une partie du secteur pourra être rendue à l'Autorité	
Délivrables (voir 2.3.2.5)	Rapport annuel	• Rapport annuel ; • Rapport quinquennal ; • Rapport de fin de contrat.	

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Formation à donner	Pas d'obligation de formation	Le contrat d'exploration comprend un programme de formation pratique du personnel de l'AIFM et des Etats en développement, développé par le contractant, l'AIFM et le ou les Etats patronnant la demande. Les formations sont axées sur la formation à l'exploration.	

* Tout ce qui concerne l'Entreprise est hypothétique et doit être relativisé car l'Entreprise est gelée dans son existence même. Les conditions de son réveil sont bien encadrées dans l'accord de 1994 et cela a fait l'objet d'un débat lors de la 19ème session en 2013.

** Ces prorogations ne sont accordées que pour des périodes ne dépassant pas 5 ans chacune et seulement si *le Contractant s'est efforcé de bonne foi de se conformer aux stipulations du présent contrat mais n'a pas pu, pour des raisons indépendantes de sa volonté, mener à bien les travaux préparatoires nécessaires pour passer à la phase d'exploitation ou si les circonstances économiques du moment ne justifient pas le passage à la phase d'exploitation* (annexe 4, article 3).

2.3.2.5. Livrables

Durant la phase de prospection, un rapport annuel doit être présenté tous les ans.

Le rapport annuel :

- à envoyer dans les 90 jours qui suivent la fin de l'année civile au Secrétaire général qui le présentera à la Commission juridique et technique (31 mars).
- présentation de l'avancement de la prospection et des résultats ainsi que les dépenses d'exploration directes et effectives effectuées durant la prospection.

Durant la phase d'exploration, un rapport annuel et trois rapports de fin de période quinquennale doivent être présentés :

L'examen quinquennal du programme d'activité relatif à l'exploration :

Trois mois avant la date anniversaire de la période de 5 ans du contrat d'exploration, un point doit être réalisé avec le Secrétaire général de l'AIFM. Ce point doit comprendre un rapport sur les activités menées et le niveau des dépenses effectuées afin de s'assurer du sérieux de l'opérateur, du respect de son plan de travail tel qu'il a été déposé au moment de la communication de sa demande de permis. À la suite de cet examen, le contractant indique son programme d'activités pour les cinq années suivantes.

Le rapport de fin de contrat :

Lors de la fin de contrat, les données suivantes doivent être fournies à l'AIFM :

- 1 Toutes les données géologiques, environnementales, géochimiques, géophysiques.
- 2 L'estimation économique des gisements (teneurs, réserves,...) lorsque ces gisements ont été identifiés et prévisions sur les conditions d'extraction.
- 3 Les rapports géologiques, techniques, financiers et économiques.
- 4 Le matériel utilisé pour l'exploration et pour les études d'exploitation (ramassage et minéralurgie) à l'exclusion des spécificités techniques de ce matériel.

5 La quantité d'échantillons prélevés.

6 La localisation et les méthodes de préservation des échantillons.

7 Ainsi que le résultat des études prévues dans le cadre du « programme d'activité » annexé au contrat d'exploration.

2.3.2.6. Secteur d'exploration attribué au contractant

Suite à l'approbation de son plan de travail, le contractant se voit attribuer un secteur. Ce secteur sera traité de manière différente selon qu'il s'agisse de ressources liées aux nodules ou aux sulfures et encroûtements cobaltifères (Tableau 2-9). Le règlement sur les nodules indique uniquement la possibilité pour le demandeur de la remise d'un secteur réservé tandis que les règlements sulfures et encroûtements offrent la possibilité d'une participation au capital d'une entreprise conjointe en alternative à la remise d'un secteur réservé.

Pour les sulfures et les encroûtements, le contractant ne peut explorer que les blocs identifiés dans son plan de travail. Un autre contractant peut faire une demande d'exploration sur des blocs appartenant au même plan de travail, en identifiant des blocs différents (Figure 2-17).

Tableau 2-9 Superficie du secteur attribué pour l'exploration au contractant suite à l'approbation d'un plan de travail.

		Nodules	Sulfures	Encroûtements
Terme utilisé		Superficie	Bloc / Grappe / Superficie	
Définitions	Plan de travail	-	300 000 km ² maxi (dont 1000 km maxi en hauteur) Contient 5 grappes au minimum	302 500 km ² maxi (550 km x 550 km maximum) Contient 5 grappes au minimum
	Superficie maximale d'1 bloc (km ²)	-	100 (10 km x 10 km)	20 (maillage carrée ou rectangulaire)
	1 grappe	-	au moins 5 blocs contigus	
	Blocs contigus	-	2 blocs qui se touchent en un point quelconque	
	Cas où le demandeur restitue un secteur à l'AIFM (secteur réservé)	Nombre de blocs couverts par la demande	-	200 maximum
	Superficie totale de la zone couverte par la demande (km ²)	150 000	2 x 300 000 km ² maximum	2 x 302 500 km ² maximum
	Superficie maximale attribuée au contractant (km ²)	-	300 000	302 500
	Superficie maximale restituée à l'Autorité (km ²)	75 000	300 000	302 500
Cas où le demandeur participe au capital d'une entreprise conjointe	Nombre de blocs couverts par la demande	-	100 maximum	150 maximum
	Superficie maximale du secteur attribué au demandeur (km ²)	-	300 000	302 500

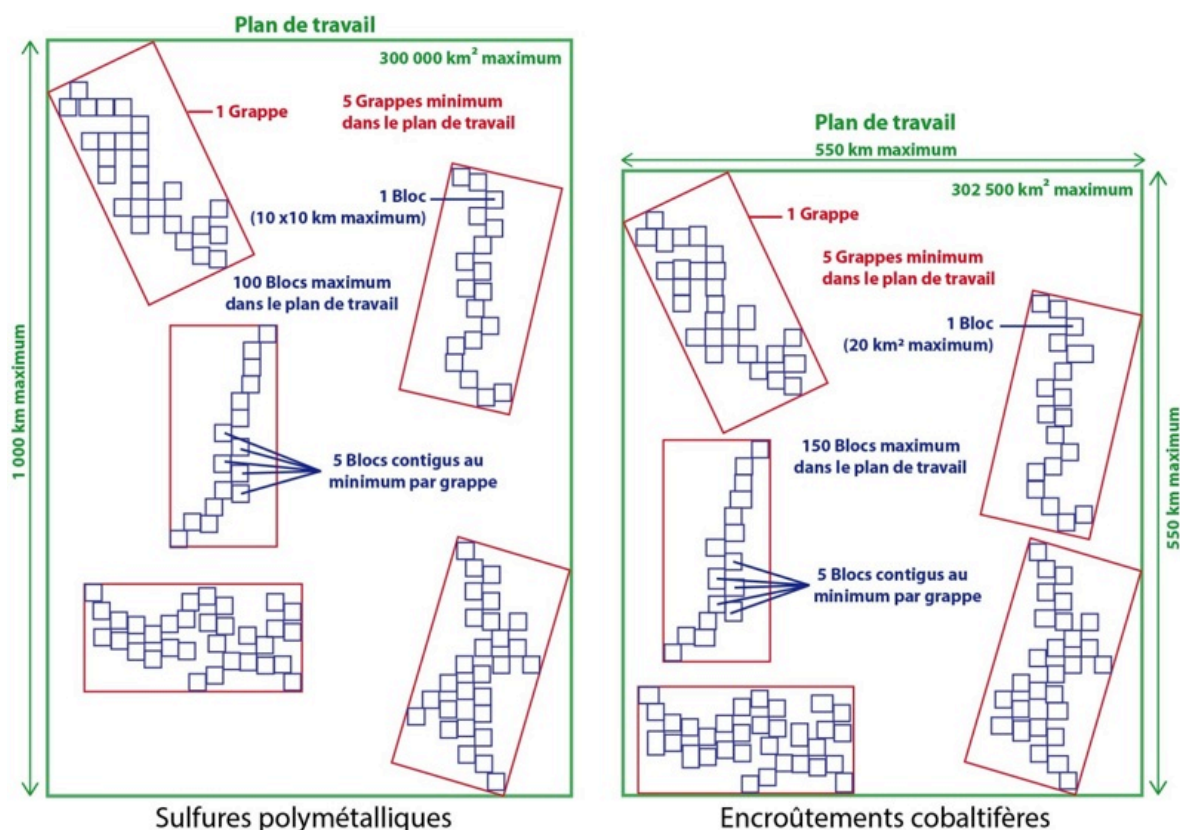


Figure 2-17 Schémas des plans de travail pour les permis sulfures et encroûtements cobaltifères. © Ifremer, Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie.

2.3.2.7. Etat des contrats d'exploration

Plusieurs contrats d'exploration sont actuellement en vigueur ou en cours d'examen : les plus récents ont été examinés en février 2014 lors de la commission légale et technique de l'AIFM.

Tableau 2-10 Contrats d'exploration des nodules polymétalliques.

Contractant	Entrée en vigueur du contrat	Parrainé par	Emplacement général de la zone d'exploration concernée	Date d'expiration du contrat
Organisation mixte InterOceanMetal	29 mars 2001	Bulgarie, Cuba, Fédération de Russie, Pologne, République tchèque et Slovaquie	Zone de fracture Clarion-Clipperton	28 mars 2016
Yuzhmorgeologiya	29 mars 2001	Fédération de Russie	Zone de fracture Clarion-Clipperton	28 mars 2016
Gouvernement de la République de Corée	27 avril 2001		Zone de fracture Clarion-Clipperton	26 avril 2016
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	22 mai 2001	Chine	Zone de fracture Clarion-Clipperton	21 mai 2016
Deep Ocean Resources Development Co. Ltd.	20 juin 2001	Japon	Zone de fracture Clarion-Clipperton	19 juin 2016
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	20 juin 2001	France	Zone de fracture Clarion-Clipperton	19 juin 2016

Gouvernement de l'Inde	25 mars 2002	Inde	Océan Indien	24 mars 2017
Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles	19 juillet 2006	Allemagne	Zone de fracture Clarion-Clipperton	18 juillet 2021
Nauru Ocean Resources Inc.	22 juillet 2011	Nauru	Zone de fracture Clarion-Clipperton	21 juillet 2026
Tonga Offshore Mining Ltd.	11 janvier 2012	Tonga	Zone de fracture Clarion-Clipperton	10 janvier 2027
Marawa Research and Exploration Ltd.	En attente de signature	Kiribati	Zone de fracture Clarion-Clipperton	
UK Seabed Resources Ltd.	8 février 2013	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	Zone de fracture Clarion-Clipperton	7 février 2028
G-TEC Sea Mineral Resources NV	14 janvier 2013	Belgique	Zone de fracture Clarion-Clipperton	13 janvier 2028
Ocean Mineral Singapore Pte. Ltd.	En cours d'examen (juillet 2013)	Singapour	Zone de fracture Clarion-Clipperton	
Cook Islands Investment Corporation (CIIC)	Demande examinée le 3 février 2014	Gouvernement des Iles Cook	Zone de fracture Clarion-Clipperton	

Tableau 2-11 Contrats d'exploration des sulfures polymétalliques.

Contractant	Entrée en vigueur du contrat	Parrainé par	Emplacement général de la zone d'exploration concernée	Date d'expiration du contrat
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	18 novembre 2011	Chine	Dorsale du Sud-Ouest de l'océan Indien	17 novembre 2026
Gouvernement de la Fédération de Russie	29 octobre 2012	Russie	Dorsale médio-atlantique	28 octobre 2027
Gouvernement de la République de Corée	En attente de signature	Corée		
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	En attente de signature	France	Dorsale médio-atlantique	
Gouvernement de l'Inde	Demande en cours d'examen	Inde	Pacifique	
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR)	Demande examinée le 3 février 2014	Allemagne	Océan Indien central	

Tableau 2-12 Contrats d'exploration des encroûtements cobaltifères (juin 2013).

Contractant	Entrée en vigueur du contrat	Parrainé par	Emplacement général de la zone d'exploration concernée	Date d'expiration du contrat
Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)	Demande approuvée en juillet 2013	Japon	Pacifique sud	Juillet 2028
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	Demande approuvée en juillet 2013	Chine	Pacifique	Juillet 2028
Gouvernement de la Fédération de Russie	Demande en cours d'examen	Russie	Pacifique	
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)	Demande examinée le 3 février 2014	Brésil	Rio Grande Rise Océan Atlantique	

2.3.2.8. Protection et préservation du milieu marin

Une des responsabilités de l'AIFM est d'établir des règles visant la protection de l'environnement. La commission légale et technique de l'AIFM doit émettre des recommandations au Conseil. Ces recommandations doivent prendre en compte l'avis d'experts dans ce domaine (ISA/17/LTC/WP.1).

Six grands principes relatifs à la protection de l'environnement ont été émis (ISA/17/LTC/WP.1) :

- l'AIFM agit pour le compte commun de l'humanité ;
- le principe de précaution (principe 15 de la déclaration de Rio) constitue un principe de base ;
- la protection et la préservation de l'environnement doivent être respectées par tous les Etats ;
- l'évaluation environnementale doit être réalisée avant toute activité ;
- tous les Etats ont l'obligation de protéger et de développer durablement l'environnement ;
- l'AIFM doit faire participer le public dans les décisions touchant à l'environnement (notion de transparence).

Règlements relatifs à la prospection et à l'exploration

Tout plan de travail en vue de l'exploration d'une zone doit établir (ISA/19/LTC/8) :

- Des études pour la collecte de données de base ; (état initial)*
- Une surveillance ayant pour but de prévenir tout dommage grave au milieu marin résultant des activités de prospection et d'exploration ; (programme de surveillance)*
- Une surveillance pendant et après les essais des systèmes et matériels de ramassage. » (étude d'impact).*

Le programme de surveillance doit comprendre deux types de zones :

Zone témoin d'impact :

« zone qui doit être utilisée pour évaluer les effets sur le milieu marin des activités menées dans la Zone et qui est représentative des caractéristiques environnementales de la Zone. ».

Introduite très tôt dans le règlement, cette notion n'a jamais été formalisée. La manière de définir une telle zone n'a pas non plus encore été définie. De plus, il est supposé que cet engagement ne suffira pas au suivi des impacts environnementaux. Une gestion de l'environnement régionale semble nécessaire pour les écosystèmes de sulfures hydrothermaux et d'encroûtements cobaltifères, comme cela a été le cas pour les nodules (comm. pers. Lenaïck Menot).

Zone témoin de préservation :

« zone dans laquelle toute activité d'extraction minière est exclue afin de préserver des biotes stables et représentatifs des fonds marins et d'évaluer tous changements de la diversité biologique du milieu marin. »

Cependant, la méconnaissance des écosystèmes visés par l'exploitation et donc l'évaluation non concluante des risques qui en découlent a été mise en avant, notamment par les experts présents au workshop de l'AIFM, tenu en 2011 et réalisé en collaboration avec le gouvernement des Îles Fidji et la division Géosciences et technologie (SOPAC) du secrétariat de la Communauté du Pacifique *« On s'accorde à considérer que le niveau actuel de connaissance et de compréhension de l'écologie des eaux profondes ne permet pas d'effectuer une évaluation concluante des risques des effets à grande échelle de l'exploitation minière du fonds des mers »* (ISA, 2011, TS 10).

Livrable

Chaque année, le contractant doit envoyer un rapport annuel au secrétaire général qui le transmettra à la Commission. Ce rapport doit notamment comprendre les résultats de ses programmes de surveillance.

Recommandations relatives à la prospection et à l'exploration

Pour aider les contractants à respecter ces obligations, l'AIFM a commencé à rédiger des recommandations visant l'acquisition de données environnementales (ISA/16/LTC/7) (Tableau 2-13).

L'AIFM a complété ces recommandations par un commentaire explicatif et un glossaire des termes techniques afin de pallier la difficulté technique des demandes ainsi que le manque de connaissances liées aux activités d'exploration (ISA/19/LTC/8 – I. Introduction).

L'AIFM suggère la réévaluation de ces recommandations au moins tous les cinq ans afin de pouvoir prendre en compte les évolutions technologiques liées à l'exploration des ressources minérales marines profondes (ISA/19/LTC/8 – I. Introduction).

Tableau 2-13 Recommandations émises par l’Autorité internationale des fonds marins.

Recommandations pour aider les demandeurs à évaluer les risques environnementaux à respecter leurs engagements visant la protection de l’environnement lors de la prospection et l’exploration des ressources minérales profondes dans la Zone internationale des fonds marins (juin 2013).

Nom de la recommandation		Adresse internet
Recommandations à l’intention des contractants en vue de l’évaluation d’éventuels impacts sur l’environnement liés à l’exploration des nodules polymétalliques dans la Zone	Emanant de la Commission juridique et technique	http://www.isa.org.jm/fr/sessions/2010/documents
Recommandations à l’intention des contractants en vue de l’évaluation d’éventuels impacts sur l’environnement liés à l’exploration des minerais marins dans la Zone	Emanant de la Commission juridique et technique	1 ^{er} mars 2013 ISA/19/LTC/8 http://www.isa.org.jm/fr/sessions/2013/documents

Les recommandations ISA/19/LTC/8 définissent les paramètres environnementaux à recueillir (biologiques, chimiques, géologiques et physiques) pour mettre en place le profil écologique de la zone (état initial et évaluation d’impacts) ainsi que les procédures à suivre par les contractants lors d’une étude d’impact (Tableau 2-14 et Tableau 2-15). Il indique également les procédures à suivre par le contractant.

Profil écologique témoin

« Pour établir le profil écologique de la zone d’exploration prescrit par le règlement applicable, le contractant, utilisant la meilleure technologie disponible, notamment le Système d’information géographique, et un plan statistique solide pour la stratégie d’échantillonnage, recueille des données afin de déterminer les niveaux des paramètres physiques, chimiques, biologiques et autres qui caractérisent les systèmes susceptibles d’être touchés par les activités d’exploration et d’éventuels essais d’extraction. Ces données de base, qui attestent les conditions naturelles initiales, sont indispensables pour déceler les changements causés par les essais et prévoir l’impact qu’aura l’exploitation commerciale. » (article 14).

Tableau 2-14 Catégories de données à recueillir en vue de la mise en place de l’état initial et de l’évaluation des impacts.

Catégories de données à recueillir	
Physique	<ul style="list-style-type: none"> ○ Courants, température, la turbidité le long de la colonne d’eau, en particulier à proximité du fond; ○ Géomorphologie du fond; ○ Activité hydrodynamique régionale à la surface de l’océan, dans la partie supérieure de la colonne d’eau et au fond; ○ Paramètres physiques aux profondeurs susceptibles d’être touchées par les panaches de rejets pendant les essais des procédés et du matériel de ramassage; ○ Concentration et composition des particules en vue d’enregistrer leur distribution le long de la colonne d’eau.
Géologie	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cartes régionales (données bathymétriques à haute résolution) établies à une échelle correspondant à la variabilité des ressources et de l’habitat; ○ Informations sur les métaux lourds et les éléments traces susceptibles d’être libérés lors des essais d’extraction et leurs concentrations.
Chimie	<ul style="list-style-type: none"> ○ Chimie de la colonne d’eau, y compris l’eau recouvrant les ressources, en particulier sur les métaux et autres éléments susceptibles d’être libérés au cours de l’activité minière; ○ Métaux lourds et éléments traces susceptibles d’être libérés lors des essais

Catégories de données à recueillir	
	d'extraction et leurs concentrations; <ul style="list-style-type: none"> ○ Autres produits chimiques pouvant être libérés dans le panache de rejets après traitement de la ressource lors des essais d'extraction.
Sédiment	<ul style="list-style-type: none"> ○ Propriétés fondamentales des sédiments (propriétés mécaniques du sol et sa composition, afin d'analyser correctement les sédiments superficiels qui représentent une source potentielle de panache turbide en eau profonde) ; ○ Prélever des échantillons en tenant compte de la variabilité du fond marin.
Biologie	<p>Avec une stratégie de collecte et d'échantillons biologiques tenant compte de la variabilité du milieu :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Prélèvement d'échantillons de faune représentatifs de la variabilité des habitats, de la topographie du fond, de la profondeur, des caractéristiques du fond marin et des sédiments, ainsi que de l'abondance et des ressources minérales ciblées; ○ Données sur les communautés du fond, en particulier la mégafaune, la macrofaune, la méiofaune, la microfaune, les détritivores démersaux et les organismes directement associés à la ressource, tant dans la zone d'exploration que dans les zones susceptibles d'être touchées par les activités (panaches d'extraction et de rejets, par exemple); ○ Communautés pélagiques dans la colonne d'eau et dans la couche d'interface benthique susceptibles d'être touchées par les activités (panaches d'extraction et de rejet, par exemple); ○ Niveau de métaux susceptibles d'être libérés durant les activités minières dans les principales espèces ; ○ Mammifères marins et autres grands animaux vivant près de la surface (tortues, bancs de poissons) et de rassemblements d'oiseaux, en identifiant si possible les espèces observées. ○ Au moins une station dans chaque habitat ou région, quand il y a lieu, pour évaluer les variations temporelles dans les communautés de la colonne d'eau et du fond; ○ Répartition régionale des espèces et la connectivité génétique des principales espèces; ○ Photographies in situ (avec indexation en vue d'une visualisation sur écran) afin de disposer d'informations relatives au contexte pour chaque échantillon.
Bioturbation	Données sur le remaniement des sédiments par les organismes
Sédimentation	Données chronologiques sur les flux et la composition des matières arrivant au fond de l'océan en provenance de la partie supérieure de la colonne d'eau.

Etudes d'impact

- Concernant les études d'impact, l'AIFM a établi une liste d'activités nécessitant ou ne nécessitant pas d'études d'impact (Tableau 2-15). Ces activités sont en cours de révision à l'AIFM (juin 2013, comm. pers. Lenaïck Menot).
- Les activités soumises à étude d'impact nécessitent également un programme de surveillance pendant et après les activités (ISA/19/LTC/8). Enfin, certaines conditions particulières s'appliquent spécifiquement pour les nodules polymétalliques, les sulfures polymétalliques et les encroûtements cobaltifères de ferromanganèse (articles 31 à 33, ISA/19/LTC/8). Par exemple, « *pour les nodules polymétalliques une étude d'impact sur l'environnement est nécessaire pour toute opération de prélèvement par traîneau, drague ou chalut, ou autre technique comparable, supérieure à 10 000 mètres carrés.* » (Article 31, ISA/19/LTC/8).

Tableau 2-15 Activités nécessitant et ne nécessitant pas d'évaluation de l'impact environnemental.

Types d'activité	A réaliser en vue de l'établissement des études d'impact
Activités ne nécessitant pas d'évaluation de l'impact environnemental	<ul style="list-style-type: none"> ○ Les observations et mesures magnétométriques et gravimétriques; ○ Le profilage acoustique ou électromagnétique de la résistivité, du potentiel spontané ou de la polarisation induite, ou la production d'images du fond et prises à proximité du fond sans utilisation d'explosifs ou de fréquences préjudiciables au milieu marin; ○ Les prélèvements d'échantillons d'eau, d'organismes, de sédiments et de roches aux fins de l'étude des données écologiques de base, notamment : <ul style="list-style-type: none"> i/ Les prélèvements de petits échantillons d'eau, de sédiments et de biotes (par des robots sous-marins télécommandés, par exemple); ii/ Le prélèvement de petites quantités de minerais et de roches, par exemple par grappillages ou par godets dragueurs; iii/ Les prélèvements de sédiments par carottage et carottes de petit diamètre; ○ Les observations et mesures météorologiques, y compris l'installation d'instruments (mouillages, par exemple); ○ Les observations et mesures océanographiques, en particulier hydrographiques, notamment l'installation d'instruments (mouillages, par exemple); ○ Les observations et mesures vidéographiques et photographiques; ○ Le titrage et l'analyse des minerais à bord des navires; ○ Les systèmes de positionnement, y compris les transpondeurs coulés au fond et les balises de surface et de subsurface signalées dans les avis aux navigateurs; ○ La mesure des rejets par appareil remorqué (analyses chimiques, néphélomètres, fluoromètres, etc.); ○ Les mesures métaboliques de la faune <i>in situ</i> (par exemple, consommation d'oxygène sédimentaire); ○ L'analyse de l'ADN des échantillons d'organismes;
Activités nécessitant l'évaluation de l'impact environnemental	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prélèvement par traîneau, drague ou chalut épibenthique de nodules (échantillonnage supérieur à 10 000 m² par opération). ○ Utilisation de matériel spécial pour l'étude des effets des perturbations éventuellement provoquées au fond. ○ Essais des procédés et matériels de ramassage.

2.3.3. Législation européenne

2.3.3.1. *Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM)*

La directive-cadre « stratégie pour le milieu marin » (DCSMM) est une directive établie par le Parlement européen et le Conseil (directive 2008/56/CE du 17 juin 2008). Elle s'inscrit dans la continuité de la directive cadre sur l'eau (DEC – 2000).

Entrée en vigueur le 15 juillet 2008, la DCSMM a pour principal objectif de promouvoir l'utilisation durable des mers et la conservation des écosystèmes marins, en gérant et évitant les conflits d'usage, en faisant part du développement économique et en atteignant des objectifs économiques et sociaux (rapport MEDDE 2013 p82/104). La directive impose aux Etats membres de prendre toutes les mesures nécessaires pour atteindre ou maintenir un bon état écologique des eaux marines à l'horizon 2020.

L'article 3 de la directive mentionne ainsi que « *Le milieu marin est un patrimoine précieux qu'il convient de protéger, de préserver et, lorsque cela est réalisable, de remettre en état, l'objectif final étant de maintenir la diversité biologique et de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité. À cet égard, la présente directive devrait, notamment, promouvoir l'intégration*

des préoccupations environnementales au sein de toutes les politiques concernées et constituer le pilier environnemental de la future politique maritime de l'Union européenne. ».

La DCSMM s'applique aux eaux marines et côtières des zones métropolitaines sous souveraineté ou juridiction nationale. Elle s'étend jusqu'à 200 milles nautiques (Figure 2-13).

En France, la DCSMM a été transposée en droit français dans le code de l'environnement, aux articles L 219-9 à L 219-18 et R 219-2 à R 219-17. Elle a induit le découpage des eaux françaises en 4 sous-régions marines : la Manche-mer du Nord, les mers celtiques, le golfe de Gascogne, la Méditerranée occidentale. Pour chaque sous-région marine, un plan d'action pour le milieu marin (PAMM) doit être élaboré et mis en œuvre. Ce plan d'action comporte 5 éléments et un échéancier :

- **une évaluation initiale** des eaux marines comportant une analyse des spécificités et caractéristiques essentielles de l'état écologique de ces eaux, une analyse des principaux impacts et pressions, notamment l'activité humaine, sur l'état écologique de ces eaux ainsi qu'une analyse économique et sociale de l'utilisation de ces eaux et du coût de la dégradation du milieu marin (pour 2012) ;
- **la définition du bon état écologique** pour ces mêmes eaux reposant sur onze descripteurs qualitatifs (pour 2012) ;
- **la définition d'objectifs environnementaux et d'indicateurs associés** en vue de parvenir à un bon état écologique du milieu marin (pour 2012) ;
- **un programme de surveillance** en vue de l'évaluation permanente de l'état des eaux marines et de la mise à jour périodique des objectifs (pour 2014) ;
- **un programme de mesures** qui doit permettre de parvenir à un bon état écologique des eaux marines ou à conserver celui-ci (pour 2015).

Chacun de ces éléments sera remis à jour tous les 6 ans.

Onze descripteurs qualitatifs servant à définir le bon état écologique ont été définis dans l'annexe 1 de la directive. Un ou plusieurs organisme(s) ont été désignés pour piloter chaque descripteur.

Ces différents éléments (plan d'action, descripteurs, indicateurs) servent déjà de références à l'établissement de descripteurs et d'indicateurs spécifiques au milieu profond. Les descripteurs 1 (Diversité biologique), 4 (Réseau trophique), 6 (Intégrité des fonds et benthos) 7 (Conditions hydrodynamiques) et 8 (Contamination/milieu) sont particulièrement pertinents. Par ailleurs, en phase d'exploration et d'exploitation des ressources minérales marines profondes, des enjeux liés aux descripteurs 11 (bruit/perturbations) et 10 (rejets de déchets d'exploitation) apparaîtront.

Dans le périmètre d'application de la DCSMM, et par extrapolation au-delà des 200 milles marins, les activités d'exploration et d'exploitation des ressources minérales marines profondes doivent se dérouler de manière cohérente avec les objectifs fixés dans la Directive.

2.3.3.2. Réseau Natura 2000

Défini en 1992 au sein de la directive 92/43/CEE² dite « Directive habitats, faune, flore » (DHFF), et intégrant la directive 79/409/CEE³ dite « Directive oiseaux » (DO) datant de 1979, le réseau Natura 2000 est un ensemble d'espaces protégés, visant à appliquer ces deux directives européennes pour la conservation :

- des espèces d'oiseaux listées au sein de la DO ;
- des habitats ainsi qu'espèces animales et végétales d'intérêt communautaire listés au sein de la DHFF.

Les états membres ont donc l'obligation de définir des réseaux de zones protégées écologiquement cohérents répondant à un ensemble de critères précisés dans les directives afin d'aboutir à l'état de conservation adéquat.

Ces zones sont dénommées :

- Zone de protection spéciale (ZPS) lorsqu'une zone est désignée au titre de la DO.
- Zone spéciale de conservation (ZSC) lorsqu'une zone est désignée au titre de la DHFF (après être passée par un stade intermédiaire appelé Site d'importance communautaire (SIC)).

Ces listes comprennent, entre autres, de nombreux espèces ou habitats marins qui sont donc visés par les obligations inhérentes à ces directives. Ainsi dans les eaux françaises, suite à la demande de la Commission européenne en 2006, 101 sites Natura 2000 étendus ou nouveaux ont été proposés, soit 40% des eaux territoriales et 11% de la totalité des eaux métropolitaines françaises, sur lesquels des mesures précises de préservation des habitats et espèces doivent être prises et évaluées. Par ailleurs, ces sites Natura 2000 sont considérés en droit français comme des aires marines protégées depuis la loi du 14 avril 2006⁴.

L'Agence des aires marines protégées, référent technique national, le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), référent scientifique et l'Atelier technique des espaces naturels (ATEN), animateur de la plate-forme technique, travaillent en lien avec les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), pour la désignation et la gestion de ces sites en mer.

En outre, les directives fixent la réglementation pour certaines activités pouvant impacter les éléments protégés.

² [Directive 92/43/CEE du Conseil, du 21 mai 1992, concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages](#)

³ [Directive 79/409/CEE du Conseil, du 2 avril 1979, concernant la conservation des oiseaux sauvages](#)

⁴ [Loi n° 2006-436 du 14 avril 2006 relative aux parcs nationaux, aux parcs naturels marins et aux parcs naturels régionaux](#)

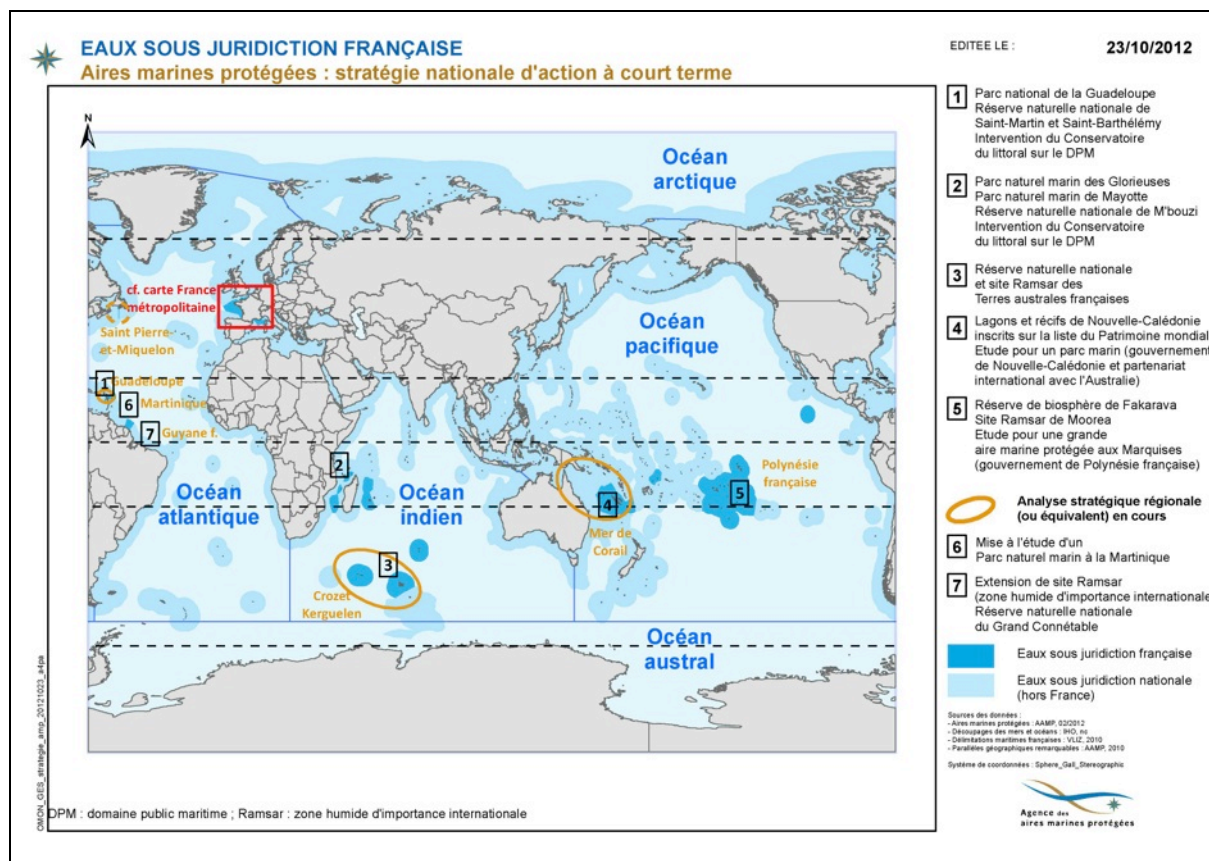


Figure 2-18 Eaux sous juridiction française, aires marines protégées, stratégie nationale d'action à court terme (source : AAMP, 2012)

2.3.4. Législation française (DPM, ZEE et plateau continental)

2.3.4.1. *Rappel des limites des zones maritimes et des législations associées*

Limites des zones maritimes

Les zones maritimes sous juridiction française sont composées des espaces suivants (voir le chapitre 2, Tableau 2-3 et Figure 2-12) :

- les eaux intérieures, eaux situées en deçà de la ligne de base de la mer territoriale la mer territoriale, (12 milles marins à compter de la ligne de base)
- la zone contiguë à la mer territoriale (24 milles marins à compter de la ligne de base)
- la zone économique exclusive (ZEE) (jusqu'à 200 milles marins à compter de la ligne de base)
- le plateau continental (200 milles marins à compter de la ligne de base ou, sous certaines conditions, une extension peut être accordée jusqu'à 350 milles marins) ;
- la Zone.

Législations associées

Le Domaine Public Maritime naturel (Article L2111-4 du Code général de la propriété des personnes publiques - CGPPP).

Le domaine public maritime naturel de l'Etat comprend :

1° Le sol et le sous-sol de la mer entre la limite extérieure de la mer territoriale et, côté terre, le rivage de la mer.

Le rivage de la mer est constitué par tout ce qu'elle couvre et découvre jusqu'où les plus hautes mers peuvent s'étendre en l'absence de perturbations météorologiques exceptionnelles;

2° Le sol et le sous-sol des étangs salés en communication directe, naturelle et permanente avec la mer ;

3° Les lais et relais de la mer :

Qui faisaient partie du domaine privé de l'Etat à la date du 1er décembre 1963, sous réserve des droits des tiers ;

Constitués à compter du 1er décembre 1963.

4° La zone bordant le littoral définie à l'article L.5111-1 dans les départements de la Guadeloupe, de la Guyane, de la Martinique et de la Réunion (zone dite des 50 pas géométriques)

5° Les terrains réservés en vue de la satisfaction des besoins d'intérêts public d'ordre maritime, balnéaire ou touristique et qui ont été acquis par l'Etat.

Les terrains soustraits artificiellement à l'action du flot demeurent compris dans le domaine public maritime naturel sous réserve des dispositions contraires d'actes de concession translatifs de propriété légalement pris et régulièrement exécutés.

- **La mer territoriale** (12 milles nautiques à partir de la ligne de base) Chaque pays y est souverain. La France y dispose par exemple du monopole de pêche et les navires étrangers d'un droit de passage inoffensif « continu et rapide ». Le sol et le sous-sol de cet espace maritime appartiennent au domaine public maritime de l'Etat français.

- **Législations associées à la zone contiguë et la zone économique exclusive (ZEE)**

La convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM) s'applique dans toutes les zones maritimes. Pour ce qui concerne l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, la mise en œuvre de la CMB par la France est notamment précisée par le code minier.

« la recherche [...] de l'ensemble des substances minérales ou fossiles contenues dans le sous-sol du plateau continental [...] ou dans le fond de la mer et le sous-sol de la zone économique dite "exclusive" [...], ou existant à leur surface, [est] soumis[e] au régime applicable en vertu du présent livre aux substances de mine » (code minier, article L. 123-2).

Le décret n° 2013 -611 du 10 juillet 2013 organise un régime d'autorisation pour l'implantation d'îles artificielles, d'installations, d'ouvrages et de leurs installations connexes sur le plateau continental, dans la zone économique et la zone de protection exclusive (zones maritimes qui recoupent la zone économique exclusive et dans lesquels l'Etat français aux termes de la loi n° 76-655 du 16 juillet 1976 exerce certaines compétences).

• **Législations associées à la Zone**

La convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM) est appliquée dans la Zone ainsi que les règlements émis par l'Autorité Internationale des Fonds Marins.

Pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, les Etats ont ainsi deux types de législation à mettre en place :

- Au-delà de la ZEE, la législation relative à leurs responsabilités dans la Zone via les entreprises qu'ils patronnent ;
- A l'intérieur de la ZEE, la législation relative à l'exploration et l'exploitation dans les espaces maritimes sous leur juridiction.

2.3.4.2. Législation relative à aux responsabilités des Etats dans la Zone via les entreprises qu'ils patronnent

Les Etats ont l'obligation de veiller au respect des termes des contrats que les entreprises qu'ils patronnent ont avec l'AIFM : « ces États adoptent des lois et règlements et prennent des mesures administratives qui, au regard de leurs systèmes juridiques, sont raisonnablement appropriées pour assurer le respect effectif des obligations [qui résultent de cette convention] par les personnes relevant de leurs juridictions » (CNUDM, Article 153, paragraphe 4). La responsabilité d'un Etat peut en effet être engagée « lorsque survient un manquement aux obligations qui lui incombent en vertu de la convention et qu'il existe un lien de causalité entre manquement et dommage ».

Plusieurs actions ont été entreprises par l'AIFM pour aider les états à mettre en place des législations nationales :

- Le Tribunal international du droit de la mer a émis pour avis, en 2010, le fait que les Etats pouvaient prévoir des mécanismes de surveillance du contractant patronné ainsi que la mise en place de projets de coordination entre les activités de l'Etat qui patronne et celle de l'AIFM (Sénat, 2013).
- L'AIFM a commencé à réaliser un état des lieux des normes adoptées par les Etats qui patronnent des activités dans la Zone ou qui sont partie au statut de l'Autorité. Au 4 mai 2012, neuf États (Allemagne, Chine, Guyana, Îles Cook, Nauru, République tchèque, Royaume-Uni, Tonga et Zambie) ainsi que la division Géosciences et technologies appliquées du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (SOPAC) avaient communiqué des renseignements.

Tableau 2-16 Législation nationale visant spécifiquement l'exploration et la mise en valeur des ressources de la « Zone ».

Législation adoptée	Législation en cours de préparation
Allemagne	Chine
République tchèque	Nauru
	Tonga

Les experts présents au workshop de l'AIFM (2011), réalisé en collaboration avec le gouvernement des Îles Fidji et la division Géosciences et technologie (SOPAC) du secrétariat de la Communauté du Pacifique, ont mis en avant « *La nécessité d'instituer dans chaque État concerné une autorité spécifiquement compétente en matière de délivrance des autorisations, de surveillance des activités et de suivi des effets a également été mise en évidence, étant observé que ces fonctions pourraient être déléguées à une entité régionale dotée d'une compétence spécialisée* » (ISA, 2011, TS 10).

2.3.4.3. *Législation nationale*

Les législations relatives à l'exploration et à l'exploitation des substances minières sous-marines résultent du code minier et du code de l'environnement.

Il n'existe pas de législation nationale spécifiquement consacrée à l'exploration et l'exploitation des nodules polymétalliques, des sulfures hydrothermaux et des encroûtements (Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations, 2013b).

Il existe trois décrets qui fixent les principes selon lesquels doivent être conduites toutes les activités d'exploration du plateau continental et d'exploitation de ses ressources naturelles ainsi que leur transport par canalisations :

- Décret n° 71-360 du 6 mai 1971 modifié portant application de la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles.
- Décret n° 71-361 du 6 mai 1971 portant dispositions pénales pour l'application de la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles et du décret n° 71-360 du 6 mai 1971 pris pour son application.
- Décret n° 71-362 du 6 mai 1971 relatif aux autorisations de prospections préalables (APP) de substances minérales ou fossiles dans le sous-sol du plateau continental.

Ces textes applicables de plein droit sur la zone économique exclusive et le plateau continental adjacents au territoire métropolitain et aux départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Mayotte) concernent l'attribution du titre minier et les autorisations de travaux. Ils sont mis en œuvre conjointement avec le décret n° 2006-648 du 02/06/2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain pour l'octroi du titre minier et avec le décret n° 2006-649 du 02/06/2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains pour l'instruction de la demande d'ouverture des travaux.

Code minier

Dans le cas d'une prospection, d'une exploration ou d'une exploitation, les trois étapes suivantes se succèdent : la prospection, le permis exclusif de recherches, la concession. Ces étapes sont détaillées dans le code minier français (nouveau, version consolidée au 30 mai 2013).

1- La prospection préalable

Une autorisation de prospection préalable (APP) peut être accordée pour la recherche (article L123-3). Elle donne un « *droit non exclusif d'exécuter tous travaux de recherches, à l'exclusion des sondages dépassant une profondeur de 300 mètres à partir du fond de la mer, et sans pouvoir disposer du produit des recherches, à l'exception d'échantillons ou de prélèvements sans valeur commerciale* » (article L123-14). Cette autorisation est valable deux

ans (article L123-14) et est accordée par « *l'autorité administrative compétente sans mise en concurrence, ni enquête publique et sans qu'ait été préalablement effectuée la concertation prévue à l'article L. 123-10* » (article L123-15). Sur la zone économique exclusive et le plateau continental, l'instruction de la demande d'autorisation de prospection préalable est régie par le décret n° 71 -362 du 6 mai 1971 relatif aux autorisations de prospections préalables (APP) de substances minérales ou fossiles dans le sous-sol du plateau continental, conjointement avec le décret n° 2006-648 du 02/06/2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain pour l'attribution de l'APP et avec le décret n° 2006-649 du 02/06/2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains pour l'ouverture des travaux.

2- Le permis exclusif de recherches

Le permis exclusif de recherche est accordé « *après mise en concurrence, par l'autorité administrative compétente pour une durée initiale maximale de cinq ans* » (article L122-3). A ce permis est associée « *l'exclusivité du droit d'effectuer tous travaux de recherches dans le périmètre qu'il définit et de disposer librement des produits extraits à l'occasion des recherches et des essais* » (article L122-1). La demande de permis exclusif de recherches fait l'objet d'une procédure de participation du public nationale par voie électronique (L. 120-2 du code de l'environnement).

3- La concession

« *Les mines ne peuvent être exploitées qu'en vertu d'une concession ou par l'Etat* » (article L131-1). Cette concession peut être accordée conjointement à plusieurs sociétés commerciales (article L132-5) et sera accordée après une enquête publique (enquête mentionnée dans le code de l'environnement - article L132-3) et suite à une mise en concurrence. Leur durée initiale ne peut dépasser 50 ans sauf dans quelques cas particuliers (article L132-11). La durée initiale peut être prolongée successivement de 25 ans (L. 142-7).

« *L'institution de la concession entraîne l'annulation du permis exclusif de recherches pour les substances mentionnées et à l'intérieur du périmètre institué par cette concession, mais le laisse subsister à l'extérieur de ce périmètre. Toutefois, le droit exclusif du titulaire d'effectuer tous travaux de recherches à l'intérieur du périmètre de cette concession est maintenu* » (article L132-12).

Implication de l'Ifremer

L'Ifremer est le conseiller scientifique et technique des décideurs publics (ministères, préfectures, services déconcentrés de l'Etat) pour fournir des avis sur les demandes de permis d'exploitation ou d'exploration de matériaux marins (décret 71-360 du 6 mai 1971, décret n° 2006-648 du 02/06/2006, décret n° 2006-649 du 02/06/2006). Il est également associé à la réflexion qui doit conduire à la refonte des textes réglementaires.

De plus, d'après l'Article L412-6, l'Ifremer a ainsi accès « *aux documents ou renseignements d'ordre géologique, hydrologique ou minier mentionnés à l'article L. 412-1 et relatifs au sol et au sous-sol du plateau continental et de la zone économique exclusive sont énoncées à l'article 34 de la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles*⁵ ».

⁵ Article 34 loi 1968 : Le centre national pour l'exploitation des océans aura accès aux documents ou renseignements d'ordre géologique, hydrologique ou minier et visés à l'article [L. 412-1](#) du code minier ; il pourra en outre se faire remettre tous documents ou renseignements d'ordre biologique.

Communication obligatoire de données au profit de personnes publiques

Il faut noter que les articles L. 412-1 à L. 412-6 du code minier prévoient la communication obligatoire de données au profit de personnes publiques habilitées à cet effet.

En outre les articles L. 413-1 à L. 413-3 régissent la publicité et cession des renseignements recueillis, notamment :

Article L-413-1

« Les documents ou renseignements recueillis en application des articles L. 411-3 et L. 412-1 du présent code ne peuvent, sauf autorisation de l'auteur des travaux, être rendus publics ou communiqués à des tiers par l'administration avant l'expiration d'un délai de dix ans à compter de la date à laquelle ils ont été obtenus. Le délai de dix ans peut être réduit ou annulé pour certains documents et renseignements dans les conditions déterminées par décrets en Conseil d'Etat. Il peut être porté au maximum à vingt ans dans les mêmes formes pour les documents et renseignements sismiques intéressant la recherche des hydrocarbures à terre et pour tous les renseignements et documents intéressant la recherche des hydrocarbures en mer.

...

Les échantillons, documents et renseignements intéressant la recherche d'hydrocarbures liquides ou gazeux, autres que les documents et renseignements sismiques, recueillis à l'occasion de travaux exécutés à terre tombent immédiatement dans le domaine public. ...

Par exception aux dispositions des deux premiers alinéas du présent article, les renseignements intéressant la sécurité de la navigation de surface ainsi que ceux concernant les propriétés physico-chimiques et les mouvements des eaux sous-jacentes et recueillis à l'occasion de travaux exécutés en mer tombent immédiatement dans le domaine public. Ces renseignements doivent être communiqués, dès leur obtention, pour ce qui concerne leurs missions respectives, à la direction de la météorologie nationale et au service hydrographique et océanographique de la marine, lequel peut, en outre, se faire remettre sans délai les renseignements et documents intéressant la sécurité de la navigation sous-marine ainsi que la morphologie et la nature superficielle du sol marin. »

Code de l'environnement

Le code minier stipule que *« les travaux de recherches ou d'exploitation minière doivent respecter [...] les contraintes et les obligations nécessaires à la préservation [...] des caractéristiques essentielles du milieu environnant, terrestre ou maritime, et plus généralement à la protection des espaces naturels et des paysages, de la faune et de la flore, des équilibres biologiques et des ressources naturelles [...] »* (article L161-1 du code minier).

Le code de l'environnement ne régit pas l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, n'étant applicable que jusqu'à la limite des eaux territoriales, mais le code minier y fait référence pour les procédures de consultation du public et l'étude d'impact.

Cela comprend le respect des articles suivants du code de l'environnement :

Les agents du CNEXO ayant accès à ces documents ou renseignements sont astreints au secret professionnel dans des conditions qui seront définies par décret.

- 2°) de l'article L. 211-1 : la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau, notamment vis-à-vis de « toute pollution [...] des eaux de la mer dans la limite des eaux territoriales »;
- article L. 331-1 : la protection des espaces terrestres et maritimes des parcs nationaux;
- article L. 332-1 : la protection des réserves naturelles ;
- article L. 341-1 : la protection des sites classés.

Pour les permis exclusifs de recherches, il est prévu une procédure de participation du public électronique imposée par l'article L. 120-3 du code de l'environnement. L'octroi des concessions et les demandes d'autorisation d'ouverture des travaux comportent une enquête publique définie par le code de l'environnement (respectivement articles L132-3 et article 13 du décret 2006-649). L'étude d'impact, mentionnée au code de l'environnement, est obligatoire pour les demandes d'autorisation d'ouverture des travaux (article 6 du décret 2006-649).

Etude d'impact

Le code de l'environnement stipule que « *Les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés qui, par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine sont précédés d'une étude d'impact.* »

Cette étude d'impact est fonction « *de critères et de seuils définis par voie réglementaire et, pour certains d'entre eux, après un examen au cas par cas effectué par l'autorité administrative de l'Etat compétente en matière d'environnement [...]* » (article L122-1).

Ces critères sont regroupés dans l'Annexe de l'article R122-2. Pour les ressources minérales marines, ne sont concernés que les catégories « *23° Forages* » et « *24° Travaux miniers et de stockage souterrain.* ». L'étude d'impact concerne les « *Travaux de forage d'exploration et d'exploitation minière* » (dont sont exclus les « *forages géothermiques de minime importance, des forages de moins de 100 mètres de profondeur, et des forages pour étudier la stabilité des sols.* »), et l'« *ouverture de travaux d'exploitation concernant les substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitains.* ».

Un dossier d'étude d'impact comprend au minimum (article L122-3) :

- « *une description du projet*
- *une analyse de l'état initial de la zone susceptible d'être affectée et de son environnement,*
- *l'étude des effets du projet sur l'environnement ou la santé humaine, y compris les effets cumulés avec d'autres projets connus,*
- *les mesures proportionnées envisagées pour éviter, réduire et, lorsque c'est possible, compenser les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine*
- *une présentation des principales modalités de suivi de ces mesures et du suivi de leurs effets sur l'environnement ou la santé humaine.*
- *[...] une esquisse des principales solutions de substitution qui ont été examinées par le maître d'ouvrage une indication des principales raisons de son choix, eu égard aux effets sur l'environnement ou la santé humaine [...]* ».

En application du 2^o alinéa du L. 122-1, « *Cette étude d'impact est transmise pour avis à l'autorité administrative de l'Etat compétence en matière d'environnement par l'autorité chargée d'autoriser ou d'approuver ces aménagement ou ces ouvrages.* »

L'article R. 122-7 précise les délais impartis à cette autorité pour formuler son avis. (2 ou 3 mois).

Cet avis est joint au dossier d'enquête publique (1^o de l'article R. 123-8 du code de l'environnement).

Enquête publique

L'octroi des concessions et les demandes d'autorisation d'ouverture des travaux nécessitent une enquête publique. Cette enquête doit être effectuée afin « *d'assurer l'information et la participation du public [...] des décisions susceptibles d'affecter l'environnement [...]* » (article L123-1) notamment pour des « *projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements [...] devant comporter une étude d'impact [...]* » (article L123-2). Ainsi l'obligation d'étude d'impact entraîne une enquête publique.

Cette enquête « *[...] est conduite, selon la nature et l'importance des opérations, par un commissaire enquêteur ou une commission d'enquête [...]* » (article L123-4) et sa durée ne peut être inférieure à trente jours (article L123-9).

« *Le dossier d'enquête publique comprend, outre l'étude d'impact ou l'évaluation environnementale, [...] les pièces et avis exigés par les législations et réglementations applicables au projet [...]* », ainsi qu' « *[...] une note de présentation non technique [...]* » et un bilan de la procédure de débat public si le projet en a fait l'objet (article L123-12).

« *Le commissaire enquêteur ou la commission d'enquête rend son rapport et ses conclusions motivées dans un délai de trente jours à compter de la fin de l'enquête. [...] Le rapport doit faire état des contre-propositions qui ont été produites durant l'enquête ainsi que des réponses éventuelles du maître d'ouvrage. Le rapport et les conclusions motivées sont rendus publics* » (article L123-15).

« *Lorsque les projets qui ont fait l'objet d'une enquête publique n'ont pas été entrepris dans un délai de cinq ans à compter de la décision, une nouvelle enquête doit être conduite [...]* » (article L123-17).

L'organisme responsable du projet dispose d'un « *délai d'un an à compter de la clôture de l'enquête* » pour se prononcer « *[...] par une déclaration de projet, sur l'intérêt général de l'opération projetée [...]. La déclaration de projet prend en considération l'étude d'impact, l'avis de l'autorité administrative de l'Etat compétente en matière d'environnement et le résultat de la consultation du public. [...] Si les travaux n'ont pas reçu de commencement d'exécution dans un délai de cinq ans à compter de la publication de la déclaration de projet, la déclaration devient caduque.* » (Article L126-1).

2.3.5. Spécificités Outre-Mer

2.3.5.1. *Les régimes législatifs et réglementaires applicables outre-mer*

L'article 72-3 de la Constitution distingue :

- **les collectivités territoriales régies par son article 73** : la Guadeloupe, la Guyane, la Martinique, La Réunion et le Département de Mayotte ;
- **les collectivités d'outre-mer régies par son article 74** : Saint-Pierre-et-Miquelon, la Polynésie Française, les îles Wallis et Futuna, ainsi que les collectivités de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin, créées par la loi organique n° 2007-223 du 21 février 2007 ;
- **la Nouvelle-Calédonie**, qui relève du titre XIII de la Constitution (articles 76 et 77) ;
- **les Terres australes et antarctiques françaises** qui, depuis la loi n° 2007-224 du 21 février 2007, incluent les îles Eparses de l'océan Indien et **l'île de Clipperton**, soumises à un régime législatif particulier.

Le régime défini par l'article 73 de la Constitution

Le régime législatif et réglementaire applicable dans les collectivités régies par l'article 73 de la Constitution est un régime dit « d'identité législative ». Les lois et règlements sont applicables de plein droit dans ces collectivités.

Des adaptations sont néanmoins possibles pour tenir compte « *des caractéristiques et contraintes particulières de ces collectivités* ». Ces adaptations sont décidées par l'État ou par ces collectivités, à l'exception de La Réunion, « *dans les matières où s'exercent leurs compétences et si elles y ont été habilitées par la loi* ».

Le régime défini par l'article 74 de la Constitution

Les collectivités régies par l'article 74 de la Constitution ont un « *statut qui tient compte des intérêts propres de chacune d'elles au sein de la République* ». « *Ce statut est défini par une loi organique* ». Il détermine les compétences normatives des collectivités ainsi que le régime législatif et réglementaire applicable aux matières qui relèvent de la compétence de l'État.

- Ainsi, les statuts de Saint-Barthélemy, de Saint-Martin et de Saint-Pierre et Miquelon prévoient que les lois et règlements sont applicables de plein droit dans ces collectivités sauf exceptions déterminées par leurs statuts. Il n'y a donc pas lieu, pour les textes concernés, de prévoir une mention particulière d'applicabilité.
- Les autres collectivités relèvent d'un régime dit de « spécialité législative », en vertu duquel les lois et règlements ne sont applicables dans ces collectivités que sur mention expresse d'application, y compris pour les modifications qui leur sont apportées. Cependant, ce régime n'exclut pas l'application de l'identité législative dans certaines matières précisément énumérées.
- Pour la Nouvelle-Calédonie, il résulte de l'esprit même de l'accord de Nouméa du 5 mai 1998, qui a valeur constitutionnelle, que la Nouvelle-Calédonie demeure régie par le principe de spécialité législative. Ce principe est expressément affirmé par l'article 6-2 de la loi organique n° 99-209 du 19 mars 1999. Par ailleurs, il convient de signaler que l'article 77 de la Constitution prévoit que les compétences transférées par l'État à la Nouvelle-Calédonie le sont à titre définitif.

La consultation des assemblées délibératives et des autorités exécutives locales est requise pour :

- les projets et propositions de loi, les projets d'ordonnance ou de décret qui comportent des dispositions particulières à ces collectivités ;

- la ratification ou l'approbation des engagements internationaux conclus dans les matières relevant de la compétence de ces collectivités ;

Toutefois, aucune consultation n'est requise pour les lois de souveraineté.

Les régimes définis par le législateur ordinaire

Le régime législatif et l'organisation administrative des Terres australes et antarctiques françaises et de l'île de Clipperton relève, en vertu du dernier alinéa de l'article 72-3 de la Constitution, de la compétence du législateur ordinaire.

- Les Terres australes et antarctiques françaises sont, en vertu des dispositions de l'article 1-1 de la loi n° 55-1052 du 6 août 1955 portant statut des Terres australes et antarctiques françaises et de l'île de Clipperton, soumises à un régime de spécialité législative, à l'exception des matières qu'elles énumèrent et qui relèvent d'un régime identité législative.
- L'île de Clipperton est soumise à un régime d'identité législative en vertu des dispositions de l'article 9 de la loi n° 55-1052 du 6 août 1955 portant statut des Terres australes et antarctiques françaises et de l'île de Clipperton. Les lois et règlements y sont applicables de plein droit.

L'île de Clipperton est placée sous l'autorité directe du Gouvernement. Le ministre des outre-mer est chargé de l'administration de l'île, il peut déléguer ces attributions. Actuellement, le Haut-commissaire de la République en Polynésie Française exerce ces attributions.

2.3.5.2. La répartition des compétences entre l'Etat et les collectivités pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes

- **Sur le plateau continental**

Le cadre juridique est historiquement fixé par la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploitation du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles, dont on citera les articles suivants pertinents pour l'outre-mer :

« Art. 1. - La République française exerce, conformément à la Convention de Genève sur le plateau continental du 29 avril 1958, publiée par le décret n° 65-1049 du 29 novembre 1965, des droits souverains aux fins de l'exploration du plateau continental adjacent à son territoire et de l'exploitation de ses ressources naturelles.

« Le plateau continental sur lequel la République française exerce les droits définis ci-dessus est, dans toute son étendue et quels que soient la situation géographique et le statut des territoires auxquels il est adjacent, soumis à un régime juridique unique fixé par la présente loi sous réserve des dispositions des articles 35 et 36. »

« Art. 5. - Sous réserve des dispositions de la présente loi et des textes pris pour son application, les lois et règlements français s'appliquent, pendant le temps où sont exercées les activités mentionnées à l'article 2, sur les installations et dispositifs définis à l'article 3, comme s'ils se trouvaient en territoire français métropolitain. Ils sont également applicables, dans les mêmes conditions, aux installations et dispositifs eux-mêmes.

« Lesdits lois et règlements s'appliquent, dans les mêmes conditions, à l'intérieur des zones de sécurité, au contrôle des opérations qui y sont effectuées ainsi qu'au maintien de l'ordre public. »

« **Art. 36.** - *Les conditions d'adaptation de la présente loi aux opérations effectuées sur le plateau continental adjacent aux collectivités territoriales d'outre-mer et, en tant que de besoin, sur les fonds de la mer territoriale, seront fixées par décret en Conseil d'Etat.*

« *Les dispositions de la présente loi sont applicables, à l'exception de l'article 1er, au fond de la mer et à son sous-sol dans la zone économique définie à l'article 1er de la loi n° 76-655 du 16 juillet 1976.* »

- **Dans la zone économique exclusive**

La répartition des compétences entre l'Etat et les collectivités en matière d'exploration et d'exploitation des ressources minérales marines profondes est fonction, dans la statut de chacune des collectivités ultramarines, de la répartition des compétences entre l'Etat et ces dernières, en matière d'exploration et d'exploitation des ressources biologiques et non biologiques en mer (cf. tableau ci-dessous). Au-delà de la zone économique exclusive, l'Etat dispose toujours d'une compétence pleine et entière.

Les dispositions des articles 1 et 2 de la loi n° 76-655 du 16 juillet 1976 relative à la zone économique et à la zone de protection écologique au large des côtes du territoire de la République prévoient d'une part, à l'article 1^{er} que « *La République exerce, dans la zone économique pouvant s'étendre depuis la limite des eaux territoriales jusqu'à 188 milles marins au-delà de cette limite, des droits souverains en ce qui concerne l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles, biologiques ou non biologiques, du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux surjacentes. Ces droits sont exercés dans les conditions et selon les modalités prévues aux articles ci-après.* » et d'autre part, à l'article 2 que « *Les dispositions de la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles, à l'exception de l'article 1er de cette loi, ainsi que celles des articles L. 124-1 et L. 134-1 du code minier sont applicables au fond de la mer et à son sous-sol dans la zone économique définie à l'article 1er ci-dessus, sous réserve des compétences dévolues aux collectivités d'outre-mer, à la Nouvelle-Calédonie et aux Terres australes et antarctiques françaises par les dispositions statutaires qui leur sont applicables.* ».

Le premier alinéa de son article 5 précise que « *Des décrets en Conseil d'Etat fixeront les conditions et les dates d'entrée en vigueur des dispositions de la présente loi en ce qui concerne la zone économique au large des diverses côtes du territoire de la République.* » Ces zones économiques au large des collectivités ultramarines ont toutes été créées.

- **Les régions d'outre-mer**

L'article L. 611-30 du code minier prévoit que « *Les dispositions du présent code relatives à la recherche et à l'exploitation de l'ensemble des substances minérales ou fossiles contenues dans le sous-sol du plateau continental défini à l'article 1er de cette loi ou dans le fond de la mer et dans celui de la zone économique dite " exclusive " définie à l'article 1er de la loi n° 76-655 du 16 juillet 1976 relative à la zone économique et à la zone de protection écologique au large des côtes du territoire de la République, ou existant à leur surface, sont applicables au plateau continental et à la zone économique exclusive adjacents au territoire des départements d'outre-mer, sous réserve des compétences dévolues à la région par la présente section.* »

Les compétences dévolues aux régions par l'article L. 611-31 et suivants du code minier portent sur la délivrance des titres miniers en mer. Cependant, en raison de l'absence de mise en œuvre des compétences qui ont été attribuées aux régions d'outre-mer, la compétence de l'Etat continue de s'exercer pleinement en mer, au large de ces collectivités relevant d'un régime d'identité législative.

- **Saint-Barthélemy**

Le dernier alinéa de l'article L.O. 6214-6 du code général des collectivités territoriales prévoit que : « *La collectivité régleme et exerce le droit d'exploration et le droit d'exploitation des ressources naturelles biologiques et non biologiques des eaux intérieures, en particulier les rades et les étangs, du sol, du sous-sol et des eaux surjacentes de la mer territoriale et de la zone économique exclusive dans le respect des engagements internationaux de la France et des compétences de l'Etat.* »

- **Saint-Martin**

Le dernier alinéa de l'article L.O. 6314-6 du code général des collectivités territoriales prévoit que : « *La collectivité régleme et exerce le droit d'exploration et le droit d'exploitation des ressources naturelles biologiques et non biologiques des eaux intérieures, en particulier les rades et les étangs, du sol, du sous-sol et des eaux surjacentes de la mer territoriale et de la zone économique exclusive dans le respect des engagements internationaux de la France et des compétences de l'Etat.* »

- **Saint-Pierre-et-Miquelon**

L'article L.O. 6414-3 du code général des collectivités territoriales prévoit que : « *L'Etat exerce ses droits de souveraineté et de propriété sur son domaine public et privé, terrestre, maritime ou aérien. Sous réserve des engagements internationaux de la France et des dispositions prises pour leur application, l'Etat concède à la collectivité territoriale, dans les conditions prévues par un cahier des charges approuvé par décret en Conseil d'Etat pris après avis du conseil territorial, l'exercice des compétences en matière d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles, biologiques et non biologiques, du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux surjacentes.*

« *Sous la même réserve et dans les mêmes conditions, il lui concède l'exercice des compétences en matière de délivrance et de gestion des titres miniers portant sur le fond de la mer et son sous-sol.*

« *Les règles relatives à l'assiette, au taux et aux modalités de recouvrement de la redevance spécifique due par les titulaires de concessions de mines et d'hydrocarbures liquides ou gazeux dans la zone économique exclusive française en mer au large de Saint-Pierre-et-Miquelon, établie au bénéfice de la collectivité territoriale, sont fixées par le conseil territorial.* »

Cependant, en raison de l'absence de mise en œuvre des compétences qui ont été attribuées à Saint-Pierre-et-Miquelon pour délivrer les titres miniers en mer, la compétence de l'Etat continue de s'exercer pleinement en mer au large de ces collectivités relevant d'un régime d'identité législative.

- **Polynésie française**

Les alinéas 2 à 4 de l'article 47 de la loi organique n° 2004-192 du 27 février 2004 portant statut d'autonomie de la Polynésie française prévoient que : « *Le domaine public maritime de la Polynésie française comprend, sous réserve des droits de l'Etat et des tiers, les rivages de la mer, y compris les lais et relais de la mer, le sol et le sous-sol des eaux intérieures, en particulier les rades et les lagons, ainsi que le sol et le sous-sol des eaux territoriales.*

« *Les dispositions de l'alinéa précédent s'appliquent sous réserve des emprises nécessaires, à la date de publication de la présente loi organique, à l'exercice par l'Etat de ses compétences et tant que cette nécessité sera justifiée.*

« *La Polynésie française régit et exerce le droit d'exploration et le droit d'exploitation des ressources naturelles biologiques et non biologiques des eaux intérieures, en particulier les rades et les lagons, du sol, du sous-sol et des eaux sur-jacentes de la mer territoriale et de la zone économique exclusive dans le respect des engagements internationaux.* »

Les dispositions des articles L. 671-1 et suivants du code minier organisent la compétence de l'Etat en matière de prospection, de recherche et d'exploitation des matières premières stratégiques.

- **Îles Wallis et Futuna**

La compétence de l'Etat en matière d'exploration et d'exploitation des ressources biologiques et non biologiques s'exerce pleinement au large des îles Wallis et Futuna par l'effet de la lecture combinée des dispositions de la loi n° 61-814 du 29 juillet 1961 conférant aux îles Wallis et Futuna le statut de territoire d'outre-mer et du décret n° 57-811 du 22 juillet 1957 relatif aux attributions de l'assemblée territoriale, du conseil territorial et de l'administrateur supérieur des îles Wallis-et-Futuna, qui ne confèrent aucune compétence à la collectivité en la matière.

Les dispositions des articles L. 691-1 et suivants du code minier organisent la compétence de l'Etat.

- **Nouvelle-Calédonie**

L'article 22 de la loi n° 99-209 du 19 mars 1999 organique relative à la Nouvelle-Calédonie prévoit que : « *La Nouvelle-Calédonie est compétente dans les matières suivantes : (...) 10° Réglementation et exercice des droits d'exploration, d'exploitation, de gestion et de conservation des ressources naturelles, biologiques et non biologiques de la zone économique exclusive ;* ».

Les dispositions des articles L. 681-1 et suivants du code minier organisent la compétence de l'Etat en matière de substances utiles à l'énergie atomique.

- **Terres australes et antarctiques françaises**

La compétence de l'Etat en matière d'exploration et d'exploitation des ressources biologiques et non biologiques s'exerce pleinement au large des Terres australes et antarctiques françaises.

L'article L. 661-2 du code minier prévoit que : « *Les lois et règlements mis en œuvre pour l'exercice des activités régies par le présent code s'appliquent dans les Terres australes et antarctiques françaises aux personnes, aux activités, aux installations et aux dispositifs comme s'ils se trouvaient en territoire métropolitain à l'exception des dispositions relatives au droit d'entrée et de séjour des étrangers, qui demeurent régies par les dispositions particulières applicables à ce territoire.*

« *Ces lois et règlements s'appliquent, dans les mêmes conditions, à l'intérieur des zones de sécurité, au contrôle des opérations qui y sont effectuées ainsi qu'au maintien de l'ordre*

public. »

« Les dispositions du code de l'environnement applicables aux Terres australes et antarctiques françaises en vertu des dispositions du présent article le sont sous réserve de l'application de dispositions plus contraignantes applicables à ce territoire. »

• **Île de Clipperton**

La compétence de l'Etat s'exerce pleinement autour de l'île de Clipperton qui ne constitue pas une collectivité.

Tableau 2-17 Répartition des compétences en matière de réglementation et d'exercice des droit d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles biologiques et non biologiques en mer (Com. Pers. Ministère de l'Outre-Mer, 2013).

		Fonds marins	
Domaine public maritime			
0 < ligne de base		Plateau continental > ou < à ZEE + plateau continental étendu <i>cf. loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 (plateau continental)</i>	
		ZEE 200milles à partir ligne de base <i>cf. art. 55 Convention Montego Bay</i> <i>cf. loi n° 76-655 du 16 juillet 1976(zone économique)</i>	
	Eaux intérieures	Mer territoriale 0 < > 12 milles	Zone contigüe + 12 milles
DOM/ROM MAY		ETAT compétence de droit commun COLLECTIVITE titres miniers (sous réserve absence décrets d'application) Art. L.611-31 et L. 611-32 du CGCT	
SB		COLLECTIVITE Art. LO 6214-6 du CGCT ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique	
SM		COLLECTIVITE sauf exceptions Art. LO 6314-6 du CGCT ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique	
SPM		< ETAT en l'absence de cahier des charges (<i>cf. avis défavorable CE 14 janvier 2003</i>) > < COLLECTIVITE Art. LO 6414-3 du CGCT >	
WF		ETAT Loi n° 61-814 du 29 juillet 1961	
PF		COLLECTIVITE Art. 47 Loi organique n° 2004-192 du 27 février 2004 ETAT Matière premières stratégiques 4° art. 14 Loi organique n° 2004-192 du 27 février 2004	

<p>NC</p>	<p>PROVINCES Art. 45 et 46 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique 7° du I art. 21 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p>	<p>COLLECTIVITE Art. 22 et 45 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>PROVINCES Art. 45 et 46 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique 7° du I art. 21 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p>	<p>COLLECTIVITE 10° de l'art. 22 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique 7° du I art. 21 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p>	<p>COLLECTIVITE 10° de l'art. 22 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>ETAT pour les substances utiles à l'énergie atomique 7° du I art. 21 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p>	<p>ETAT 12° de l'art. 21 LO n° 99-209 du 19 mars 1999</p> <p>Avis du CE n° 369.022 du 3 juin 2003</p>
<p>TAAF</p>	<p>ETAT Loi n° 55-1052 du 6 août 1955 + Art. L. 661-1 et L. 661-2 du code minier</p>				

2.3.6. Législations nationales autres que française

La direction de l'initiative parlementaire et des délégations a publié en mars 2013 une note sur les ressources minérales marines profondes (nodules polymétalliques, encroûtements et sulfures hydrothermaux). Ce document comprend notamment des observations résultant de l'analyse des législations des Etats-Unis, du Brésil, des Iles Cook, de s Iles Fidji, de la Nouvelle-Zélande et de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Elles sont reprises ci-dessous.

2.3.6.1. *Les Etats-Unis*

Ressources localisées sur le plateau continental

En 1953, les Etats-Unis adoptent dans le Code Fédéral américain une loi relative au plateau continental (*Outer Continental Shelf Lands Act*). Cette loi vise les hydrocarbures, le gaz, le soufre et les autres minéraux situés dans les fonds marins et le sous-sol du plateau continental. Suivant cette loi, ces ressources sont considérées sous leur juridiction.

Ressources situées au-delà de leurs juridictions nationales

En 1980, les Etats-Unis adopte une loi relative aux ressources minérales solides des grands fonds marins (*Deep Seabed Hard Minerals Resources Act*) qui vise les nodules métalliques et polymétalliques au-delà de leur juridiction, sans affirmer « leur souveraineté, leurs droits souverains ou exclusifs, leur juridiction ou bien encore leur propriété sur des zones ou des ressources dans les grands fonds marins ». Cette loi s'applique aux citoyens et navires américains ainsi qu'aux navires soumis à la juridiction des Etats-Unis.

Les Etats-Unis n'ont pas ratifié la Convention des Nations Unis sur le Droit de la Mer. Ils ont cependant accordés, selon la procédure relative à la loi de 1980, quatre licences d'exploration dans la zone Clarion-Clipperton, en 1984, à des consortiums internationaux comprenant des entreprises américaines. Les Etats-Unis ont conclu des accords bilatéraux avec les Etats concernés « *en vertu desquels ceux-ci d'engagent à s'abstenir de toute immixtion dans les revendications des Etats-Unis et des entreprises américaines dans la zone de Clarion-Clipperton* ».

2.3.6.2. *Le Brésil*

Les ressources localisées dans la ZEE et sur le plateau continental sont régies par le code minier comme celui des activités terrestres. L'exploration est soumise à l'obtention d'une autorisation de recherche et l'exploitation à l'obtention d'un acte de concession d'exploitation. Certaines règles en matière d'environnement sont également applicables.

2.3.6.3. *Les Iles Cook*

Les îles Cook sont un Etat libre associé à la Nouvelle-Zélande. Elles disposent de droits souverains sur les ressources naturelles situées dans les fonds marins de leur ZEE, laquelle dispose d'importantes ressources minérales, notamment des nodules.

Jusqu'en 2009, le régime d'exploration et d'exploitation des minéraux de la ZEE des îles Cook figurait à l'article 5 de la loi néo-zélandaise de 1964 sur le plateau continental (*Continental Shelf Act 1964*). En 2009, le gouvernement des îles Cook a adopté la loi sur l'exploitation minière du fonds de la mer (*Seabed Mining Act 2009*), celle-ci est entrée en vigueur le 1^{er} mars 2013. Cette loi prévoit la création de l'Autorité des minéraux du fonds de la mer (*Cook Islands Seabed Minerals Authority – SBMA*) qui met en œuvre la réglementation, la nomination de son responsable (*Seabed Minerals Commissioner*) et la création d'un conseil consultatif (*Seabed Minerals Advisory Board*) chargé de conseiller la SBMA. La SBMA est en charge de délivrer les permis de prospection, les licences d'exploration, les déclarations de localisation, les baux de conservation sur un ou plusieurs « blocs » et les licences minières.

La SBMA travaille également à la gestion financière des futurs revenus de l'exploitation minière des fonds marins et sur la gestion environnementale de ces activités dans la ZEE.

La réglementation des Iles Cook prévoit également la consultation de la population et des parties concernées par l'exploitation.

2.3.6.4. *Les Iles Fidji*

Fin 2011, 17 licences d'exploration en eaux profondes avaient été délivrées par les Fidji.

Les règles actuelles en matière minière sont issues d'une loi de 1978 modifiée. L'adaptation de ce cadre législatif est en cours depuis 2007, suite à l'institution d'un moratoire sur la délivrance d'autorisations d'exploration émis par le Gouvernement. En 2010, un amendement à la loi minière a été adopté, définissant le concept de territoire, son étendue et son mode de division (en « bloc »). Les redevances associées à l'exploitation ont également été définies la même année. De nombreuses questions sont en cours de réflexion, notamment la délimitation des ZEE des eaux riveraines, l'adoption d'une réglementation relative à cette zone, la prise en compte des droits de pêche et de navigation, la mise en œuvre du suivi des activités minières, les questions d'hygiène et de sécurité, les mécanismes de redistribution des profits tirés de l'exploitation au bénéfice des populations et les impacts environnementaux.

2.3.6.5. *La Nouvelle-Zélande*

La ZEE de la Nouvelle-Zélande contient des champs de nodules.

Ce pays a engagé un processus de mise à jour de sa législation dans le cadre du « Plan pétrole » lancé en 2009. Il a notamment adopté une loi imposant des normes environnementales dans sa ZEE et sur le plateau continental. Cette dernière implique

notamment l'obligation d'obtenir une autorisation pour toute activité qui procède à la collecte de substance non vivante du fonds des mers et de leurs sous-sols, détériore le fond ou le tréfonds de la mer et entraîne la destruction, des dommages ou des inconvénients pour le fonds ou le tréfonds, de sorte qu'il en résulte des effets néfastes sur les espèces marines ou leurs habitats. Une évaluation des impacts environnementaux doit également être obtenue.

2.3.6.6. *La Papouasie-Nouvelle-Guinée*

En janvier 2011, la Papouasie-Nouvelle-Guinée a délivré le permis « Solwara 1 » à la société Nautilus Minerals Inc. Ce permis vise l'exploitation des sulfures massifs situés à 1600 m de profondeur dans la mer de Bismarck.

La législation minière de ce pays résulte de trois lois : la loi minière (1992), la loi sur l'Autorité des Ressources minérales (2005) et la loi sur l'environnement (2000).

2.3.4. Conclusion

Les conclusions portées par le document du Sénat (2013) suite à l'analyse de six législations (Brésil, Etats-Unis, Iles Cook, Iles Fidji, Nouvelle-Zélande, Papouasie-Nouvelle-Guinée) sont les suivantes :

- *les nodules, encroûtements et sulfures hydrothermaux demeurent des objets juridiques assez mal identifiés ;*
- *le besoin de règles en matière d'exploitation minière sous-marine se fait sentir quelles que soient les difficultés rencontrées pour concevoir ces normes ;*
- *le respect de l'environnement s'avère une préoccupation partagée ;*
- *un besoin de coopération internationale se fait sentir pour éviter vides juridiques et « moins disant législatif ».*

Le document LC234 du Sénat propose également un tableau comparant les législations nationales de plusieurs pays (Tableau 2-18).

Tableau 2-18 Comparaison des législations nationales (Sénat, 2013) relatives aux ressources minérales marines profondes.

Concerne uniquement le Brésil, Etats-Unis, Iles Cook, Iles Fidji, Nouvelle-Zélande et Papouasie-Nouvelle-Guinée.

Questions	Brésil	Etats-Unis	Iles Cook	Iles Fidji	Nouvelle-Zélande	Papouasie-Nouvelle-Guinée
Les pouvoirs publics ont-ils entamé une réflexion sur le sujet ?	oui	non	oui	oui	oui	Oui
Existe-t-il une législation générale relative à l'exploration des substances minérales sous-marines ?	non	oui	oui	oui	En cours de refonte	Oui
Existe-t-il des dispositions spécifiques pour :						
- les nodules polymétalliques ?	non	Oui hors plateau continental	oui	non		Non
- les encroûtements ?	non	non	-- ¹	non	-- ¹	Non
- les sulfures hydrothermaux ?	non	non	-- ¹	non		Non
Une modification de la législation relative aux substances minérales sous-marines est-elle envisagée ?	non	non	oui	oui	elle est entamée en matière environnementale	Non
Des permis d'exploration ont-ils été accordés par l'État dans sa ZEE ou sur son plateau continental ?	non	non	-- ¹	oui	-- ¹	Oui

¹ L'étude n'a pas permis de préciser ce point.

2.4. Connaissance et degré d'exploration des différentes ressources

Les ressources minérales actuellement exploitées sont celles situées uniquement à très faible profondeur sur le plateau continental. On peut citer le sel, les placers et les granulats, qui représentent une activité très importante et dont l'exploitation est ancestrale avec des techniques éprouvées. Les phosphates peuvent également être concentrés dans les sédiments marins et font l'objet de plusieurs projets d'exploitation. Les dépôts de phosphates pouvant être considérés comme ressources potentielles se trouvent par exemple dans les zones d'upwelling du plateau continental, comme au large de l'Espagne. En Europe, de nombreux dépôts de placers ont été identifiés mais n'ont pas encore fait l'objet d'une exploitation. De même, des niveaux de sel (évaporites) de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur ont été identifiés dans les sédiments de Méditerranée d'âge Miocène (> 5 Ma). L'intérêt de ce type de ressources reste limité, en dehors de leur participation potentielle à la formation de réservoirs pétroliers. A noter également l'exploitation minière de charbon qui peut, dans certains cas, atteindre les zones côtières (par exemple en Angleterre).

Dans ce chapitre, après un bref rappel sur les minéralisations exploitées sur le plateau continental, nous traiterons plus particulièrement des minéralisations profondes en présentant les caractéristiques principales de leurs environnements géologiques, de leur composition et des processus géochimiques conduisant au transport et à la concentration des métaux.

2.4.1. Les ressources minérales de faible profondeur

2.4.1.1. *Placers de minéraux lourds*

Certains minéraux de forte densité peuvent être enrichis dans les formations sédimentaires marines sous forme de "placers". Ces minéraux, originellement issus des roches continentales et extraits lors des processus d'altération, sont transportés par les fleuves sur plusieurs kilomètres avant de finir dans les océans. Il est remarquable de constater la multitude de dépôts de placer et le faible nombre d'exploitations actuelles ou passées. En comparaison, les placers fluviaux constituent des ressources économiques largement plus importantes que les placers en domaine marin (Minter and Craw, 1999). On trouve les placers marins sur les plages côtières et le plateau continental (Kudrass, 2000). Ces dépôts sont surtout exploités pour l'étain (7 % de la production mondiale), l'or, le platine, le titane, le chrome, le zirconium et les terres rares. La Malaisie, premier producteur mondial d'étain, extrait 30 % de sa production des placers sous-marins. En Thaïlande et en Indonésie, 50 % de la production d'étain proviennent de l'océan. Les placers marins peuvent s'étendre du plateau continental jusqu'aux plaines abyssales où ils deviennent inaccessibles.

2.4.1.2. *Diamants*

Les diamants issus des formations géologiques continentales sont transportés par les rivières et se retrouvent dans les sédiments marins du plateau continental. Des zones diamantifères sont exploitées au large de la Namibie et de l'Afrique du Sud. L'exploitation s'effectue jusqu'à 200 mètres de profondeur. Depuis le début des années 90, la société De Beers extrait 50 % de sa production à partir des gisements sous-marins. Plus de 75 millions de carats ont été produits au large de la côte de Namibie (jusqu'à 5,5 km) depuis le début d'exploitation, représentant le plus grand gisement de ce type (Schneider and Miller, 1992). En général, la richesse des placers en diamants est conditionnée par la présence de roches volcaniques de type kimberlites riches en diamants qui ont été érodées, transportées et accumulées sur plusieurs dizaines de millions d'années (Spaggiari, 2006).

2.4.1.3. *Phosphates*

Les dépôts de phosphates font partie d'un cycle biogéochimique global qui implique la dissolution et le transport de phosphore par les rivières dans les océans, l'utilisation par le phytoplancton et le transfert dans les océans profonds par les processus de reminéralisation des débris biologiques en profondeur. Les dépôts de phosphates se forment sur des terrasses sous-marines, dans des zones de forte productivité liée à des remontées d'eau profonde (upwelling) riches en éléments nutritifs (Burnett, 1990; Jahnke, 1983; Manheim, 1980). On les trouve généralement par des fonds inférieurs à 1 000 mètres dans les régions tropicales. La plupart des dépôts sont d'âge Miocène (5 à 23 millions d'années). La formation de « nodules » de phosphate est très lente, avec un taux d'accroissement de 1 à 10 millimètres en 1 000 ans avec des concentrations de 12 à 18 % en phosphates. Certaines concentrations de phosphates peuvent également être enrichies en uranium. Le phosphore est un nutriment nécessaire à la croissance de tous les organismes vivants. Sa consommation mondiale annuelle est de 150 millions de tonnes – avec une grande quantité utilisée pour l'agriculture. Les réserves connues à terre représentent environ une cinquantaine d'années de consommation. En 2007, un permis d'exploration avait été lancé par la société Bonaparte Diamond Mines Pty Ltd (société

rachetée par Minemakers en 2009) sur ce type de dépôt au large de la Namibie à des profondeurs comprises entre 150 et 300 mètres. La filiale Namibian Marine Phosphate (Pty) Ltd (NMP) est maintenant en charge de développer le projet d'exploitation dans cette région. La découverte d'un gisement suffisamment riche – de l'ordre de 50 millions de tonnes de sédiments contenant entre 10 et 15 % de phosphates – permettrait une exploitation rentable pendant une vingtaine d'années. Plus récemment, la société Chatham Rock Phosphate Ltd a obtenu un permis d'exploration au large de la Nouvelle-Zélande depuis septembre 2012, avec bientôt un permis minier.

2.4.1.4. *Sables et graviers marins*

Les granulats marins sont les sables et graviers, siliceux et calcaires, extraits des fonds marins. Ils sont concentrés au niveau des zones littorales (plage et cordon littoral) et sont apportés à la fois par les rivières mais aussi par les vagues et courant marins. Il s'agit généralement d'anciennes alluvions qui ont été déposées dans l'axe des vallées fluviales ; ils sont de même nature géologique que les sables et graviers des gisements terrestres. Les granulats sont actuellement les ressources marines les plus exploitées. Bien que les ressources géologiques soient abondantes, les gisements exploitables sont beaucoup plus réduits.

Les sables et graviers siliceux sont destinés à la fabrication des bétons, à l'activité maraîchère et au rechargement des plages alors que les sables coquilliers sont utilisés comme amendement calcaire et correcteur de l'acidité des sols (Cruickshank, 1988). La valeur annuelle de la production mondiale des granulats marins a été estimée pour l'année 2000 à 3000 millions de dollars (US); correspondant (en millions de tonnes) à 70 pour le Japon, 24 pour l'Angleterre, 36 pour les Pays Bas, 18 pour le Danemark, 7 pour l'Allemagne, et 3 pour la France et la Belgique (Rona, 2008). Les prospections sur le plateau continental français ont permis d'estimer la ressource à plus de 30 milliards de m³.

2.4.1.5. *Les sels marins*

Un grand nombre de composés et d'éléments ont été traditionnellement extraits de l'eau de mer, tels que le sel (chlorure de sodium), le magnésium et le brome. Au-delà de l'importance majeure qu'a pu représenter le sel pour l'humanité, le magnésium et le brome sont très utilisés dans l'industrie civile et militaire (Thys, 2003).

2.4.2. Les nodules polymétalliques

2.4.2.1. Introduction et contexte

Les nodules polymétalliques forment des boules sombres de 5 à 10 cm de diamètre (Figure 2-3) contenant environ 40 % d'eau. Ils sont principalement composés d'hydroxydes de manganèse et de fer. Les couches les mieux cristallisées sont les plus riches en nickel et en cuivre qui ne forment pas de minéraux spécifiques mais sont au contraire incorporés dans les réseaux cristallins des hydroxydes de manganèse et de fer. Outre les métaux de base (cuivre, nickel, cobalt), les nodules contiennent des métaux plus rares (terres rares, lithium, thallium, tellure, molybdène) dont l'importance économique est croissante pour les technologies de pointe (électronique) et les technologies liées au développement de l'énergie verte (moteurs électriques, nouvelle génération de cellules photovoltaïques).

Les premiers nodules ont été récoltés par faible profondeur dans la mer de Kara en 1868. Puis, entre 1873 et 1876, le navire britannique Challenger a démontré que les nodules étaient communs dans les grands fonds océaniques (Thomson, 1873). Leur intérêt minier a été souligné dès les années 1950 du fait de teneurs en nickel égales ou supérieures à celles des gisements de latérites, de teneurs en cuivre supérieure à celles des grands gisements de porphyre cuprifère (0,5 % de cuivre) exploités à terre et de concentrations en cobalt similaires à celles des gisements terrestres (Hammond, 1974a; Hammond, 1974b; Hoffert, 2008; Menard and Shippek, 1958). La prise de conscience de l'importance économique potentielle des nodules conduisit le président Johnson en 1966 à demander que les grands fonds soient déclarés « patrimoine commun de l'humanité ». Cette résolution fut reprise en 1970 par l'Assemblée Générale des Nations Unies et aboutit à la création de l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) ou *International Seabed Authority* (ISA) (McKelvey, 1980; Shapley, 1973).

2.4.2.2. Localisation

Actuellement, des nodules ont été reconnus dans tous les océans et sous toutes les latitudes (Figure 2-4) (Heath, 1979; Smith et al, 1968) et même dans certains fjords (Grill et al, 1968) et lacs (Moore, 1981; Rossmann and Callender, 1968). Les zones à nodules pouvant être considérées comme potentiellement exploitables se situent au niveau des plaines abyssales au-delà de 3 500 m de profondeur. Les nodules se situent généralement sur le fond océanique mais une proportion non négligeable est également enfouie dans le sédiment (Hoffert, 2008; Kotlinski and Stoyanova, 2007). Dans certains cas, les nodules peuvent couvrir 90 % de la surface au-dessus du sédiment (Kuhn et al, 2011). Les nodules ont été observés dans de nombreux domaines océaniques, allant du plateau continental jusqu'à des profondeurs de 6 500 m. Cependant, leur abondance et leur richesse en métaux varie beaucoup en fonction du contexte géologique et océanique.

La zone Clarion-Clipperton dans le Pacifique nord équatorial, qui fait l'objet de nombreux permis miniers, est particulièrement bien étudiée (Anderson and Davis, 1973; Morgan, 2000). Des estimations récentes sur cette zone montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km² (soit 15 % des fonds du Pacifique situés entre 4 000 et 5 000 m), la masse des nodules représente 34 milliards de tonnes, soit l'équivalent de 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt (Hoffert, 2008). Les données récentes obtenues à partir des submersibles montrent des

répartitions hétérogènes qui impliquent un travail fin de cartographie et d'échantillonnage afin de sélectionner de manière précise les zones les plus favorables à une exploitation. D'autres zones riches en nodules ont également été bien étudiées dans le bassin du Pérou (Bollhofer et al, 1999; Grupe et al, 2001; Stackelberg, 1997; Thijssen, 1981) ainsi que dans l'océan Indien central (Banerjee and Mukhopadhyay, 1991; Chakraborty and Kodagali, 2004; Jauhari and Pattan, 2000; Kennett and Watkins, 1975). Des champs de nodules ont été également observés dans le bassin Argentin dans l'Atlantique du Sud-Ouest (Kasten et al, 1998) et l'océan Arctique, même si ces zones restent peu explorées.

D'une manière générale, les nodules sont abondants dans les plaines abyssales où l'océan profond est bien oxygéné et où les taux de sédimentation sont faibles (moins de 100 m par million d'années). La profondeur à laquelle peuvent se former les nodules est essentiellement liée à la profondeur de compensation des carbonates, (souvent abrégé en "CCD", pour Carbonate Compensation Depth en anglais). Celle-ci correspond à la profondeur à laquelle la totalité du carbonate de calcium apporté depuis la surface est dissoute (Rea and Leinen, 1985). Sous la CCD, les sédiments appauvris en carbonate se trouvent enrichis en particules détritiques et biogéniques, formant une boue siliceuse. Dans ce contexte, la dégradation de la matière organique et la présence de nucléus permet la formation des nodules et l'enrichissement en métaux (Ni, Cu etc.) (Cronan, 2006; Verlaan et al, 2004). La taille des nodules varie largement entre 0.5 cm et 25 cm de diamètre avec une moyenne entre 5 et 10 cm. Par exemple, à partir de la mesure de plus de 6 700 nodules de la zone de CCFZ, Morgan (2000) a déterminé un diamètre médian de 6 cm.

Dans la zone Clarion-Clipperton, les sédiments sont composés de radiolaires (30 %) et d'hydroxyde de fer et de manganèse. Ils reposent sur une croûte volcanique formée à l'axe de la dorsale Pacifique il y a 30 à 40 millions d'années (Menard and Frazer, 1978). Les reliefs, de 100 à 300 m de haut, allongés selon une direction Nord-Sud sur plusieurs dizaines de kilomètres, sont hérités de la dorsale du Pacifique (Menard, 1967). Les failles affectant les sédiments sont situées au droit des failles du socle basaltique. La topographie en rides et vallées parallèles, héritée de la dorsale, est indispensable à la formation des nodules (Hoffert, 2008). Elle permet le déplacement secondaire des particules sédimentaires par phénomènes gravitaires et courants, ce qui aboutit à générer localement les zones à faible vitesse de sédimentation dans lesquelles les nodules peuvent se former. Il en résulte une disposition régionale discontinue de champs de nodules de quelques km², à l'intérieur desquels les faciès morphologiques de nodules varient latéralement.

2.4.2.3. *Composition*

L'étude des concentrations en éléments majeurs et traces des nodules est d'intérêt pour caractériser ces ressources minérales potentielles mais aussi pour en étudier les processus de formation et l'importance dans les cycles globaux (Barnes, 1967; Bender et al, 1966; Elderfield, 1972; Goldberg and Picciotto, 1955; Usui, 1979).

Dans les nodules les plus riches du Pacifique (CCFZ) la concentration moyenne est de 1 % en cuivre, 1.30 % en nickel, 2 % en cobalt et 28 % en manganèse (Hein et al, 2013). D'une manière générale les nodules du Pacifique sont plus riches en ces éléments que les nodules des océans Indien et Atlantique mais de grandes variations existent localement (Cronan, 1972). L'abondance en métaux (Ni, Cu, Co) des nodules est contrôlée à la fois par l'abondance

et la minéralogie des phases majeures de Fe et Mn et par les différentes sources et processus impliqués dans leur formation.

Quatre groupes importants d'éléments sont identifiés dans les nodules (Figure 2-20): les éléments associés aux (1) oxydes de fer (Fe, As, Pb, Ti, Zr, Ce, Y, Te, Pt); (2) oxydes de manganèse (Mn, Cu, Ni, Zn, Mo, Tl); (3) carbonates et phosphates (Ca, P, Sr); et (4) silicate/argiles (Si, Al, K, Rb). Des éléments semblent avoir un caractère mixte, tels que le Th et Co (Li, 1982). Cette association est particulièrement claire pour Ni et Cu qui montrent une bonne corrélation avec les rapports Mn/Fe, confirmant que la todorokite des nodules diagenétiques est la phase porteuse de ces éléments (Siegel and Turner, 1983; Turner, Siegel et al, 1982).

Au-delà de ces éléments, le lithium est un élément d'importance économique (Jiang et al, 2007) qui est particulièrement enrichi dans les nodules diagenétiques (riches en todorokite) par rapport aux nodules hydrogénétiques. Le cobalt montre une tendance inverse avec un enrichissement plus important dans les nodules hydrogénétiques. Il est en revanche important de souligner que les concentrations en éléments mineurs "exotiques" tels que le Ge, In, Ag, Te etc. restent remarquablement peu documentées, notamment à cause de leur faible concentration qui nécessite des techniques analytiques pointues.

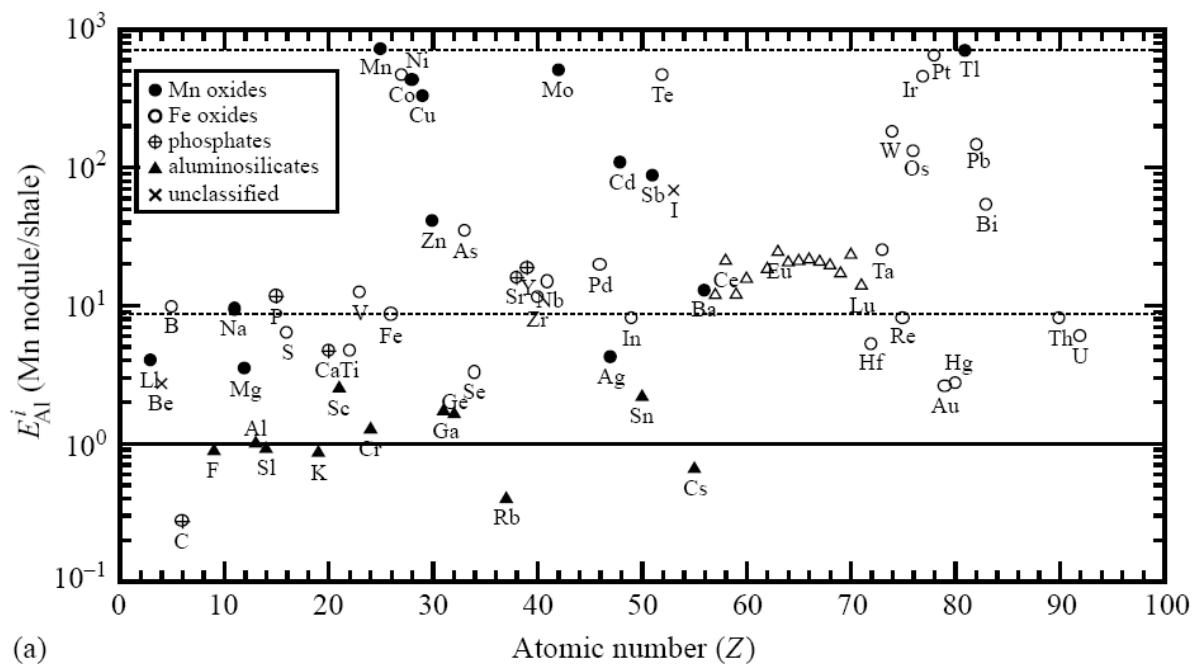


Figure 2-19 Facteur d'enrichissement des éléments majeurs et traces dans les nodules. *Le facteur d'enrichissement correspond à la concentration d'un élément dans le nodule (en moyenne) normalisée à sa concentration dans la croûte continentale (source principale des métaux). L'association spécifique des différents éléments pour certaines phases minéralogiques principales des nodules est également représentée. D'après (Li and Schoonmaker, 2003).*

2.4.2.4. Classification, source des éléments, et mode de formation

Deux grands types de nodules peuvent être distingués en fonction de leur mode de formation, origine des éléments et composition chimique (Figure 2-20):

- (1) les nodules à surface lisse d'origine purement hydrogénétiques, c'est-à-dire générés à partir des éléments contenus dans l'eau de mer,
- (2) les nodules diagénétiques, à surface rugueuse, générés à partir d'éléments contenus dans le sédiment enrichi en manganèse.

Le premier type, reposant sur le sédiment, est pauvre en manganèse ($Mn/Fe < 2,5$) tandis que le second, partiellement enfoui dans les sédiments, est enrichi en manganèse ($Mn/Fe > 4$). La plupart des nodules d'intérêt économique ont des caractéristiques intermédiaires, avec une surface supérieure lisse d'origine hydrogénétiques et une surface inférieure rugueuse d'origine diagénétique.

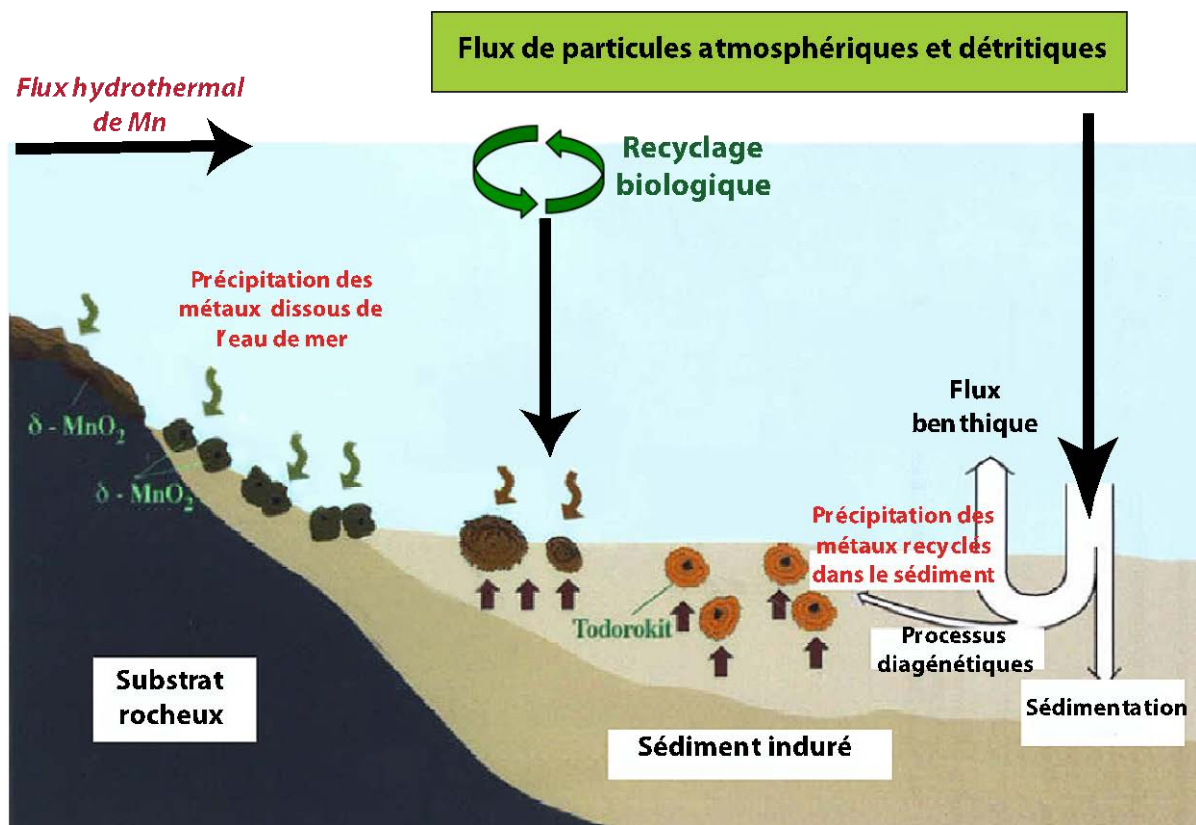


Figure 2-20 Schéma du contexte favorable à la formation des nodules.

Bien que les nodules se forment en contexte sédimentaire, l'origine des métaux dans les nodules est multiple. La consommation des métaux à la surface des océans par le plancton permet leur transport (en partie seulement) dans les sédiments profonds. Les processus diagénétiques et le piégeage direct de l'eau de mer (processus hydrogénétiqque) permettent la croissance des nodules et leur enrichissement en métaux traces (Source ISA). Une contribution hydrothermale dans la colonne d'eau est également possible.

Afin de pouvoir définir les différents types et mode de formation des nodules, il convient donc d'apporter des éléments de réponse à quatre questions fondamentales :

- Quelles sont les sources en éléments majeurs (fer et manganèse) et éléments trace (cuivre, zinc, nickel etc..) les composants ?

Quels sont les processus mis en jeu pour leur formation et accumulation ?

Quels sont les environnements privilégiant leur formation ?

Avec quelle rapidité se forment-ils ?

Trois sources d'éléments particuliers ou dissous sont possibles dans les océans (Figure 2-22):

- (1) l'apport par les fleuves de produits de l'érosion continentale ;
- (2) l'apport atmosphérique, qui constitue la source principale de fer et des autres métaux dans les océans – incluant les poussières volcaniques, désertiques et dans une moindre mesure les poussières cosmiques ;
- (3) les sources hydrothermales, qui peuvent avoir un impact local – mais potentiellement très important dans les océans profonds.

Concernant les sources chimiques des métaux formant les nodules, il convient de distinguer (Arrhenius et al, 1964; Cronan, 1972; Greenslate, 1974a) (Figure 2-22):

- (1) une source biogénique, issue de la dégradation des débris d'organismes d'origine planctonique lors de la diagenèse sédimentaire (matière organique et tests siliceux et calcaires) ;
- (2) une source lithogénique, issus de la transformation diagénétique des phases minérales argileuses ou volcaniques constituant les sédiments (processus halmyrolitique) ;
- (3) apport hydrogéné (ou océanique), issus de l'incorporation direct des métaux de l'eau de mer. Bien sûr, les métaux sous forme dissoute ou particulaire dans l'eau de mer peuvent être eux-mêmes influencés par les apports continentaux et hydrothermaux et recyclés par l'activité biologique.

A noter que, malgré la présence avérée de particules cosmiques dans les sédiments associés aux nodules, la source extraterrestre est négligeable par rapport aux autres sources citées ci-dessus (Finkelman, 1970; Ganapathy et al, 1978; Sano et al, 1985).

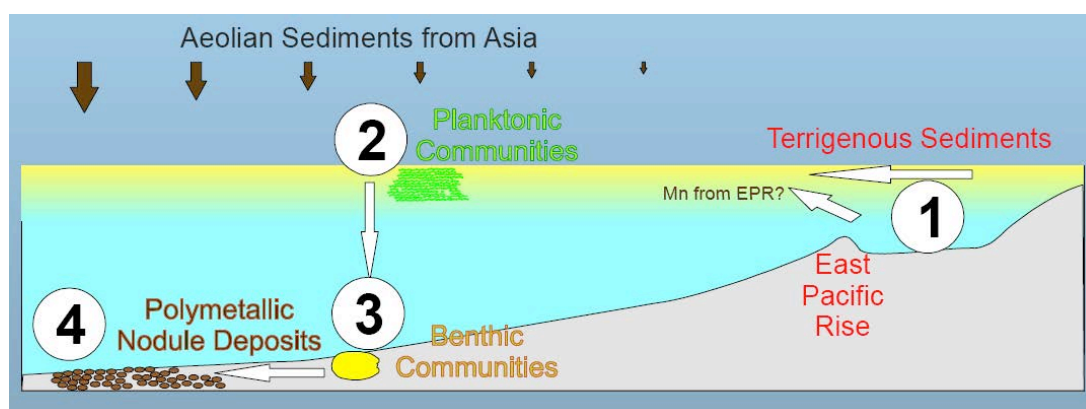


Figure 2-21 Les hypothèses concernant les différentes sources de métaux impliquées dans la formation de nodules de la zone de CCZ.

- (1) source de métaux d'origine externe : particules terrigènes, éoliennes, hydrothermales
- (2) recyclage des métaux dans la colonne d'eau océanique par les processus biologiques;
- (3) dégradation des débris organiques et recyclage des métaux lors de processus diagénétiques dans le sédiment;
- (4) incorporation des métaux dans les nodules à partir des fluides sédimentaires et directement de l'eau de mer (Document de l'ISA).

La source des métaux de base (majeurs) (cf. encadré) des nodules, à savoir le fer et manganèse, est donc multiple. Le fer, de par son abondance majeure dans les réservoirs géologiques, proviendrait essentiellement des particules atmosphériques alors que le manganèse, de par sa plus lente cinétique d'oxydation dans l'eau de mer, sera plus facilement influencé par les sources hydrothermales même distales. La source diagénétique souvent évoquée dans la genèse des nodules ne peut donc constituer une source mais doit plutôt être vue comme un processus de recyclage ou de concentration du fer, du manganèse et des métaux associés dans la pile sédimentaire (Heggie and Lewist, 1984; Presley et al, 1967). En fait, la part relative des apports atmosphériques ou hydrothermaux dans l'enrichissement en fer (et en manganèse) des sédiments métallifères et des nodules est débattue depuis très longtemps (Bonatti and Joensuu, 1966; Bostrom, 1970b). L'utilisation croissante des outils isotopiques, qui permettent un traçage des sources et du processus de recyclage du fer et des autres métaux tels que le nickel, molybdène, thallium, et cadmium devrait donner des informations utiles à ce sujet (Horner et al, 2010; Levasseur et al, 2004; Rouxel et al, 2003) et ainsi ouvrir de nouvelles perspectives de recherches.

Encadré : L'importance des métaux dans l'activité biologique des océans

Depuis une vingtaine d'année, notre vision de l'importance des métaux traces pour l'activité biologique et le cycle de carbone dans les océans a radicalement changé (Graham, 1959; Morel et al, 2004). De nombreuses études, utilisant à la fois une approche en laboratoire sur culture et de terrain ont montré que les métaux traces étaient capables de contrôler la productivité biologique et la structure des communautés phytoplanctoniques (Barbeau et al, 2001; Bruland et al, 1991; Cullen et al, 1999; Morel and Price, 2003; Morel et al, 1994; Wells et al, 1995).

Ainsi, il a été démontré que le fer pouvait avoir un effet bio-limitant dans les océans, en particulier dans de vastes régions océaniques où les autres éléments nutritifs sont relativement abondants (Coale et al, 1996; Martin, 1990). Dans ce contexte, un apport de fer à la surface des océans pourrait provoquer l'efflorescence de phytoplancton et stimuler ainsi la pompe biologique à carbone là où elle est peu active.

Au-delà du fer, les autres métaux micronutriments tels que le cadmium, cobalt, cuivre, manganèse, nickel et zinc ont suscité un intérêt particulier, à la fois concernant leur cycle biogéochimique, mais également leur fonction métabolique pour les différentes espèces de phytoplancton (Dupont et al, 2010; Morel et al, 2004). Le caractère à la fois indispensable et toxique ont également été étudiés pour le Cd, Cr, Cu, Se and Hg (Morel and Price, 2003; Yang and van den Berg, 2009), en particulier dans les régions côtières affectées par les activités humaines (Mann et al, 2002; Sunda and Huntsman, 1996). Pour tous ces métaux, il est maintenant bien admis que la spéciation des métaux, à la fois inorganique (ex : états Redox) et organique (ex : ligands) joue un rôle important dans leur biodisponibilité et degré de toxicité.

La source des métaux des nodules est également multiple et différente en fonction des éléments considérés. Ainsi, l'enrichissement en métaux tels que le Co, Cu, Ni, et Zn est très faible dans les nodules diagénétiques à taux de croissance rapide, comparés aux nodules hydrogénétiques. Cette même observation est d'ailleurs applicable aux sédiments métallifères d'origine hydrothermale (Bostrom and Peterson, 1966; Hein et al, 1994). Cet appauvrissement relatif des métaux (Co, Ni, Cu) dans les sources diagénétiques et hydrothermales, qui provient de leur faible abondance crustale par rapport au Fe et Mn a d'ailleurs permis d'établir des critères géochimiques simples pour leur classification (Figure 2-22).

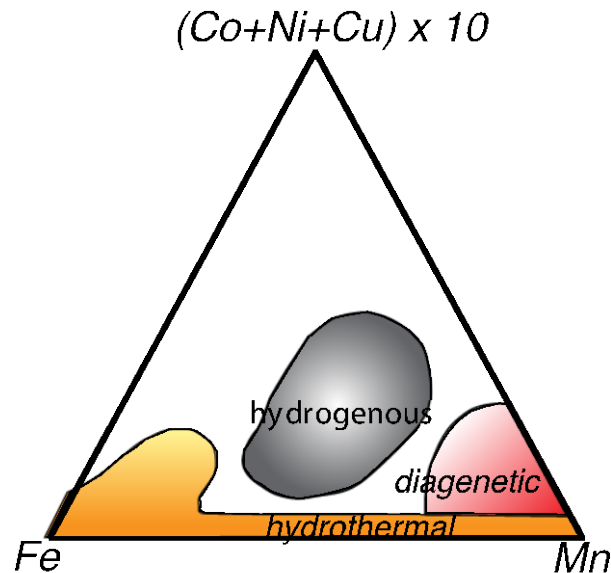


Figure 2-22 Diagramme ternaire montrant les différents domaines de classification des dépôts métallifères océaniques : "hydrogénétique", "hydrothermal" et "diagénétique".

Cette classification est basée sur l'enrichissement relatif en Fe, Mn et métaux traces (Co, Ni, Cu). D'après (Bonatti and Joensuu, 1966; Hein et al, 1994)

De même, l'enrichissement relatif en Cu et Ni des sédiments pélagiques, et donc des nodules associés, est généralement lié aux zones océaniques où la productivité marine en surface est importante (mesurée par exemple par les concentrations en chlorophylle). Ceci montre donc l'importance de l'activité biologique planctonique dans l'enrichissement et le transfert (effet de pompe biologique) des métaux dans les océans profonds. Dans le détail, il semblerait que le Cu et Ni qui sont particulièrement enrichis dans la zone CCFZ, proviennent de la prédominance de débris d'organismes siliceux (radiolaires) dans le sédiment. La minéralogie des phases minérales est également un paramètre fondamental pour expliquer les enrichissements de ces métaux traces.

En revanche, le cobalt qui est également enrichi dans les nodules proviendrait essentiellement de l'eau de mer sans effet majeur de la pompe biologique. Ceci proviendrait de la forte affinité du Co dissous dans l'océan profond pour les oxyhydroxydes de Mn (Burns, 1965). Dans une certaine mesure, la même hypothèse peut être émise pour les terres rares et autres métaux traces tels que Te et Tl qui ont une forte affinité pour les phases oxyhydroxydes de Mn et de Fe.

En résumé, les modèles actuels admettent une origine exclusivement sédimentaire des nodules (Kerr, 1984a). La vie, la dynamique des plaques lithosphériques, les variations climatiques globales jouent un rôle primordial dans leur genèse. La formation des nodules est donc indépendante du volcanisme actif, même si l'hydrothermalisme océanique représente une source importante de manganèse océanique (Smith, 1977). Par contre, il faut souligner l'importance de la vie à toutes les échelles dans la genèse des nodules. Les fragments d'organismes servent souvent de nucléus pour la formation des nodules. En coupe, les nodules apparaissent formés de couches concentriques matérialisant les zones de croissance. Le cœur est souvent constitué d'anciens nodules, de fragments rocheux (basalte, calcaire,...), de restes d'animaux et parfois de dents de requins (Burns and Burns, 1975).

Enfin, par leur implication dans les processus d'oxydo-réduction, les micro-organismes jouent certainement un rôle important dans les processus de mise en solution puis de précipitation des métaux concentrés dans les nodules (Fredericks-Jantzen et al, 1975; Greenslate, 1974;

Harada and Nishida, 1976; Hariya and Kikuchi, 1964). En définitive, il n'y a pas plusieurs phénomènes de croissances de nodules, mais des nodules qui ont des histoires géologiques différentes.

La formation de concrétions d'hydroxydes de fer et de manganèse en contexte sédimentaire est donc un phénomène ubiquiste mais assez complexe. Les nodules se forment dans des conditions optimales qui couplent (1) l'environnement sédimentaire et géodynamique, à la fois régional et local; et (2) les paramètres océaniques et de productivité biologique (Figure 2-23). Ainsi, les nodules ne se rencontrent que dans une petite partie des fonds océaniques à des profondeurs supérieures à 4 000 m, dans les zones permettant la dissolution des carbonates en raison de la plus grande solubilité du CO₂ avec la pression (Peterson, 1966). Enfin, il existe un taux de sédimentation optimal pour la formation des nodules : en dessous de 2 mm pour 1 000 ans, seuls des encroûtements hydrogénés se forment, tandis qu'au-dessus de 10 mm pour 1 000 ans on passe d'un sol sous-marin à un sédiment et les mécanismes de formation des nodules sont inhibés.

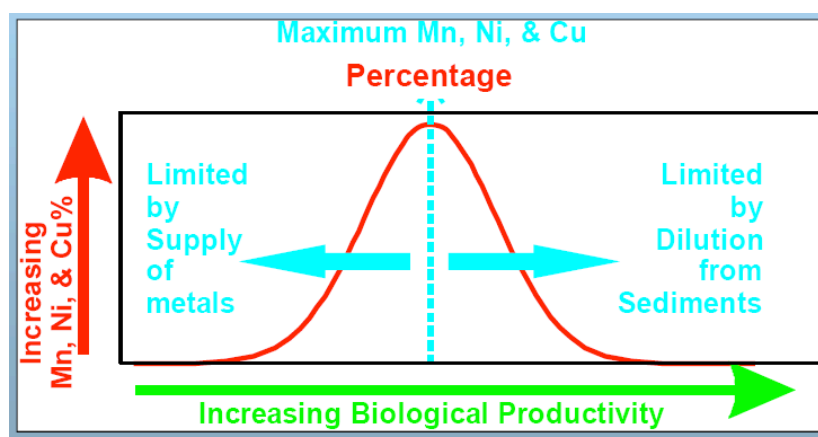


Figure 2-23 Lien entre productivité planctonique en surface et formation des nodules sur le fond. La quantité d'éléments nécessaires à leur formation est aisément disponible par la seule dissolution des organismes planctoniques qui s'accumulent dans le sédiment. Les nodules les plus riches sont associés à la dissolution du test d'organismes siliceux (Source ISA).

Les méthodes de datation radio-chronologiques ont donné des vitesses de croissance des nodules de quelques millimètres par millions d'années (Anufriev et al, 1996; Bollhofer et al, 1999; Finney et al, 1984; Guichar et al, 1978; Somayajulu, 1967). Ce taux de croissance est mille fois inférieur aux taux de sédimentation et pose le problème du maintien des nodules à la surface des sédiments (Heath, 1979; Piper and Fowler, 1980), qui n'est pas complètement résolu. La bioturbation active déplace les nodules de petite taille (Kerr, 1984b) et remobilise les sédiments recouvrant les nodules (Paul, 1976). On estime que la proportion de nodules enfouis dans le premier mètre de sédiments est égale à celle des nodules en surface.

Sur certains échantillons, on a pu noter des variations de la vitesse de croissance en relation avec les variations climatiques (Han et al, 2003), la croissance pouvant s'arrêter pendant les périodes glaciaires (Bostrom, 1970a). Des variations des courants de fond liées aux variations climatiques peuvent périodiquement éroder les sédiments autour des nodules. Certaines conditions diagénétiques ou un apport supplémentaire de Mn par des sources hydrothermales peuvent également augmenter les taux de croissance des nodules, comme cela a été observé dans le bassin du Pérou (Reyss et al, 1982).

2.4.2.5. *Importance du contexte géologique: cas de la zone Clarion-Clipperton (CCFZ)*

Le domaine océanique profond situé entre les zones de fractures de Clarion et de Clipperton a fait l'objet d'études intensives en vue de l'exploration des zones à nodules polymétalliques et d'une meilleure connaissance de leur mode de genèse. De nombreuses études (Bischoff and Rosenbauer, 1977; Halbach et al, 1988) ont montré depuis longtemps la nécessité d'une analyse de détail dans des zones d'échelle kilométrique afin de mieux cerner les relations entre les nodules et leur environnement géologique.

La topographie régionale de la CCFZ est relativement bien connue depuis les campagnes de reconnaissance bathymétrique menées avec le sea-beam au début des années 80 : il s'agit d'un relief constitué d'une succession de collines allongées dans une direction Nord-Sud parallèles les unes aux autres, le plus souvent sur plusieurs dizaines de kilomètres; la longueur d'onde moyenne est d'ordre kilométrique avec une amplitude de l'ordre de la centaine de mètres (Morel and Le Suave, 1986). A cette organisation de premier ordre de grandeur, se superpose une organisation de même orientation, en blocs inclinés vers l'Ouest et limités à l'Est par des failles normales ; c'est à la limite de ces blocs, dont l'extension Est-Ouest peut atteindre la dizaine de kilomètres, que les manifestations de réajustements tectoniques tardifs sont visibles.

A cette morphologie héritée de la dorsale s'ajoutent les effets combinés de la sédimentation, laquelle a débuté à l'Oligocène, et d'une dynamique sédimentaire dont on sait aujourd'hui qu'elle joue un rôle important dans le modelé de détail des bassins profonds. A la suite des travaux de (Cook, 1975) et (Le Suave, 1987), on distingue trois unités acoustiques :

- L'unité 1 (supérieure), encore appelée « série transparente » en raison de son faciès particulier, est constituée d'argiles pélagiques et comporte une fraction résiduelle d'organismes siliceux; son épaisseur peut atteindre 60 m. La base de cette série est datée du Miocène inférieur au Miocène moyen.
- L'unité 2 (ou « série cyclique », est caractérisée par de nombreux réflecteurs internes, interprétés comme correspondant à une alternance de niveaux biogènes carbonatés et siliceux résultant des variations de l'équilibre entre production primaire et dissolution des dépôts carbonatés; l'épaisseur de l'unité varie de 30 à 50 m. Sa base est datée de la fin de l'Oligocène au début du Miocène.
- L'unité 3 (ou « série des Marquises ») correspond à un faciès acoustique relativement homogène; elle est constituée de dépôts carbonatés dont la base, datée de l'Oligocène, repose sur le socle basaltique.

Les argiles pélagiques à organismes siliceux sont en fait déposées dans pratiquement toutes les dépressions du pa léo-relief et agissent donc comme agent de comblement (« ponding sediments »). Ce type de dépôt est essentiellement contrôlé par les apports latéraux en liaison avec les courants de fond. Localement, le comblement peut être important, particulièrement en contrebas des principaux accidents et être marqué par un phénomène chenalisant.

L'importance des phénomènes d'érosion et de resédimentation est capitale dans la genèse des nodules. Le hiatus précédant le dépôt de la série transparente correspond à un niveau d'argiles indurées ayant subi une imprégnation ferromanganésifère (Cochonat et al, 1992). Il s'agit du niveau stratigraphique à partir duquel le processus de formation des nodules de manganèse a été initié. Par ailleurs, la distribution des champs de nodules confrontée avec les profils 3,5 kHz a permis de dégager une relation directe entre la série transparente Plio-Quaternaire et

l'abondance des concrétions ; il est donc évident dès à présent que la genèse des nodules est liée à l'histoire de ce dernier environnement sédimentaire. Les études sont en cours afin d'en préciser les mécanismes de détail (diagenèse, pédogenèse) et les vitesses d'accumulation des sédiments et celles de la croissance des nodules.

2.4.3. Les encroûtements

2.4.3.1. *Introduction et contexte*

Comme les nodules, les encroûtements sont essentiellement constitués d'oxydes de fer et de manganèse. Ils sont cependant, en moyenne, trois fois plus riches en cobalt et souvent fortement concentrés en platine. Les encroûtements sont parmi les dépôts métallifères ressources les plus riches en cobalt connues sur terre. Les concentrations en cobalt sont bien plus élevées que dans les minerais latéritiques exploités à terre où la teneur excède rarement plus de 0,1 à 0,2 %. Ces encroûtements pourraient constituer le premier minerai de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations. Le platine et le tellure, étant fortement enrichis dans certains dépôts pourraient également être un sous-produit non négligeable.

Les encroûtements de la ZEE française possèdent des concentrations en Co (1,8 %) et Pt (3,5 g/t) nettement supérieures à celles des autres domaines océaniques (Co = 0,25 %) (Fouquet et Lacroix, 2012).

Le cobalt étant principalement utilisé pour réaliser des aciers spéciaux, l'intérêt de ce métal est relancé du fait de la forte demande (doublement de la production entre 1999 et 2006) pour les nouvelles technologies, en particulier les alliages pour l'aviation et les batteries. Environ un tiers de la production est utilisé dans l'industrie aérospatiale. L'intérêt du platine est également relancé par les demandes de l'industrie pour les catalyseurs (pots d'échappement et piles à combustible). En plus du cobalt, les croûtes de manganèses sont une source potentielle de nombreux autres éléments métalliques tels que titane, nickel, terres rares (en particulier le cérium), zirconium, molybdène, vanadium, tellure, thallium et phosphore.

En revanche, une véritable évaluation des potentialités économiques de ces minéralisations ne pourra être réalisée que lorsque des données de terrain permettront de préciser les paramètres nécessaires pour des calculs précis : contrôles géologiques de zones riches ; continuité des dépôts ; influence du substratum sur la dilution au ramassage (Fouquet et Lacroix, 2012). Un point important concerne l'étude de la rugosité du fond afin de déterminer les zones les plus riches et identifier des zones relativement plates et continues sur lesquelles un ramassage des encroûtements serait possible sans les diluer dans un grand volume de substrat stérile. De telles zones riches en cobalt sont connues dans la région des Tuamotu où des encroûtements forment un tapis plat et continu sur des formations sédimentaires indurées. Sur le plan scientifique, des efforts demeurent nécessaires pour mieux comprendre les règles de répartition, la variabilité des épaisseurs et de composition, et les paramètres géologiques et chimiques qui conditionnent la formation des accumulations les plus riches. A ce jour, aucune étude détaillée de terrain par submersible ou ROV n'a été réalisée sur ce type de dépôts dans les océans, même si de nombreuses missions de plongées ont été menées sur les volcans sous-marins.

2.4.3.2. Localisation

Des encroûtements ont été répertoriés dans tous les océans (Figure 2-4) dans des environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant plusieurs dizaines de millions d'années (Pratt and Mc Farlin, 1966). De manière générale, ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques (Scott, 1972). Ces encroûtements atteignent quelques centimètres à vingt-cinq centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs kilomètres carrés. Ils se déposent généralement sur des substratums indurés (volcans sous-marins, anciens atolls immergés) à des profondeurs variant entre 400 et 4 000 m. Les estimations montrent que 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des océans, sont couverts d'encroûtements de manganèse.

Un nombre infime de volcans immergés (estimés à 50 000) a été étudié dans l'océan Pacifique. Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont enrichis en cobalt et en platine, et se situent en Polynésie (Tableau 2-1). Les échantillons les plus riches apparaissent sous forme de croûtes parfois continues sur les bords externes des plateaux sous-marins (ex : l'archipel des Tuamotu) et sur les volcans à des profondeurs comprises entre 800 et 2 500 m.

2.4.3.3. Composition

Les encroûtements sont composés de vernadite ($\delta\text{-MnO}_2$) et d'oxyhydroxydes de fer amorphes. Les autres minéraux riches en Mn, tels que la todorokite, sont rares dans les encroûtements hydrogénétiques du Pacifique (Hein, 2000; Hein and Koschinsky, 2000). Comparés aux nodules hydrogénétiques, les encroûtements sont enrichis en Fe, Co, Ca, P, Ti, Pb, Ce et Pt et appauvris en Si, Al, Ni, Cu et Zn (Figure 2-24). Les concentrations en Mn et Fe sont assez similaires dans les encroûtements, avec le Mn plus enrichi dans l'océan Pacifique et le fer plus riche dans les océans Atlantique et Indien et à proximité des sources continentales (Hein et al, 2013). Les éléments d'importance économique incluent essentiellement le cobalt dont la concentration moyenne d'un océan à l'autre varie de 0,3 % à 0,7 %. Le nickel peut aussi atteindre en moyenne 0,2 à 0,5 %. Les terres rares présentent également des enrichissements importants dans les encroûtements avec des concentrations moyennes autour de 0,2 %. Localement, des concentrations jusqu'à 0,7 % ont été mesurées. La concentration globale moyenne en tellure dans les croûtes est d'environ 50 ppm, avec une valeur maximum de 205 ppm (Hein et al, 2003; Lakin et al, 1963).

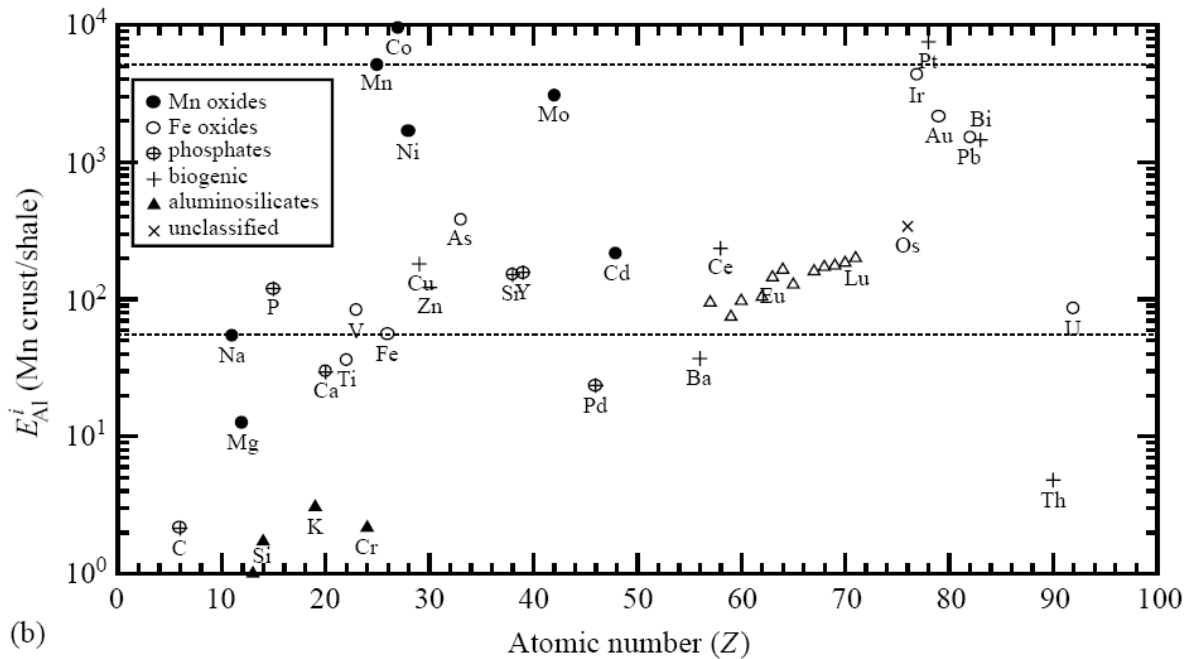


Figure 2-24 Facteur d'enrichissement des éléments majeurs et traces dans les encroûtements.

Le facteur d'enrichissement correspond à la concentration d'un élément dans les encroûtements (en moyenne) normalisée à sa concentration dans la croûte continentale (source principale des métaux). L'association spécifique des différents éléments pour certaines phases minéralogiques principales des nodules est également représentée. D'après (Li and Schoonmaker, 2003).

L'enrichissement en P et Ca des encroûtements est dû à la précipitation d'apatite authigène qui peut représenter dans certains cas plus de 20 % des anciens encroûtements (pré-Miocène moyen > 15 Ma) (Koschinsky et al, 1997). Dans ce cas, la précipitation d'apatite est le résultat de réactions diagenétiques liées à des changements climatiques globaux.

D'une manière générale, les encroûtements sont particulièrement riches en éléments qui sont susceptibles de s'oxyder lors de leur adsorption sur les hydroxydes de Fe et Mn. On parle alors de processus "Redox" (oxydo-réduction) qui implique le changement du degré d'oxydation de certains éléments. Ce processus est particulièrement important pour l'enrichissement en Co, Ce, Pt, et Te. Ainsi, la précipitation lors de l'oxydation du Co^{2+} et Ce^{3+} de l'eau de mer en Co^{3+} et Ce^{4+} sur les surfaces de MnO_2 a été depuis longtemps mise en évidence (Murray and Dillard, 1979; Goldberg, 1963). Les analyses de minéralogie et spéciation fine par technique synchrotron ont confirmé ses résultats (Takahashi et al, 2000). Ce même processus d'oxydation a été suggéré pour le Te, dont l'espèce principale dans l'eau de mer est le Te^{4+} , alors que l'espèce dominante dans les phases de Fe-Mn est le Te^{6+} (Hein et al, 2003).

Le platine a suscité un grand intérêt puisque des concentrations jusqu'à 3 mg/kg ont été reportées dans des encroûtements du Pacifique (Hein and Koschinsky, 2000). Ces fortes concentrations de platine ont été interprétées, sur d'autres sites, en termes d'oxydation d'un platine divalent, présent dans l'eau de mer sous forme d'un complexe chloré, en platine tétravalent qui serait piégé dans les oxydes de fer-manganèse. En revanche, les concentrations sont très variables probablement en lien avec la position des encroûtements par rapport à la zone du minimum d'oxygène de la colonne d'eau.

A noter que ce processus d'enrichissement n'est pas applicable à tous les éléments sensibles aux conditions d'oxydo-réduction qui sont déjà présents dans leur état d'oxydation le plus haut tels que V(V), Mo(VI), W(VI). Pour cette raison, les concentrations en ces éléments ne varient pas significativement entre les différents types d'encroûtements et nodules.

2.4.3.4. *Source des éléments et mode de formation*

Les sources ultimes des éléments métalliques dans les océans incluent les rivières, les aérosols, les sources hydrothermales, l'altération des roches, l'apport benthique par les sédiments, et les particules extra-terrestres (ex : sphérules cosmiques). Ces différentes sources peuvent contribuer de manières différentes à l'enrichissement en métaux des encroûtements.

Les volcans et monts sous-marins ont des caractéristiques qui favorisent la formation des encroûtements et le piégeage des métaux traces. Ainsi, la remontée d'eau profonde oxygénée (processus d'upwelling) favorise la formation de courants de fond qui évitent les dépôts de sédiments et permet l'apport de métaux qui sont enrichis dans les eaux profondes. La formation des encroûtements est également renforcée lorsque la teneur en oxygène de l'eau de mer sus-jacente est minimale (Figure 2-25). Cette zone de minimum d'oxygène (Oxygen Minimum Zone ou OMZ) est présente dans la plupart des océans et résulte de la forte productivité biologique en surface et de l'apport en matière organique dans les eaux plus profondes. Cette OMZ est donc le résultat de la dégradation de matière organique qui utilise l'oxygène de l'eau de mer et constitue ainsi un réservoir en Mn et métaux dissous.

Les encroûtements de fer et manganèse se forment initialement à partir de la précipitation de Fe^{2+} et Mn^{2+} de l'eau de mer sous forme de colloïdes d'hydroxydes de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) et de manganèse ($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Figure 2-25) (Koschinsky and Halbach, 1995). Les cations hydratés dissous dans l'eau de mer (ex : Co, Ni, Zn, Pb, Cd, Tl, ...) sont préférentiellement adsorbés sur les surfaces chargés négativement des hydroxydes de Mn. D'une manière générale, les métaux traces les plus abondant dans l'eau de mer se retrouvent particulièrement enrichis dans les encroûtements, tels que le Mo, Cu, Ni, and Zn. Les éléments qui montrent les plus forts enrichissements par rapport à leur abondance dans l'eau de mer, tels que le Co, Te, Ce, Tl et Pt sont affectés par d'autres processus d'adsorption qui impliquent un changement de leur degré d'oxydation (Hein et al, 2003; Hein and Koschinsky, 2000). A noter que les processus de précipitation mais également d'oxydation du Mn et du Ce sont probablement influencés et renforcés par l'activité bactérienne (Cowen and Silver, 1984; Moffett, 1990; Wang and Muller, 2009; Wang et al, 2009).

Dans certains cas, les encroûtements peuvent avoir une contribution hydrothermale qui se distingue généralement par un enrichissement très variable en Fe et Mn et un appauvrissement en métaux traces tels que Ni, Cu, et Co (Bonatti and Joensuu, 1966; Elderfield and Greaves, 1981; Frank et al, 2006; van de Flierdt et al, 2004). Ainsi, un apport hydrothermal en Fe et Mn dans la colonne d'eau où se forment les encroûtements aura comme conséquence d'augmenter le taux de croissance et donc de "diluer" la teneur en métaux traces provenant de l'eau de mer (Burnett and Piper, 1977).

Des micro-sphérules d'origine cosmique sont fréquentes dans certaines zones et semblent affecter la géochimie des sédiments se formant à faible taux de sédimentation (Ozima et al, 1984). Ces micro-météorites métalliques contiennent du nickel, du cobalt et des platinoïdes en quantité appréciable. Même si l'apport cosmogénique peut expliquer certains enrichissements en éléments du groupe du platine (PGE), la majorité du platine et des autres PGE (Ir, Os, Pd, Rh, Ru) provient de l'eau de mer. En effet, un calcul rapide intégrant les taux de croissance des encroûtements et du flux cosmique montre que ces micrométéorites ne rendent pas compte des teneurs élevées en cobalt et en platine de ces encroûtements.

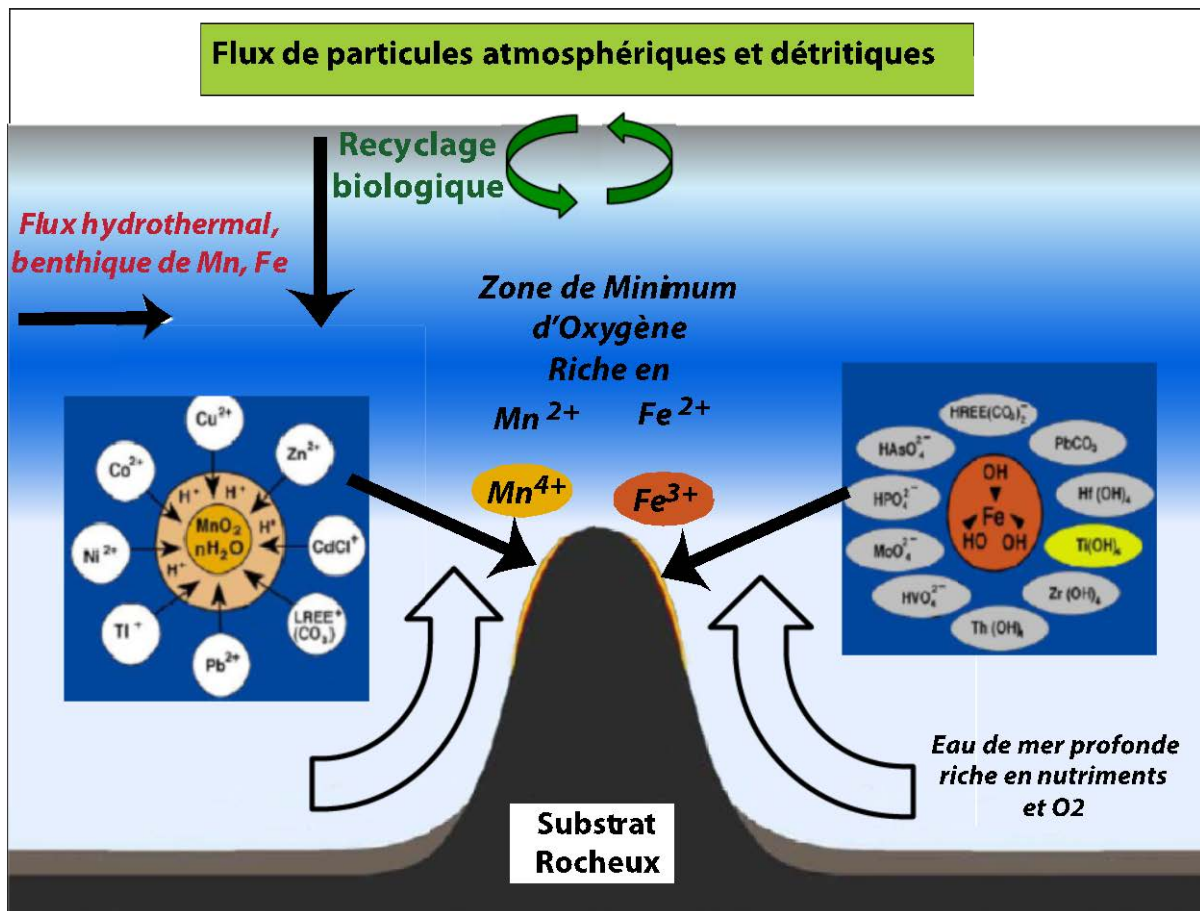


Figure 2-25 Modèle de genèse des encroûtements hydrogénétiques par la formation de complexes et phases colloïdales facilitant l'adsorption des métaux.

La formation des encroûtements est favorisée par la présence de la zone de minimum d'oxygène et l'apport de masses d'eaux plus riches en oxygène. La dissolution d'organismes à squelette carbonatés favorise la précipitation des colloïdes riches en manganèse. (Modifié d'après Hein et al, 2000).

Les vitesses de croissance des encroûtements sont extrêmement lentes, de l'ordre de 1 à 6 mm par millions d'années, ce qui permet un enrichissement important en éléments traces dissous dans l'eau de mer par mécanismes d'adsorption ou de coprécipitation (Chabaux et al, 1995; Eisenhauer et al, 1992; Halbach et al, 1983). Ainsi les croûtes les plus épaisses (jusqu'à 25 cm d'épaisseur) peuvent avoir des âges atteignant 60 millions d'années. De par la grande porosité et rugosité, les encroûtements se caractérisent par une grande surface d'exposition (environ 325 m²/g) qui renforce leur capacité à piéger les métaux traces dissous dans l'eau de mer (Koschinsky and Halbach, 1995; Koschinsky and Hein, 2003).

La mesure des taux de croissance des croûtes, qui implique de dater leur différentes couches de croissance, est donc fondamentale pour comprendre leur mode de formation et les sources d'éléments. De plus, l'enregistrement des métaux dissous dans l'eau de mer sur une échelle de plusieurs dizaines de millions d'années a permis d'utiliser les encroûtements comme archive paléocéanographique unique (cf. encadré "paléocéanographie"). Classiquement, l'utilisation des techniques isotopiques reposant sur la mesure des isotopes de la série de l'Uranium (excès de Th230) (Goldberg and Koide, 1958) et des isotopes cosmogéniques (Be10) (Ku et al, 1982; Segl et al, 1984) a permis de dater les encroûtements plus jeunes que 10 Ma. Une méthode indirecte basée sur le facteur d'enrichissement en Co ("chronomètre du Co") a été également abondamment utilisée grâce à sa simplicité de mise en œuvre (Halbach et al, 1983).

Utilisant cette technique, les taux de croissance de plusieurs centaines d'encroûtements du Pacifique ont été déterminés (Halbach et al, 1983). Ainsi, il a été montré que les encroûtements situés proches des domaines volcaniques actifs tels que les dorsales océaniques (dorsales Est Pacifique et de Juan de Fuca, bassins d'arrière arc) ont les taux de croissance les plus rapides (Manheim and Lane-Bostwick, 1988). Inversement, les encroûtements les plus riches en Co ayant des taux de croissance les plus lents sont situés dans l'océan Pacifique central notamment près d'Hawaii et de la Polynésie qui sont les plus distants des zones hydrothermales actives et des marges continentales (Manheim, 1986).

Encadré : Etude des encroûtements hydrogénétiques comme archives paléocéanographiques

De nombreux travaux se sont attachés à comprendre les variations dans le passé des changements globaux tels que les variations climatiques influant directement sur les circulations océaniques, le cycle du carbone et les flux provenant de l'érosion des continents. A l'échelle du million d'années, les encroûtements peuvent fournir des informations uniques sur des processus paléo-océaniques, notamment grâce à l'utilisation des variations des compositions isotopiques des éléments radiogénétiques tels que Pb, Sr, Nd et Os (Abouchami et al, 1999; Klemm et al, 2005; Ling et al, 1997; van de Flierdt et al, 2004). Ces traceurs radiogénétiques ont ainsi permis de reconstituer la circulation océanique au cours du Cénozoïque affectée par des changements globaux majeurs tels que la mise en place de l'isthme de Panama entre 8 et 6 Ma, l'intensité du transport des masses d'eau de l'Atlantique Nord vers l'océan de l'Atlantique Sud, l'influence de l'orogénèse Himalayenne (Christensen et al, 1997; Clauer et al, 1984; Goldstein and O'Nions, 1981; Lee et al, 1999; Luck and Turekian, 1983; Piegras and Wasserburg, 1982). Plus récemment, les isotopes stables des métaux tels que les isotopes du fer (Chu et al, 2006; Levasseur et al, 2004; Zhu et al, 2000), du thallium (Nielsen et al, 2011; Rehkamper et al, 2004), du cadmium (Horner et al, 2010; Schmitt et al, 2009), et du molybdène (Siebert et al, 2003) ont permis d'apporter des nouvelles informations paléo-océanographiques, comme l'importance des sources hydrothermales, de l'évolution des puits océaniques sédimentaires et de la productivité biologique pour les cycles globaux des métaux (Anbar and Rouxel, 2007). L'utilisation des encroûtements hydrogénétiques comme archive paléo-océanographique est donc un domaine de recherche de premier ordre, et de nombreuses zones restent très peu étudiées, comme par exemple la Polynésie Française dans le Pacifique sud.

2.4.4. Les sulfures hydrothermaux

2.4.4.1. *Introduction*

Le fort gradient thermique qui existe à l'axe d'une dorsale océanique est le moteur de la circulation de l'eau de mer à travers la croûte océanique jeune. L'activité hydrothermale sous-marine est donc une conséquence du mouvement des plaques terrestres et de l'activité volcanique (Bischoff, 1980; Delaney et al, 1998; Tolstoy et al, 2008). Ces processus génèrent la croûte océanique au niveau des zones d'écartement des plaques que constituent les 60 000 km de dorsales océaniques (Bonatti, 1968; Fischer et al, 1970; Orowan et al, 1966) (Figure 2-26).

L'importance des systèmes hydrothermaux sous-marins dans la dissipation de la chaleur du manteau est connue depuis plus d'une vingtaine d'année, avant même la découverte des premiers dépôts de sulfures (Francheteau et al, 1978) ou du premier site hydrothermal de haute température sur la dorsale Est Pacifique (EPR) à 21°N en 1979 (Spiess et al, 1980). Ainsi, les flux de chaleur mesurés au voisinage de l'axe des dorsales ne sont pas cohérents avec les modèles de refroidissement de la croûte océanique par conduction à travers l'océan (Wolery and Sleep, 1976) et nécessitent la contribution d'une dissipation de la chaleur par convection hydrothermale (Stein and Stein, 1994). Les estimations quantitatives montrent que la quantité d'eau de mer qui circule à travers les roches océaniques serait de l'ordre de $1,3$ à $9,0 \times 10^{17}$ g/an évacuant une quantité de chaleur équivalente de l'ordre de 36 à 44×10^{18} cal/an (Elderfield and Schultz, 1996; Germanovich and Lowell, 1992; Rosenberg et al, 1988; Stein and Fisher, 2003). Ces chiffres représentent l'équivalent d'une circulation de la masse totale des eaux océaniques par les systèmes hydrothermaux tous les cinq à onze millions d'années. Il s'agit donc d'un phénomène majeur à l'échelle du globe terrestre qui affecte profondément la chimie et la minéralogie de la croûte océanique (Alt et al, 1989; Edmond et al, 1982; Lowell et al, 1993) et de l'eau de mer (Mottl and Wheat, 1994; Spivack and Staudigel, 1994; Wheat et al, 1996).

Cette activité hydrothermale est le moteur du transport des métaux qui s'accumulent sous forme d'amas de sulfures massifs (Fouquet, 1997; Rona et al, 1986). Ce type de dépôt est bien connu dans les gisements fossiles exploités à terre et formés sous la mer (Cathles, 2011; Franklin et al, 2005; Hannington et al, 2011; Herzig and Hannington, 1995; Huston and Large, 1989; Pasava et al, 2004). Une partie du cuivre, du zinc, de l'argent et de l'or exploité sur les continents provient de ce type de gisements dont certains concentrent également le cobalt et le baryum. Par exemple, plus de 30 % des ressources en argent exploitées à terre proviennent d'amas sulfurés fossiles qui se sont formés en milieu sous-marin au cours des temps géologiques.

Les premiers dépôts observés représentaient seulement quelques dizaines de milliers de tonnes de sulfures polymétalliques. On connaît maintenant plusieurs champs hydrothermaux, dont les dimensions et les teneurs des minéralisations sont similaires à celles de mines exploitées à terre, c'est-à-dire plusieurs millions à plusieurs dizaines de millions de tonnes de minerai exploitable (Hannington et al, 2011). Ainsi, depuis quelques années, l'industrie minière commence à s'intéresser aux minéralisations hydrothermales (Hoagland et al, 2010; Rona, 1983; Rona, 2003).

Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields

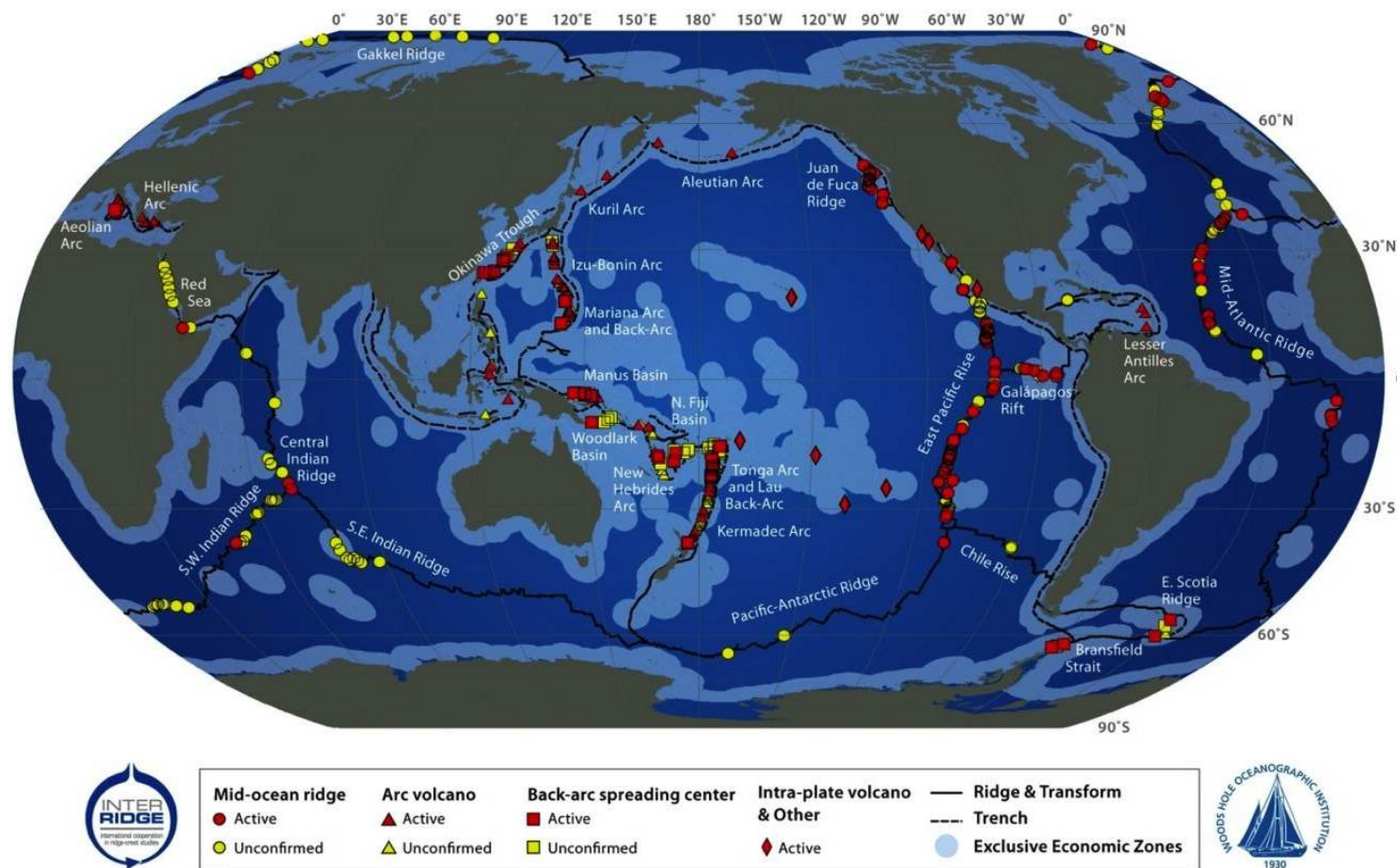


Figure 2-26 Distribution globale des systèmes hydrothermaux actifs océaniques.

D'après la compilation globale de InterRidge (<http://www.interridge.org/irvents/>) rapportée par Hannington et al, (2011). A noter que cette carte comprends un nombre important de sites non confirmés

L'une des questions majeures qui se pose concernant l'abondance et la composition des minéralisations hydrothermales est la notion de corrélation entre activité hydrothermale (propriétés, intensités, physico-chimie des fluides) et les différents aspects qui caractérisent les axes d'expansion (taux d'expansion, morphologie de la vallée axiale, segmentation, magmatisme vs tectonique, type d'édifices volcaniques, nature du substratum, bathymétrie). Par exemple, certains sites spécifiques de l'Atlantique associés à des roches du manteau présentent des teneurs intéressantes en cobalt alors que ceux associés aux bassins d'arrière-arc de l'Ouest Pacifique (ex : Bassin de Manus) peuvent présenter des enrichissements en or. En général, les métaux rares d'importance économiques accompagnent les métaux principaux. Au cuivre, qui caractérise les minéralisations formées au-dessus de 300°C, peuvent être associés des enrichissements en sélénium, cobalt, nickel, molybdène, tellure, bismuth et or. Le zinc, lié aux minéralisations formées entre 100°C et 250°C, s'accompagne d'enrichissements en cadmium, plomb, arsenic, antimoine, germanium, indium, baryum et argent.

De nombreux travaux d'exploration scientifique faisant l'inventaire des différents sites des dépôts hydrothermaux actifs ou inactifs ont ainsi permis de comprendre un certain nombre de processus favorables à la formation de ces dépôts mais il n'est pas encore possible d'établir une "carte génétique" des dépôts hydrothermaux en fonction de leur contexte géodynamique. En effet, faire un lien entre la chimie des fluides et des dépôts hydrothermaux avec la nature du substratum n'est pas immédiat et nécessite différentes approches comprenant des études géochimiques des produits hydrothermaux prélevés en submersible (fluides et roches), des études en profondeur pour contraindre l'importance des minéralisations en subsurface (forage dans le cadre des missions IODP, ODP et DSDP) mais aussi en utilisant les analogues fossiles continentaux préservés du recyclage de la croûte océanique lors de la subduction.

L'inventaire des systèmes hydrothermaux reste également très incomplet compte-tenu de la distribution des sites hydrothermaux le long des 60 000 km de dorsales océaniques, dans les bassins arrière-arc et les arcs volcaniques. Les technologies d'exploration permettent uniquement de localiser les sites actifs, à la différence des sites inactifs qui restent à rechercher de manière plus systématique et ne peuvent, dans l'état actuel des technologies, être localisés que par des opérations près du fond.

2.4.4.2. Localisation

Les premiers fumeurs noirs (350°C) ont été découverts sur la dorsale du Pacifique est en 1978 à près de 3 000 m de profondeur (Corliss et al, 1979; Francheteau et al, 1979; Spiess et al, 1980; Edmond, 1981). Après 30 ans d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux (Figure 2-27) démontre l'importance des processus d'extraction, de transport et de concentration des métaux associés au volcanisme sous-marin (Hannington et al, 2011; Tivey et al, 2011; Tivey and Delaney, 1986). Des minéralisations sulfurées sont maintenant connues à des profondeurs comprises entre 800 m et 5 000 m. En revanche, la profondeur à laquelle se trouve la plupart des dépôts hydrothermaux d'intérêt économique potentiel est comprise entre 1 500 m et 3 500 m de profondeur (Figure 2-27).

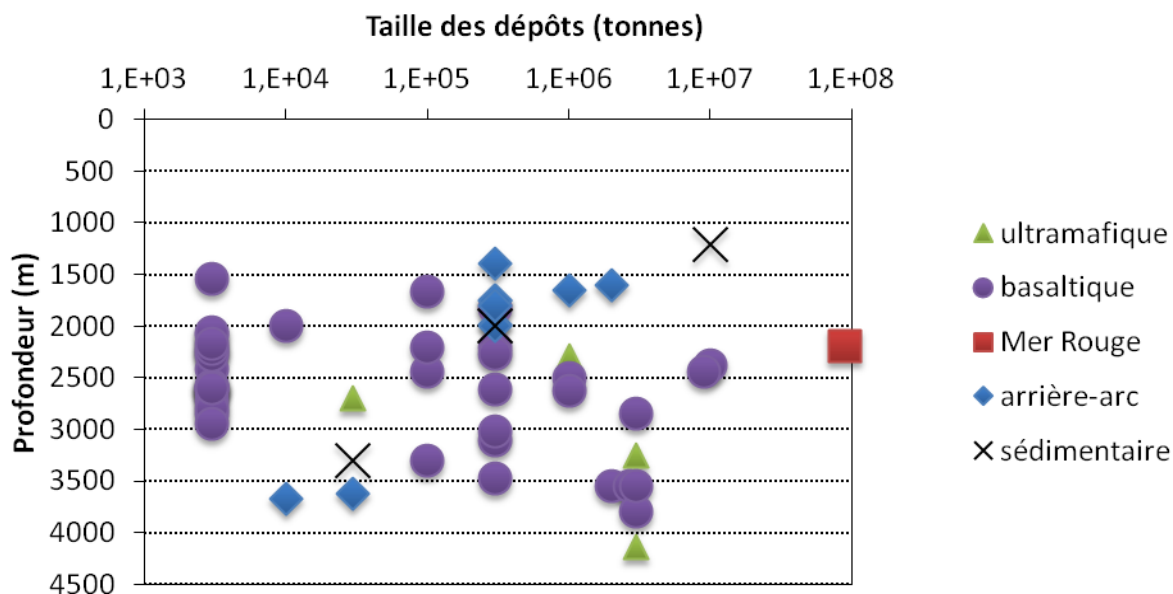


Figure 2-27 Estimation de la taille des dépôts (en tonnes) des sites hydrothermaux majeurs en fonction de leur profondeur.

D'après la compilation de données rapportée par Hannington et al, (2011).

Les travaux d'exploration ont permis de découvrir et de préciser la diversité de l'hydrothermalisme dans des contextes géodynamiques variés (Fouquet et al, 2010; Tivey, 2007). Les domaines volcaniques dans lesquels on rencontre les manifestations hydrothermales peuvent se subdiviser en quatre types d'environnements (Fouquet, 1997): les dorsales rapides, les dorsales lentes, les bassins d'arrière-arc et les volcans intra-plaques. Les dorsales dites lentes, telles que la dorsale Atlantique, s'ouvrent à des vitesses n'excédant pas 5 cm par an, alors que les dorsales rapides s'écartent à des vitesses pouvant atteindre 18 cm par an dans la partie sud de la dorsale Est Pacifique (EPR), près de l'île de Pâques.

De nombreux autres sites ont été découverts sur cette même dorsale, ainsi que dans la région de Gorda-Juan de Fuca-Explorer Ridge (Baker et al, 1987; Fouquet et al, 1994; Hekinian et al, 1983; Koski et al, 1988; Normark et al, 1983). Cependant, l'abondance des sites hydrothermaux ne se limite pas uniquement aux dorsales rapides à fort apport magmatique. En effet, la dorsale médio-atlantique (MAR), considérée souvent comme peu active d'un point de vue magmatique et hydrothermale, offre un contexte très favorable à la présence d'édifices hydrothermaux de haute température avec par exemple la zone TAG à 26°N, (Rona et al, 1993; Humphris et al, 1995). D'autres sites également très actifs ont été étudiés sur MAR (Fouquet et al, 2010) à Snake Pit 23°N (Detrick et al, 1986; Fouquet et al, 1993a; Thomson et al, 1988), Lucky Strike 37°N (Langmuir et al, 1997; Rouxel et al, 2004; Wilson et al, 1996), Broken Spur 29°N (Butler et al, 1998; James et al, 1995). Des sites hydrothermaux très riches ont été identifiés dans des environnements de roches ultrabasiques affleurant à l'axe de la dorsale médio-atlantique, en particulier à 14°45'N (Gablina et al, 2000; Mozgova et al, 1996; Petersen et al, 2009; Schmidt et al, 2006) et 36°N (Charlou et al, 2002; Fouquet et al, 2010; German et al, 1996). D'autres environnements ont également montré qu'ils étaient propices à la formation de "black smoker", comme les dorsales à couverture sédimentaire (Gieskes et al, 1982; Koski et al, 1988; Peter and Scott, 1988; Zierenberg et al, 1998), les bassins d'arrière arc (Bendel et al, 1993; Binns and Scott, 1993; Fouquet et al, 1991; German et al, 2000; Halbach et al, 1989), et les systèmes d'arcs insulaires (Baker et al, 2005; de Ronde et al, 2005; Glasby et al, 2000; Urabe and Kusakabe, 1990).

Dorsales rapides : de nombreux champs hydrothermaux de petite taille.

Les premiers fumeurs noirs ont été découverts en 1977, sur la dorsale Est Pacifique (EPR), à la latitude du Mexique à 21°N (Hekinian et al, 1980; Skirrow and Coleman, 1982). Certains prédisaient alors que l'activité serait particulièrement intense plus au Sud, sur la portion la plus rapide de la dorsale (ouverture : 17 cm par an), entre les latitudes de 15 et 20°S (Urabe et al, 1995). De nombreuses campagnes ont été conduites dans les années 1980 et 1990, en particulier par les équipes américaines, françaises et allemandes. Les découvertes se sont multipliées tout au long de la dorsale, depuis le Mexique jusqu'à l'Ile de Pâques : 13°N, 11°N, 9°50N, 17°30S, 18°15S, 18°30S, 21°30S (Hekinian et al, 1983; Von Damm et al, 1995) (Figure 2-26). Au cours d'une seule campagne de plongées du Nautile, 70 sites hydrothermaux ont été découverts entre 17 et 19°S, sur la dorsale la plus rapide au monde (Charlou et al, 1996; Fouquet et al, 1994). La démonstration était faite que l'importance de l'activité dépendait de la vitesse d'ouverture. Cependant, le nombre ainsi que la dimension très réduite (quelques centaines de mètres carrés) des champs hydrothermaux traduisent des systèmes extrêmement instables, en raison de la fréquence des mouvements tectoniques et du nombre important des éruptions volcaniques. Cette configuration est incompatible avec la formation d'accumulations minérales d'importance économique (Hannington et al, 2011). Les concentrations de sulfures à l'axe sont insignifiantes du point de vue des ressources minérales. Les seuls dépôts à fort tonnage sur les dorsales rapides se situent sur des volcans éloignés de quelques kilomètres de l'axe de la dorsale sur lesquels la plus grande stabilité des systèmes hydrothermaux pendant quelques milliers d'années a permis la formation d'amas sulfurés de plusieurs millions de tonnes.

Dorsales lentes : peu de sites mais vastes champs hydrothermaux

Pendant plusieurs années, il était admis que sur les dorsales lentes, telle que l'Atlantique, les fumeurs noirs n'existaient pas. Les chambres magmatiques, plus localisées et plus profondes, ne devaient pas permettre aux fluides les plus chauds d'atteindre la surface. En 1985, la découverte, à quelques mois d'intervalle, de deux champs de fumeurs noirs à 26°N et 23°N sur la dorsale Atlantique a démontré que l'hydrothermalisme chaud était un phénomène général sur les dorsales, quel que soit leur taux d'ouverture (Campbell et al, 1988; Fouquet et al, 2010). Depuis, les découvertes se sont multipliées, et une quinzaine de sites à sulfures sont maintenant connus le long de la ride médio-atlantique (MAR). Des mesures d'âge effectuées sur le site de TAG (Trans-Atlantic Geotraverse) à 26°N montrent que plusieurs épisodes d'activité se sont succédés sur une période de près de 40 000 ans (Humphris et al, 1995). Ce chiffre est à comparer à la durée de quelques dizaines d'années, qui caractérise la cyclicité des épisodes magmatiques l'axe sur les dorsales rapides (Haymon et al, 1993; Soule et al, 2008).

En fait, les circulations hydrothermales en contexte de dorsale lente sont largement contrôlées par la présence de failles profondes qui bordent la vallée de la dorsale et qui peuvent s'étendre jusqu'à la zone de réaction de haute température où se forme les fluides hydrothermaux (Mével et al, 1991). Les failles de détachement portant à l'affleurement les roches du manteau sur les dorsales lentes jouent également un rôle important dans les circularisations de fluides hydrothermaux (Fouquet et al, 2010). Ceci permet donc la pénétration profonde de fluides même assez loin de l'axe. Notons cependant qu'il existe quelques sites à contrôle volcanique sur les dorsales lentes et à contrôle tectonique sur les dorsales rapides.

La combinaison de l'effet thermique et topographique focalise les convections hydrothermales sur les points hauts et chauds des segments volcaniques (ex : site Lucky Strike) (Fouquet et al, 1995; Ondreas et al, 2009). Cependant, des sites connus sont situés à la base et au sommet des

murs du rift axial, leur emplacement est donc contrôlé non plus par le volcanisme, mais par la tectonique. D'autres sites sont localisés dans les extrémités de segments (Rainbow, Saldanha, et Menez Hom) dans des contextes où la faible productivité magmatique en surface laisse apparaître les roches du manteau (Fouquet et al, 2010; Ondreas et al, 2012). Ces découvertes élargissent considérablement le champ d'investigation potentiel, puisqu'il ne s'agit plus maintenant d'explorer uniquement les sommets volcaniques, mais aussi la base et le sommet des murs du rift. Elles démontrent également que les volumes de sulfures des dorsales lentes sont plus importants que ceux des dorsales rapides.

D'autres systèmes hydrothermaux ont été également découverts en contexte hors axe (Lost City ; (Fruh-Green et al, 2003; Kelley et al, 2005; Proskurowski et al, 2008) et dorsales ultra-lentes (Gakkal Ridge, Cayman Trough et dorsale Sud-Ouest Indienne ; (Edmonds et al, 2003; German et al, 1998; German et al, 2010a; Michael et al, 2003; Tao et al, 2012).

Dorsales couvertes de sédiments

Un cas particulier concerne les portions de dorsales couvertes de sédiment comme à Juan de Fuca (Cruse and Seewald, 2006; Houghton et al, 2004; Massoth et al, 1989) ou le bassin de Guaymas (Von Damm et al, 1985b; Williams et al, 1979), en raison de la proximité des continents. Dans ces environnements, les convections hydrothermales affectent successivement les roches basaltiques de la croûte océanique, puis les sédiments qui jouent le rôle d'écran et de piège vis-à-vis des métaux (Zierenberg et al, 1993). La campagne de forage ODP en 1996 (LEG-ODP 169 ; ride Juan de Fuca) a démontré l'importance de ces pièges pour la formation d'amas sulfurés (Figure 2-28) (Zierenberg et al, 1998). Les forages ont mis en évidence un des plus importants dépôts actuellement connu dans les océans. Les estimations obtenues, grâce à un échantillonnage tridimensionnel, atteignent près de 15 millions de tonnes de minerai particulièrement riche en cuivre et en zinc. Ces forages ont également démontré qu'une partie importante des minéralisations ne se forment pas en surface mais en profondeur.

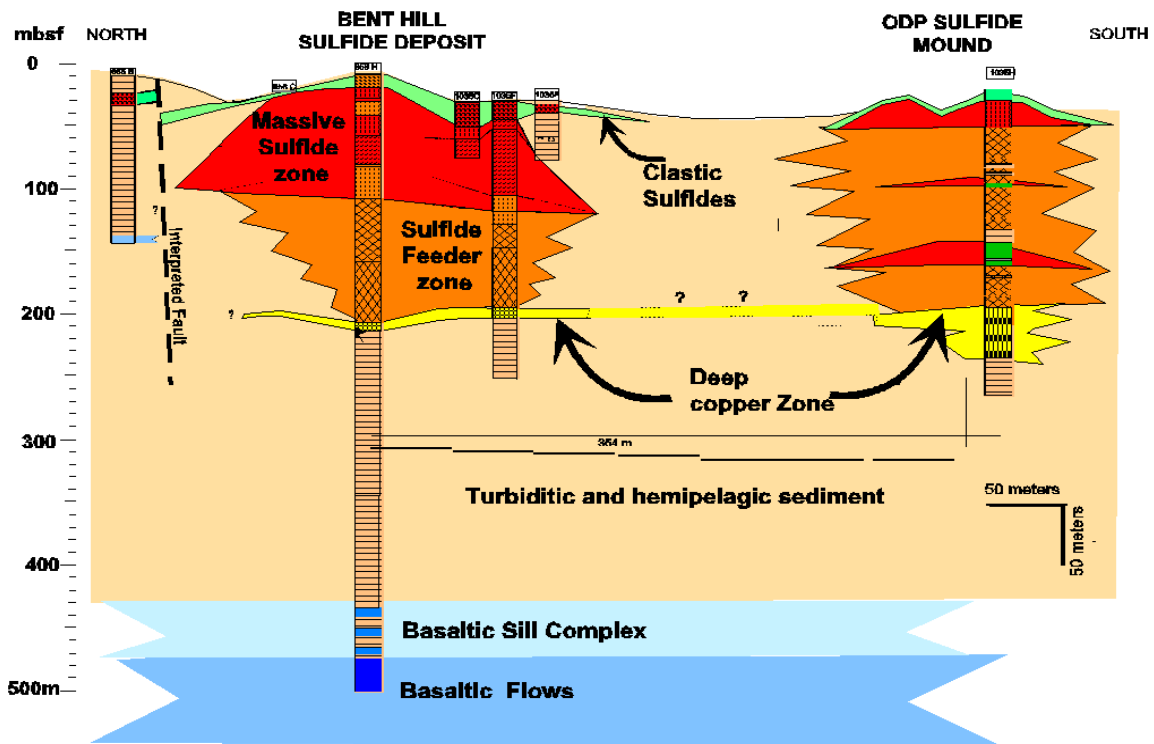


Figure 2-28 Coupe des amas sulfurés de Middle Valley (dorsale de Juan de Fuca) formés sur une dorsale couverte de sédiments. D'après Fouquet 2002.

Les bassins arrière-arc et arcs volcaniques en arrière des grandes fosses océaniques

A l'opposé des dorsales, qui sont le lieu de création de la croûte océanique, les bassins volcaniques d'arrière-arc se forment dans zones de convergence où les plaques sont détruites (zones de subduction). A la fin des années 1980, les bassins arrière-arc, en arrière des fosses océaniques, ont attiré l'attention des métallogénistes, du fait que la grande majorité des gisements fossiles exploités à terre sont formés dans ce type de contexte (Fouquet et al, 1991; Fouquet et al, 1993b; Halbach et al, 1989; Herzig et al, 1990). En effet, de par leur localisation près des continents, ils sont préférentiellement incorporés dans les continents lors des collisions de plaques.

Les bassins arrière-arc peuvent être considérés comme de petites dorsales volcaniques formées en arrière des grandes fosses océaniques. L'injection d'eau de mer au niveau des zones de plongement des plaques lithosphériques (zones de subduction) induit un abaissement du point de fusion des roches. En conséquence, les poches de lave formées viennent alimenter les îles volcaniques (arc volcanique) donnant des alignements en arrière et parallèles à la fosse. Les îles Tonga et les Mariannes sont des exemples d'îles obtenues par ce processus. Ces contextes sont favorables à l'installation de cellules de convection hydrothermale et abritent plusieurs champs hydrothermaux (Baker et al, 2005).

La grande instabilité des bassins arrière-arc, ainsi que la grande variabilité de nature des roches volcaniques qui leur sont associées, ont conduit à la découverte de sites hydrothermaux extrêmement variés quant à la composition des fluides et des minéralisations associées. Ces bassins se classent selon leur degré de maturité. Les bassins jeunes peuvent s'ouvrir en domaine de croûte continentale (bassin d'Okinawa (Halbach et al, 1989)) ou de croûte d'arc insulaire (bassin de Lau (Fouquet et al, 1991; Fouquet et al, 1993b), bassin de Manus

(Auzende et al, 1997; Binns and Scott, 1993). Dans ce dernier cas, l'influence des produits de fusion issus de la zone de subduction se fait sentir jusque dans la composition de dépôts hydrothermaux associés (Craddock and Bach, 2010; Fouquet et al, 1993b; Gena et al, 2001). Nous pouvons ainsi voir la marque de phénomènes globaux tels que la subduction dans les phénomènes locaux et la formation des dépôts minéraux. Les bassins plus évolués sont comparables à de petites dorsales sur lesquelles le basalte est dominant et les processus minéralisateurs sont très proches de ceux des dorsales. Dans les bassins les plus jeunes proches de l'arc volcanique actif, les roches volcaniques dominantes sont les andésites et les rhyolites inexistantes sur les dorsales.

Les volcans hors-axe

L'activité hydrothermale associée au volcanisme actif intra-plaque est bien documentée aux "points-chauds" associés aux panaches mantelliques du Pacifique. Parmi les volcans sous-marins les plus étudiés, on peut citer Loihi Seamount (Hawaii) (Davis and Clague, 1998; Edwards et al, 2011), Vailulu'u Seamount (Samoa) (Staudigel et al, 2006), Axial Seamount (dorsale Juan de Fuca) (Embley et al, 1999), et Larson's Seamounts (près de la dorsale Est Pacifique à 21°N) (Alt et al, 1987). Des évidences indirectes d'activité hydrothermale ont également été rapportées sur les volcans sous-marins de Teahitia, Mehitia et Macdonald (Puteanus et al, 1991; Stuben et al, 1992).

En général, les caractéristiques chimiques des fluides hydrothermaux associées aux volcans sous-marins diffèrent des systèmes hydrothermaux des dorsales médio-océaniques. Ainsi, les fluides sont souvent de plus basse température, appauvris en hydrogène sulfuré et métaux traces tels que Cu et Zn mais riches en fer et manganèse (Glazer and Rouxel, 2009). Ces systèmes sont également soumis à une forte influence du dégazage magmatique en profondeur (Lupton, 1996; Sakai et al, 1987).

Dans de rares cas, comme après une éruption volcanique, les dépôts hydrothermaux peuvent contenir des enrichissements en sulfures de zinc et de cuivre (Davis and Clague, 1998). En revanche, la majorité des dépôts associés aux volcans sous-marins intra-plaques sont essentiellement composés d'oxydes de fer et manganèse (Decarlo et al, 1983; Edwards et al, 2011; Hein et al, 1994) avec un faible enrichissement caractéristique en métaux traces.

2.4.4.3. Composition chimique

Un des aspects également fondamental dans l'étude des systèmes hydrothermaux sous-marins est l'établissement de liens entre les modes de formation des édifices et leur caractérisation pétrologique et géochimique d'une part, et le contexte géologique d'autre part. Le nombre important de sites hydrothermaux actuellement connus permet de classer les différents types d'édifices à la fois en fonction de la température et de la composition des fluides émis, de leur forme et de leur minéralogie principale et de la nature du substratum.

Ainsi, il est couramment admis de distinguer deux grands types de dépôts hydrothermaux (Fouquet et al, 2010; Fouquet et al, 1996; Fouquet et al, 1993a; Goodfellow and Franklin, 1993; Hannington et al, 1995; Haymon and Kastner, 1981; Herzig et al, 1993; Koski et al, 1994; Rouxel et al, 2004; Rouxel et al, 2008; Schmidt et al, 2007; Styrt et al, 1981; Tivey, 1995):

(1) Les minéralisations riches en cuivre de haute température (> 300°C), type "black smoker" au sens strict, possédant une zonation du conduit bien marquée avec les minéraux de

haute température au centre (chalcopyrite, isocubanite, pyrrhotite) et un assemblage de plus basse température (<250°C) en périphérie (pyrite, sphalérite, anhydrite) montrant une influence de l'eau de mer ambiante dans la minéralisation (enrichissement en sulfates). Les minéralisations riches en cuivre peuvent également être enrichies en molybdène, cobalt, sélénium et nickel.

(2) Les minéralisations riches en zinc, en particulier de type "white smoker", généralement riches en pyrite, sphalérite, anhydrite, barytine et silice amorphe, mais dépourvus de sulfures de cuivre abondants. Les minéralisations riches en zinc peuvent également être enrichies en cadmium, arsenic, antimoine, germanium, argent, plomb.

A noter que certains métaux traces tels que l'or, l'étain, le tellure, le bismuth et le mercure ont des comportements mixtes, pouvant se retrouver enrichis dans les minéralisations riches en Cu ou Zn en fonction des conditions physico-chimiques du fluide, du contexte géodynamique et des interactions eaux-roches en profondeur.

De manière générale, par rapport aux nodules et aux encroûtements de manganèse, il s'agit de dépôts très riches (Tableau 2-1) puisque le total cuivre + zinc dépasse fréquemment 10 %. Il peut atteindre 20 % dans les bassins arrière-arc et de 15 % sur les dorsales lentes (Atlantique) et rapides (Pacifique Est). De plus, la plupart des sites sont fortement enrichis en argent et souvent en or (Fouquet and Lacroix, 2012). Dans certains cas, les processus d'altération des sulfures sur le plancher océanique peuvent permettre un enrichissement important en métaux tels que l'or et le cuivre sous forme native (Hannington et al, 1988).

Certains sites spécifiques de l'Atlantique associés à des roches du manteau sont également très riches en cobalt. Il convient cependant de préciser que les estimations de compositions sont basées sur des échantillonnages en deux dimensions réalisés à partir de submersibles. Une réelle estimation au sens économique du terme doit intégrer les variations de composition selon la verticale, ce qui implique de réaliser des forages. On sait cependant que dans les gisements fossiles, les zones profondes sont généralement les plus riches en cuivre ; ce point a été confirmé sur le site de Middle Valley à la base duquel existe une « deep copper zone » essentiellement constituée de sulfures de cuivre (Figure 2-28). Des dépôts riches en oxydes de Mn et Fe peuvent également se former en contexte hydrothermal (Cronan et al, 1982; Mills et al, 2001). En revanche, ces dépôts sont généralement pauvres en métaux traces (Ni, Co, Cu) comparés aux dépôts hydrogénétiques.

La composition chimique et minéralogique des sulfures hydrothermaux peut donc être très variable selon l'environnement géodynamique, la nature du substratum affecté par les circulations hydrothermales, la profondeur d'eau, les phénomènes de séparation de phase, la maturité des dépôts. Les facteurs principaux sont la température et la profondeur des sites hydrothermaux. La nature du substrat peut également être fortement impliquée puisque certains métaux peuvent y être pré-concentrés avant leur extraction par les circulations hydrothermales. Ainsi, même si le principe général de circulation hydrothermale (Figure 2-24) s'applique sur tous les sites, des différences considérables existent dans la composition de dépôts.

Interaction eau de mer / basalte : Dépôts riches en Cu, Zn, Ag

Ce type est le plus répandu (Edmond et al, 1982; Fouquet and Lacroix, 2012; Hekinian et al, 1980; Herzig and Hannington, 1995; Humphris et al, 1995; Rona et al, 1986). On le trouve sur les dorsales rapides et sur une partie des sites de dorsales lentes et de bassins arrière-arc. Les réactions hydrothermales se produisent dans le basalte. Les dépôts sont principalement

constitués de sulfures de fer, de cuivre et de zinc (Fouquet and Lacroix, 2012). Les compositions des sulfures varient peu d'un site à l'autre. Cependant, en fonction de la profondeur et des phénomènes d'ébullition, la composition des fluides varie considérablement. Des salinités plus faibles que l'eau de mer correspondent à la condensation des phases vapeurs produites lors de la séparation de phase, alors que les fluides plus salés que l'eau de mer correspondent à la concentration du sel dans les saumures résiduelles (Charlou et al, 2000; Von Damm et al, 1995). Les métaux ont tendance à se concentrer dans les phases saumures. Les dépôts les plus jeunes et immatures à l'axe (en particulier sur les dorsales rapides) sont enrichis en zinc et argent tandis que les dépôts plus anciens, généralement hors-axe, sont enrichis en cuivre, le zinc étant alors essentiellement concentré au sommet et en surface des dépôts. Quelques éléments, tels que le sélénium et le cobalt, sont enrichis dans certains sites (Fouquet, 1997; Fouquet et al, 2010; Fouquet and Lacroix, 2012; Hannington et al, 1988; Koski et al, 1994; Moss and Scott, 1996; Rouxel et al, 2004b; Tivey and Delaney, 1986).

Interaction eau de mer / basalte / sédiments : Dépôts riches en Cu, Zn, Pb, As

Dans certains environnements, comme dans le golfe de Californie et sur la côte ouest du Canada, la dorsale est proche des continents et peut être ennoyée sous une couverture de sédiments (Dick et al, 2009; Peter and Scott, 1988; Von Damm et al, 1985b; Williams et al, 1979; Zierenberg et al, 1993). Les eaux hydrothermales doivent alors se frayer un passage au travers des sédiments, avant d'émerger sur le plancher océanique. Au cours de cette traversée, l'acidité initiale des fluides est en partie neutralisée par réaction avec les carbonates. Les réactions chimiques solubilisent certains éléments, tels que le plomb et l'arsenic, qui sont enrichis dans les sédiments d'origine continentale. Une partie des autres métaux se dépose au sein des sédiments qui constituent un piège efficace. Ces environnements sont enrichis en plomb et arsenic par rapport aux sites formés directement sur les basaltes (Fouquet and Lacroix, 2012; Peter and Scott, 1988).

Interaction eau de mer / andésite-Rhyolite : Dépôts riches en Zn, Cu, Pb, As, Ag, Au

Dans les bassins arrière-arc, les roches volcaniques acides (andésites, rhyolites) sont fréquentes. Les sulfures hydrothermaux dans ces environnements sont bien connus dans le Pacifique ouest (Auzende et al, 1997; Baker et al, 2005; Binns and Scott, 1993a; Craddock and Bach, 2010; Fouquet et al, 1991; Fouquet et al, 1993b; Gena et al, 2001; Herzig et al, 1990; Pasava et al, 2004). Les compositions des dépôts sont intermédiaires entre celles des dorsales et celles qui se forment en contexte de croûte continentale. En particulier, les échantillons prélevés en surface sont extrêmement riches en zinc, plomb, et arsenic par rapport aux sites associés à du basalte. Cette richesse en zinc est également visible dans la composition des fluides. Une particularité de ces sites est leur forte teneur en argent et en or dont les concentrations moyennes peuvent dépasser respectivement 250 g/t et 10 g/t (Fouquet and Lacroix, 2012).

Interaction eau de mer / roches du manteau : Dépôts riches en Cu, Zn, Co, Au

Depuis la fin des années 1990, de nombreuses observations ont montré que sur les dorsales lentes, les affleurements de roches du manteau terrestre étaient relativement fréquents (Cannat et al, 1995; Gracia et al, 1997; Ondreas et al, 2012). Certaines portions de dorsale, en particulier l'extrémité des segments volcaniques, reçoivent très peu de coulées basaltiques. Comme l'ouverture et l'écartement des plaques se poursuivent inlassablement, la déchirure

provoquée porte à l'affleurement les roches sous-jacentes, c'est-à-dire les roches du manteau. Sur la dorsale Atlantique, cinq sites hydrothermaux actifs, Rainbow, Logatchev 1 et 2, et Ashadze 1 et 2 sont actuellement connus pour reposer sur un substratum mantellique (Fouquet et al, 2010; Fouquet and Lacroix, 2012; Lukashin et al, 2004; Rouxel et al, 2004a). Ils résultent de la réaction entre l'eau de mer et les roches ultrabasiques du manteau. Les fluides associés sont exceptionnels quant à leur richesse en méthane et surtout en hydrogène qui résulte de réactions chimiques liées à l'hydratation des roches du manteau (Charlou et al, 2002; Charlou et al, 1998; Fruh-Green et al, 2003; German et al, 2010b; Kelley et al, 2005; Proskurowski et al, 2008). Ces réactions se traduisent par une augmentation de 30 % du volume de la roche. Dans ce cas encore, la nature du substratum se marque très bien dans la composition chimique des fluides et des précipités hydrothermaux. En particulier, les sulfures se caractérisent par un très fort enrichissement en cuivre, zinc et cobalt (Fouquet et al, 2010). Localement, des teneurs supérieures à 50 g/t en or ont été mesurées. A noter qu'ici, comme dans certains bassins arrière-arc, les teneurs élevées en cuivre se situent directement sur le plancher océanique à la surface des dépôts.

2.4.4.4. Mode de formation

Les dépôts de sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de gradients thermiques importants (Figure 2-29). On les trouve sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique. Selon leur localisation, ils présentent une grande diversité tant du point de vue des caractéristiques physiques et géologiques des gisements que des métaux valorisables contenus. Ces différences sont contrôlées par des processus physiques (ex : variation de la température d'ébullition selon la profondeur) et par la nature des roches traversées par les circulations hydrothermales (roches volcaniques variées, roches du manteau, sédiments,...).

Malgré une grande diversité, on peut synthétiser les principales composantes d'un système hydrothermal dans un schéma simple (Figure 2-29). Ce schéma intègre de nombreuses données de terrain, à la fois sur les faciès d'altération des roches volcaniques forées lors de missions ODP ou DSDP, sur la chimie des fluides hydrothermaux, ainsi que des données expérimentales et modèles théoriques (Alt, 1995; German and Von Damm, 2003; Tivey, 2007).

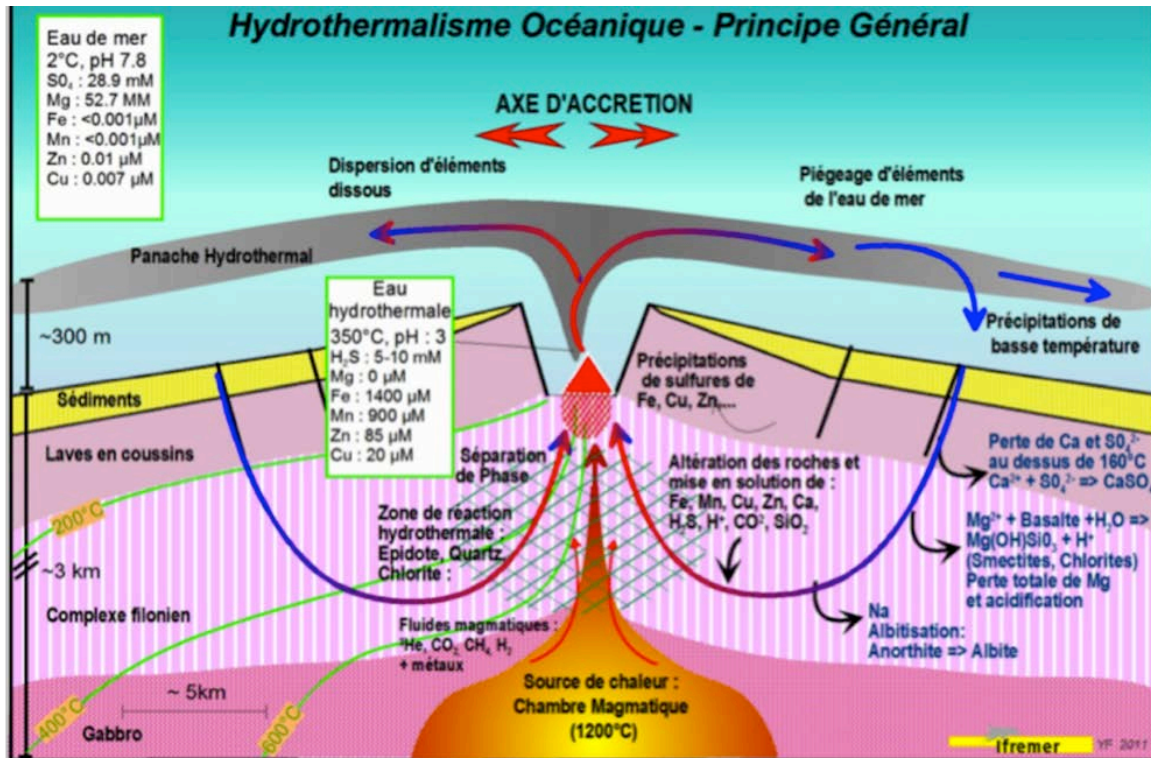


Figure 2-29 Principe général de la convection hydrothermale sur une coupe de dorsale océanique. Ce schéma s'applique à la plupart des systèmes hydrothermaux sous-marins. Les variables importantes contrôlant la composition des fluides et des minéralisations sont : la profondeur d'eau et donc la pression qui détermine la température de séparation de phase; la profondeur de la chambre magmatique; la nature des roches du substrat. D'après Fouquet et Lacroix, 2012.

Les conditions essentielles pour obtenir un système efficace de concentration de sulfures hydrothermaux de haute température sur les dorsales océaniques sont globalement :

- (1) La présence d'un **fluide convecteur** : c'est l'eau de mer, un réservoir inépuisable. Dans certains sites de contexte d'arrière-arc, des fluides magmatiques peuvent également être impliqués.
- (2) L'existence d'une **perméabilité** suffisante du milieu pour permettre une infiltration profonde d'un large volume d'eau de mer jusqu'au contact des zones de réactions, souvent situées de 1,5 à 2 km de profondeur. La zone de recharge comprend les échanges de basse température (< 150°C) impliquant une oxydation et une fixation des alcalins dans la croûte et une précipitation du Mg de l'eau de mer sous forme de minéraux secondaires (ex : smectite). Les sulfates de l'eau de mer sont également réduits sous forme d'hydrogène sulfuré qui reste en solution. La zone de réaction caractérise la formation au sens strict du fluide hydrothermal à une température supérieure à 350°C. Généralement, on considère que les fluides hydrothermaux ont acquis leurs caractéristiques physico-chimiques dans la zone de réaction de haute température (HTRZ où la température est de 400°C environ et le rapport eau/roche est très bas. Cependant, le lien entre les produits d'altération de la croûte océanique au niveau de la zone de réaction et la chimie des fluides émis en surface n'est pas encore bien établi.
- (3) L'existence d'un **moteur thermique** pour mettre l'eau en mouvement et créer des cellules de convections. La chambre magmatique contenant de la lave en fusion à 1 200°C alimente

les coulées sur le plancher océanique. Sa situation, à seulement quelques kilomètres de profondeur, induit un gradient thermique de plusieurs centaines de degrés par kilomètres. Les fluides chargés en métaux approchant des conditions critiques d'ébullition, deviennent considérablement moins denses, ce qui provoque leur remontée rapide vers la zone de décharge en surface. La forte salinité de l'eau de mer facilite également la mise en solution des métaux sous forme de complexes chlorurés. On génère ainsi des fluides acides, réduits, chauds (350°C), dépourvus de magnésium et chargés en métaux. Les flux de sortie des solutions hydrothermales dépendent de la quantité de chaleur mise en jeu, du volume d'eau infiltré, et de la perméabilité du substratum. La vitesse de remontée du fluide hydrothermal est de l'ordre de quelques centimètres à quelques mètres par seconde.

(4) Des **fractures** pour canaliser les décharges des fluides chargés en métaux. Ces émissions focalisées sont assurées par la fracturation intense de la couche volcanique dans le contexte tectonique extensif.

(5) Les dépôts sulfurés se forment sur le plancher océanique quand ces fluides hydrothermaux (350°C) sont rapidement refroidis au **contact de l'eau de mer** (2°C). L'existence d'une barrière de perméabilité ("cap rock") qui isole thermiquement et chimiquement les fluides hydrothermaux de haute température à circulation plus ou moins diffuse permet une précipitation efficace de sulfures en subsurface. En revanche, d'une manière générale, la formation des édifices hydrothermaux est un processus très peu efficace puisque plus de 95 % des métaux du fluide hydrothermal est dispersé dans l'eau de mer sous forme de panaches hydrothermaux et peuvent ensuite se retrouver incorporés dans les sédiments marins et éventuellement dans les grands cycles océaniques.

En raison de l'augmentation de la température de séparation de phase (ébullition) avec la pression, les fluides les plus profonds ont une plus grande capacité à transporter les métaux. A une profondeur de 3 000 m (300 bars) la température de séparation de phase est voisine de 400°C (Figure 2-30). Dans certains cas, les conditions de pression-température des fluides hydrothermaux peuvent être supérieures au point critique de l'eau de mer (Koschinsky et al, 2008).

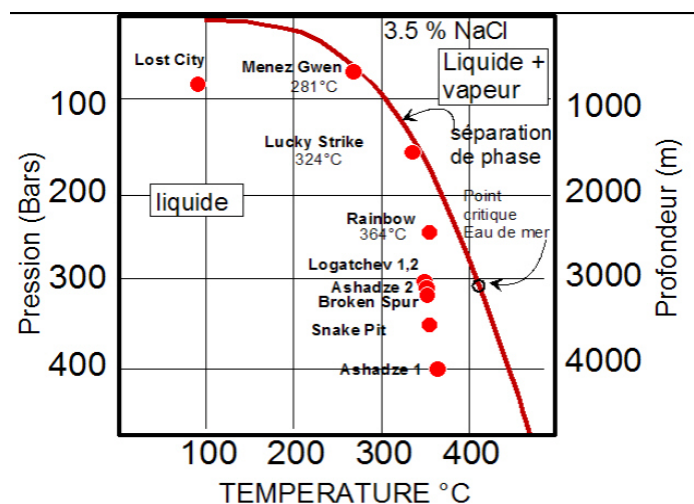


Figure 2-30 Courbe d'ébullition de l'eau de mer en fonction de la pression et de la température. Les sites hydrothermaux de l'Atlantique ont été reportés à titre d'exemple.

Formation des cheminées hydrothermales

Les "black smokers" se caractérisent par l'émission de fluides de haute température de l'ordre de 350°C, acides (pH < 4) et réduits (Edmond et al, 1979; German and Von Damm, 2003; Von Damm et al, 1985a). Les modèles de croissance couramment admis pour ces types de cheminées se résument en deux étapes (Figure 2-31) (Haymon, 1983).

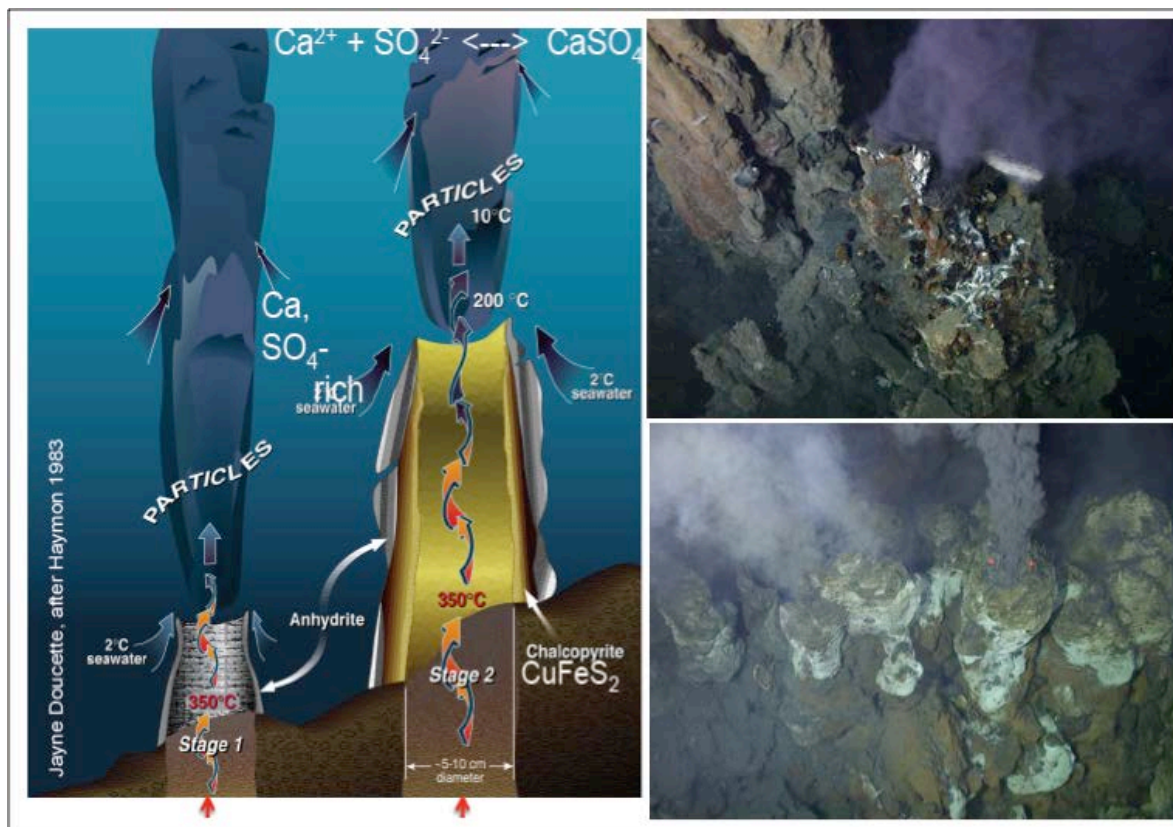


Figure 2-31 Illustration des différents types de cheminées hydrothermales.

A) schéma général des étapes de formation des cheminées de type "fumeurs noirs" (d'après (Haymon, 1983), modifié par J. Doucette, WHOI); B) photographie de fumeurs noirs (en haut) et blancs ou gris (en bas) du bassin de Manus, sites hydrothermaux de PACMANUS (mission MAGELLAN-06, R/V Melville; ROV Jason2).

La phase initiale comprend un mélange très actif entre le fluide hydrothermal et l'eau de mer. Le premier minéral à précipiter est l'anhydrite qui devient insoluble au-dessus de 160°C (Blount and Dickson, 1969) et forme ainsi la paroi précoce de la cheminée. Les sulfures de cuivres commencent alors à précipiter au cœur de la cheminée où ils forment une couche qui devient continue et s'épaissit par remplacement de l'anhydrite. Les sulfures de fer (principalement pyrite ou pyrrhotite) et dans une moindre mesure les sulfures de zinc peuvent également précipiter lors de cette phase initiale. Le fluide hydrothermal est alors isolé et la température stabilisée entre 300 et 350°C ce qui permet la précipitation radiale de sulfures de cuivre (chalcopryrite ou isocubanite) et/ou de zinc (généralement très riches en fer). Cette phase secondaire de la croissance d'une cheminée se marque ainsi par un remplacement des phases initialement présentes. Le développement des zones minéralogiques concentriques est alors le résultat des forts gradients physico-chimiques qui caractérisent la paroi d'une cheminée isolant le fluide hydrothermal de l'eau de mer ambiante. Près de la zone de transition de la cheminée, de plus basse température, des remplacements secondaires peuvent se produire et se marquent alors par un remplacement de la chalcopryrite (issu de la croissance

radiale de la cheminée) en assemblage de bornite/covellite/chalcocite. De nombreux modèles numériques ont été élaborés pour reproduire les assemblages minéralogiques observés et ont ainsi permis une meilleure compréhension des phénomènes minéralogiques (Janecky and Seyfried, 1984; Tivey, 1995).

Les "fumeurs blancs" se caractérisent généralement par l'émission de fluides de plus basse température (< 250°C et souvent entre 150 et 200°C) et pauvres en métaux. Les orifices peuvent être également nombreux, diffus et interconnectés. Ces structures très poreuses sont souvent associées à une faune très riche qui influence la perméabilité et la minéralisation de la cheminée (formation de tubes de marcasite/pyrite (FeS₂)) (Fouquet et al, 1993a; Juniper et al, 1992).

Formation des sulfures massifs et stockwork

Les sulfures massifs se retrouvent généralement sous forme de dômes présentant souvent des cheminées actives à leur sommet. La formation des sulfures massifs volcanogéniques marins provient pour partie de l'accumulation et du remaniement d'anciennes cheminées effondrées (Hannington et al, 1995). Cette hypothèse s'est également confirmée dans le cas des gisements de sulfures massifs ophiolitique par la découverte de fragments de cheminées et de tubes de vers à Cyprus (Oudin and Constantinou, 1984) et Oman (Haymon et al, 1984). Cependant les observations de terrain et les forages IODP ont montré qu'une partie des monts se forment par recristallisation et précipitations en subsurface et par remplacement du substratum par des sulfures massifs (Humphris et al, 1995; Kleinrock and Humphris, 1996; Zierenberg et al, 1998)

La composition minéralogique des monts de sulfures massifs comprend généralement au centre un assemblage de haute température riche en Cu et en périphérie un assemblage de plus basse température riche en Zn (Humphris et al, 1995). Cette zonation est le résultat d'une remobilisation minéralogique due à des diffusions de fluides hydrothermaux à travers la structure qui redépose les phases de plus basse température dans les parties plus externes, selon le processus bien connu de "zone-refining" (Edmond et al, 1995). Par exemple, dans les conditions régnant sur les sources hydrothermales, le cuivre ne peut rester en solution en dessous de 300°C. Le zinc précipite entre 100°C et 250°C (Figure 2-32). Ces caractéristiques chimiques propres à chaque élément font que les métaux se répartissent dans les cheminées et dans les amas de sulfures selon les gradients de températures. Le cuivre se trouvera dans le cœur (chaud) des édifices, tandis que le zinc sera concentré à l'extérieur (froid). Ainsi, la zonation des monts et des cheminées est fonction de la température et implique le remplacement des assemblages précoces de basse température riches en zinc par des assemblages plus riches en cuivre. D'autres métaux suivent ces deux grandes familles d'éléments, le cobalt, le nickel, le sélénium, sont préférentiellement associés au cuivre, tandis que le cadmium, le plomb l'arsenic, l'antimoine, le germanium et l'indium sont associés au zinc. L'or a un comportement plus complexe et peut être associé soit au cuivre soit au zinc.

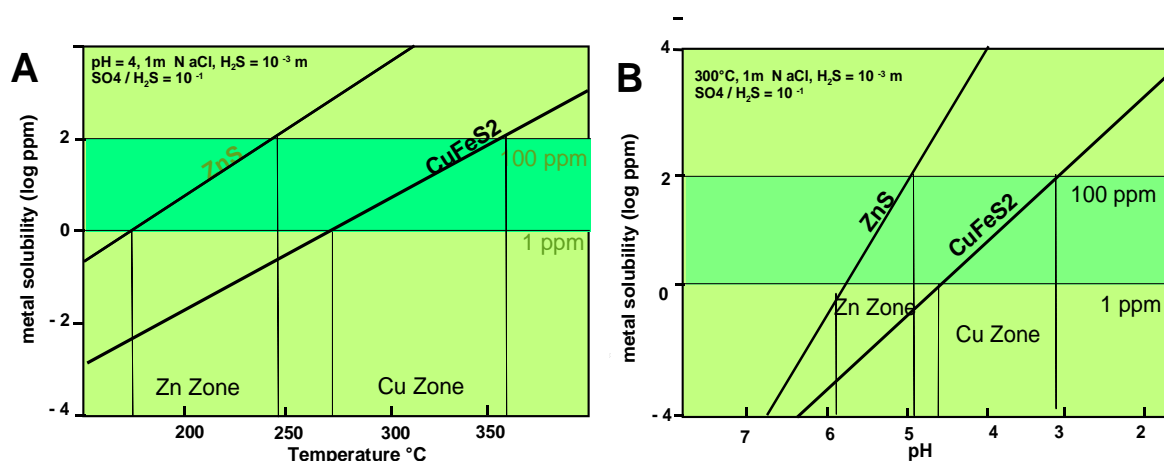


Figure 2-32 Solubilité de la chalcopryrite (CuFeS_2) et de la sphalérite (ZnS) en fonction de la température et du pH (d'après (Hannington et al, 1995)).

Les fluides hydrothermaux contiennent entre 1 et 100 ppm de Cu et Zn. Ils précipiteront de la chalcopryrite entre 350°C et 270°C tandis que la sphalérite (sulfure de zinc) précipitera entre 250°C et 175°C (diagramme A). Le diagramme B montre que le sulfure de cuivre précipitera à des pH entre 3 et 4,5 tandis que le sulfure de zinc précipite à des pH plus élevés compris entre 5 et 6. Cette différence induit une zonation des cheminées hydrothermales et des monts de sulfures, le cuivre se localise au cœur du mont et des cheminées tandis que le zinc se localise dans les zones plus froides de la périphérie. D'après Fouquet et Lacroix, 2012.

Des minéralisations de "stockwork" peuvent se trouver en subsurface, en dessous des sites hydrothermaux actifs. Ces dépôts nécessitent une précipitation massive de sulfures en profondeur, avec une extraction efficace des métaux du fluide. Trois processus majeurs peuvent conduire à une précipitation en subsurface : (1) l'incorporation d'eau de mer dans le circuit hydrothermal, (2) le refroidissement du fluide hydrothermal par conduction sous une zone imperméable et (3) une séparation de phase provoquée par l'ébullition du fluide en subsurface avec une ségrégation spatiale d'une phase vapeur riche en gaz (H_2S , SO_2 , CO_2 , H_2), pauvre en Cl et métaux, et d'une phase saumure concentrée en métaux (Embley et al, 1988; Goldfarb et al, 1983; Massoth et al, 1989).

Enfin, les études géochimiques de dépôts hydrothermaux ne concernent pas seulement la minéralogie et concentrations en métaux, mais incluent aussi une approche isotopique qui permet de discuter des processus précipitation et remobilisation des métaux, à la fois au niveau des édifices hydrothermaux ou dans les niveaux plus profonds la croûte océanique (John et al, 2008; Ono et al, 2007; Rouxel et al, 2004b; Rouxel et al, 2008).

Tonnage et vitesse de formation

Un certain nombre de traceurs géochimiques, notamment isotopique (U/Th, $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$, ^{210}Pb) ont été utilisés pour dater les dépôts (Koski et al, 1994; Lalou and Brichet, 1982). Bien que de fortes différences existent entre les sites, la plupart des cheminées hydrothermales actives ont des taux de croissance rapides, de l'ordre de quelques cm par jours (Hekinian et al, 1983). Les édifices les plus importants, tels que les monts hydrothermaux peuvent se former sur des échelles de temps de l'ordre du millier d'années. Ainsi, pour le site hydrothermal de TAG, les dépôts d'oxydes de Fe et Mn indiquent un début d'activité hydrothermale de basse température, il y a au moins 125 000 ans. Sur les sites sulfurés, les âges les plus anciens atteignent 40 000 ans, et les sulfures se sont formés de manière discontinue, avec des intensités maximales à 15 000, 7 000 et 4 000 ans (Lalou et al, 1993).

Un groupe d'une dizaine de fumeurs noirs de 2 cm de diamètre émettant un fluide contenant 100 ppm de métaux à 2 m/s, produit 250 tonnes de sulfures métalliques par an. Un champ actif peut regrouper une cinquantaine de ces fumeurs et la durée de vie du champ peut être de plusieurs dizaines de milliers d'années. Dans un tel système, environ 1.5 millions de tonnes de sulfures (principalement de sulfures de fer) peuvent être produites tous les 100 ans. On estime toutefois que plus de 95 % des métaux sont dispersés dans l'eau de mer. Il faut donc un piège efficace et des configurations géologiques particulières pour retenir un pourcentage plus important des métaux.

Lorsque les systèmes sont stables, il se forme des monts de sulfures polymétalliques pouvant dépasser 70 m de haut et quelques centaines de mètres de diamètre comme cela a été observé sur le site hydrothermal de TAG (Humphris et al, 1995; Kleinrock and Humphris, 1996). Ces amas de sulfures totalisent plusieurs millions à dizaines de millions de tonnes. Les volumes, tonnages et concentrations en éléments valorisables de tels dépôts sont identiques à ceux de nombreuses mines exploitées à terre.

2.4.4.5. Les panaches hydrothermaux

Les panaches hydrothermaux se forment partout où des fluides hydrothermaux chauds et moins denses que l'eau de mer entrent dans l'océan. Ils représentent un mécanisme de dispersion importante pour les flux thermiques entre l'eau de mer et la croûte océanique. Il a été largement reconnu que les sources hydrothermales représentent une importante source de nombreux éléments des océans et constituent un important puits de la colonne d'eau sus-jacente pour les autres (Baker et al, 1985; Baker and Massoth, 1986; Cronan, 1976; de Villiers and Nelson, 1999; Lupton, 1996; Lupton, 1998; Lupton and Craig, 1981; Mortlock and Froelich, 1986; Trefry and Metz, 1989; Weiss et al, 1977).

Les fortes différences géochimiques entre les fluides hydrothermaux et l'eau de mer sus-jacente ont été largement exploitées pour identifier de nouveaux systèmes hydrothermaux à travers la recherche d'anomalies géochimiques dans la colonne d'eau, en particulier en utilisant les concentrations en Mn, CH₄ et les isotopes de l'hélium (Bougault et al, 1998; Charlou et al, 1987; Lupton et al, 1989; Lupton et al, 1985; Lupton et al, 1977; Wilson et al, 1996). Pour les biologistes, les panaches hydrothermaux représentent un mécanisme de transport efficace pour disperser la faune des cheminées, facilitant les échanges génétiques entre les sites actifs le long des dorsales océaniques (Adams et al, 2011; Dick et al, 2013; Mullineaux et al, 2010). Dans certains cas, la chaleur et l'énergie libérée dans panaches hydrothermaux pourraient agir comme une force motrice pour la circulation océanique à profondeur intermédiaire (Helfrich and Speer, 1995).

Il a été longtemps admis que la plupart des métaux précipitent rapidement dans le panache hydrothermal et qu'une quantité se retrouve dispersée dans la colonne d'eau. Récemment, l'importance des sources hydrothermales dans les cycles océaniques globaux des métaux par rapport aux autres sources marines commence tout juste à être reconnu. En particulier, les preuves croissantes suggèrent que les composés organiques se lient et stabilisent les métaux dans les fluides hydrothermaux, en augmentant leur flux dans les océans profonds (Bennett et al, 2008; Sander and Koschinsky, 2011; Toner et al, 2009; Wu et al, 2011). Cette question est particulièrement importante pour les métaux traces essentiels à l'activité biologique tels que le fer. Ainsi, la stabilisation de seulement 1 % du flux hydrothermal pourrait apporter la quasi-totalité du fer mesuré dans l'océan profond. Malgré cette importance, il existe très peu d'études sur les contributions des sources hydrothermales dans le cycle des métaux des océans

profonds. Une meilleure compréhension des principaux paramètres contrôlant la distribution et la biodisponibilité des métaux dans la mer profonde est donc urgente afin de prévoir comment la distribution des métaux et leurs formes chimiques pourraient être affectées par l'exploitation minière des sulfures hydrothermaux. Un autre paramètre fondamental qui a été également largement négligé est l'importance de la circulation atmosphérique et la dynamique de l'océan de surface sur l'exportation de haute mer des métaux et des organismes (ex : les larves) à partir de sources hydrothermales (Adams et al, 2011; Gross et al, 1988; Lutz et al, 1984).

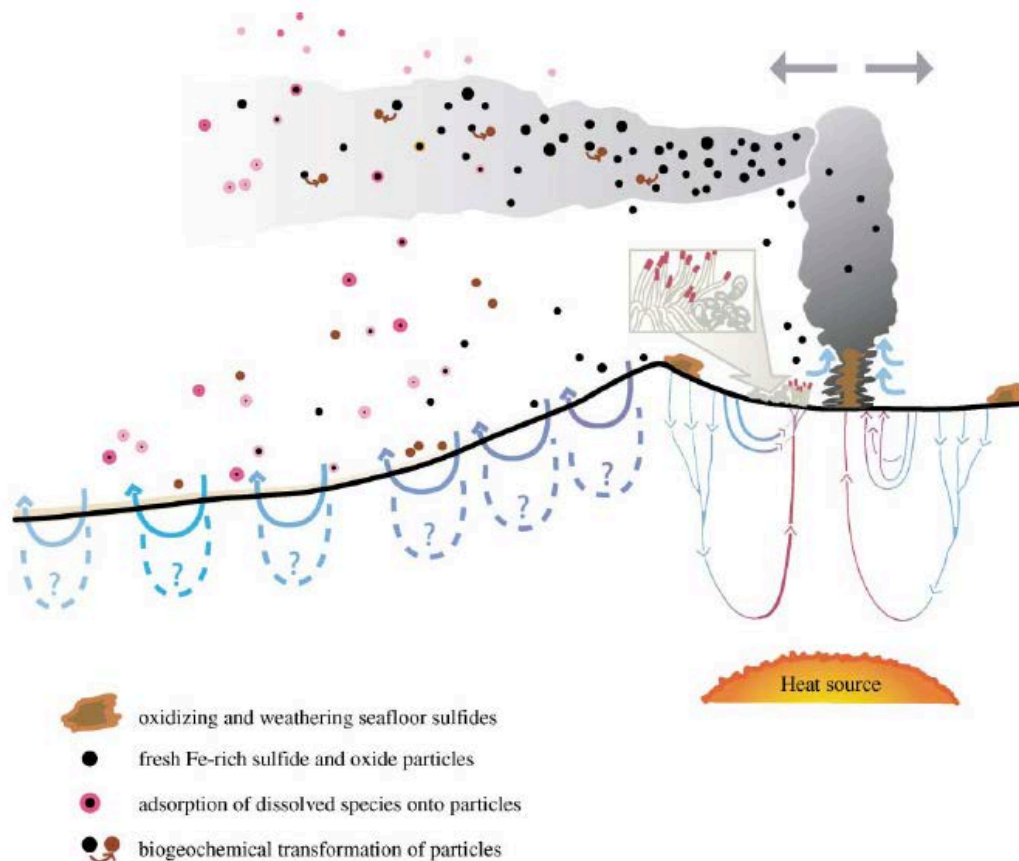


Figure 2-33 Représentation schématique d'un système hydrothermal MOR et ses effets sur la colonne d'eau sus-jacente.

Dans le panache hydrothermal, les métaux sont rapidement précipités sous la forme de sulfures. L'adsorption de oxyanions aqueux (par exemple, le phosphate, le vanadium, arsenic) et les terres rares peut se produire sur les particules oxydées, permettant un piégeage de ces éléments dans l'eau de mer. Des transformations biogéochimiques se produisent également dans le panache. Ces particules, une fois précipitées, sont incorporées dans les sédiments marins profonds, formant localement des sédiments métallifères. D'après German and Van Damm, 2004

Importance des flux hydrothermaux de haute température sur les cycles océaniques

Les fluides chauds (>300°C) émis au niveau des sources hydrothermales ont des compositions chimiques variables d'un site à un autre, contrôlées en particulier par les processus géologiques (tectonisme, magmatisme), par les interactions eau/roche et par le processus de séparation de phase (Von Damm et al, 2001). On peut illustrer cette variabilité en prenant l'exemple du di oxyde de carbone qui est souvent dominant dans les fluides en contexte basaltique. Cependant, il peut être parfois absent dans les systèmes ultrabasiques ou au contraire être présent en très grande quantité, comme dans les systèmes de bassin arrière-arc (ex. Lupton, 2006). De la même manière, les enrichissements en gaz, contrôlés par la

séparation de phase en profondeur, dépendent de facteurs tels que des intrusions magmatiques ou des événements tectoniques. Sur les dorsales rapides, on a ainsi pu mettre en évidence les conséquences d'une intrusion magmatique sur la libération de très grandes quantités de CO₂, He et H₂ (Lilley, 2003). De fait, il est extrêmement difficile de prédire l'évolution temporelle de la concentration finale d'un fluide et encore moins de la généraliser à l'ensemble des sorties de fluide chaud. Ceci limite par conséquent l'évaluation du flux de matière hydrothermale à l'échelle globale, d'autant plus que seuls environ 20% des dorsales médio-océaniques ont été explorées à ce jour (pour environ 300 sites hydrothermaux connus). Les estimations de flux globaux tels qu'on les connaît aujourd'hui ont été calculées par diverses méthodes géophysiques et géochimiques (Elderfield and Schultz, 1996) (Tableau 2-19). Plus récemment, (Nielsen et al, 2006) ont estimé à partir des isotopes du thallium des flux globaux de fluide chaud à l'axe des dorsales de l'ordre de 0.72×10^{13} kg/an, qui concordent avec d'autres techniques basées sur les isotopes du Li et du Sr (Elderfield and Schultz, 1996). D'un point de vue spécifique, ces calculs de flux ne tiennent pas compte de la variabilité d'un site à l'autre, ni des processus de précipitation et d'oxydation dans le panache. Au final le flux net des espèces chimiques lié à l'hydrothermalisme profond peut être très différent des valeurs calculées par (Elderfield and Schultz, 1996).

Tableau 2-19 Comparaison des flux hydrothermaux (fluides chauds) calculés par des méthodes géophysiques avec les apports fluviaux. D'après Elderfield et Schultz, 1996.

Element	$C_{\text{hydrothermal fluid}}$ (mol/kg) ^b	C_{seawater} (mol/kg) ^b	$F_{\text{hydrothermal}}$ (mol/year)	F_{rivers} (10^{10} mol/year)
Li	411–1322 μ	26 μ	$1.2\text{--}3.9 \times 10^{10}$	1.4
K	17–32.9 m	9.8 m	$2.3\text{--}6.9 \times 10^{11}$	190
Rb	10–33 μ	1.3 μ	$2.6\text{--}9.5 \times 10^8$	0.037
Cs	100–202 n	2.0 n	$2.9\text{--}6.0 \times 10^6$	0.00048
Be	10–38.5 n	0	$3.0\text{--}12 \times 10^5$	0.0037
Mg	0	53 m	-1.6×10^{12}	530
Ca	10.5–55 m	10.2 m	$9.0\text{--}1300 \times 10^9$	1200
Sr	87 μ	87 μ	0	2.2
Ba	> 8 to > 42.6 μ	0.14 μ	$> 2.4\text{--}13 \times 10^8$	1.0
SO ₄	0–0.6 m	28 m	-8.4×10^{11}	370
Alk	-0.1 to -1.0 m	2.3 m	$-7.2\text{--}9.9 \times 10^{10}$	3000
Si	14.3–22.0 m	0.05 m	$4.3\text{--}6.6 \times 10^{11}$	640
P	0.5 μ	2 μ	-4.5×10^7	3.3
B	451–565 μ	416 μ	$1.1\text{--}4.5 \times 10^9$	5.4
Al	4–20 μ	0.02 μ	$1.2\text{--}6.0 \times 10^8$	6.0
Mn	360–1140 μ	0	$1.1\text{--}3.4 \times 10^{10}$	0.49
Fe	750–6470 μ	0	$2.3\text{--}19 \times 10^{10}$	2.3
Co	22–227 n	0.03 n	$6.6\text{--}68 \times 10^5$	0.011
Cu	9.7–44 μ	0.007 μ	$3.0\text{--}13 \times 10^8$	0.50
Zn	40–106 μ	0.01 μ	$1.2\text{--}3.2 \times 10^9$	1.4
Ag	26–38 n	0.02 n	$7.8\text{--}11 \times 10^5$	0.0088
Pb	9–359 n	0.01 n	$2.7\text{--}110 \times 10^5$	0.015
As	30–452 n	27 n	$0.9\text{--}140 \times 10^5$	0.072
Se	1–72 n	2.5 n	$3.0\text{--}220 \times 10^4$	0.0079
CO ₂	5.7–16.7 m	2.3 m	$1.0\text{--}12 \times 10^{11}$	
CH ₄	25–100 μ	0 μ	$0.67\text{--}2.4 \times 10^{10}$	
H ₂	0.05–1 m	0 m	$0.3\text{--}1.5 \times 10^{10}$	
H ₂ S	2.9–12.2 m	0 m	$0.85\text{--}9.6 \times 10^{11}$	

^aBased on Table 1 of Kadko et al (1994) using a water flux of $3(\pm 1.5) \times 10^{13}$ kg/year.

^bm = 10^{-3} ; μ = 10^{-6} ; n = 10^{-9} .

Afin d'estimer plus finement les apports hydrothermaux à la colonne d'eau, il est nécessaire de connaître les flux à l'échelle régionale, en l'occurrence à l'échelle du segment de dorsale impacté par le panache hydrothermal. A ce jour, il n'existe que très peu d'études s'intéressant aux flux à l'échelle du site hydrothermal, encore moins dans le panache. (German et al, 2010) ont utilisé une approche intégrée pour déterminer les flux de matière à l'échelle du site de

Rainbow sur la dorsale médio-atlantique (36°N), basée sur les relations entre les traceurs chimiques et les paramètres physiques du panache et sur la mesure de la vitesse du panache ascendant. La combinaison des mesures physiques verticales et des mesures de concentrations des traceurs permettent ainsi de définir des flux d'exportation à travers l'ensemble du panache et ainsi de mieux cerner le flux net total sur l'ensemble du site. Ainsi, pour le site de Rainbow, German et al. (2010) ont calculé des flux pour le CH₄ et le Mn total de l'ordre de 1 mol.s⁻¹ et 0.9 mol.s⁻¹ respectivement. De la même manière, (Schmale, 2012) se sont intéressés à la contribution du site Logatchev (MAR) et ont calculé un flux de 3.2 mol.s⁻¹ pour le méthane. L'intérêt de cette dernière étude est de mettre en évidence la variabilité des flux selon l'endroit où l'on se place dans le panache. Ainsi, en aval de la source (~10 km), dans le panache horizontal, le flux de méthane issu de la cheminée principale n'est plus que de 0.21 mol.s⁻¹, soit 95% du méthane total oxydé. Au contraire, (Keir, 2008) a calculé des transports de méthane plus élevés dans le panache que dans le fluide (0.5 mol.s⁻¹ et 0.056 mol.s⁻¹ respectivement) mettant en évidence le rôle des courants de marée mais également le mode de calcul.

L'estimation des flux globaux de matériaux issus de la circulation hydrothermale de haute température passe donc par une étude intégrée à l'échelle du segment de dorsale, voire à l'échelle du site, en se focalisant non plus sur la quantité de fluide émise mais sur la différence de concentrations des espèces chimiques entre le fluide et le panache et sur la mesure directe du flot issu des cheminées. Une telle démarche permettra de mieux comprendre l'impact de l'hydrothermalisme dans les processus biogéochimiques océaniques.

La dynamique et flux de matière des panaches hydrothermaux

La vitesse d'émission des fluides hydrothermaux dans l'eau de mer varie entre 30 et 240 cm/s (Bemis et al, 1993; Converse et al, 1984; Elderfield and Schultz, 1996; Little et al, 1987; Spiess et al, 1980). Ces solutions de haute température ont généralement une densité inférieure à l'eau de mer, ce qui permet leur remontée sous la forme de panaches. Au cours de la remontée, la dilution des solutions hydrothermales avec l'eau de mer se poursuit, et les panaches deviennent moins dynamiques. Finalement, à une certaine hauteur maximale au-dessus du plancher océanique, les densités de la masse d'eau dans le panache et dans l'eau de mer environnante s'égalisent et le panache cesse sa remontée, permettant à la masse d'eau de se propager latéralement en fonction des courants. La hauteur de l'élévation du panache au-dessus d'un site hydrothermal est comprise entre 150 m et 400 m, et plus le flux de chaleur est élevé, plus l'élévation du panache sera importante (German and Von Damm, 2003; Lupton, 1995). Un panache hydrothermal qui se propage latéralement est considéré comme un panache à flottabilité neutre ("*non buoyant*" en anglais).

Le facteur de dilution des solutions hydrothermales avec l'eau de mer dans la partie ascendante et verticale du panache (panaches "*buoyant*" ou à flottabilité positive) est de l'ordre plusieurs milliers, alors qu'il peut atteindre plusieurs millions dans la partie distale du panache horizontal à flottabilité neutre. Par exemple, dans le champ hydrothermal de TAG sur la dorsale médio-atlantique, le facteur de dilution est d'environ 6 000 à 10 000 (Elderfield et al, 1993; Rudnicki and Elderfield, 1993) entre 240 et 420 m au-dessus de l'évent. Au total, la remontée du panache à cette profondeur prend environ 40 minutes. Les panaches se retrouvent généralement plus hauts dans la colonne d'eau le long de la dorsale de Gakkel (Baker et al, 2004; Edmonds et al, 2003), notamment à cause du gradient vertical de densité extrêmement faible dans l'océan Arctique.

La dispersion latérale des panaches s'effectue dans la direction dominante des courants de fond et sont donc affectés par la direction et vitesse des courants océaniques. La morphologie et topographie des fonds océaniques, la présence ou non d'une vallée axiale ont une influence importante sur la diffusion et la migration des panaches à flottabilité neutre. Ainsi, les dorsales à taux d'expansion lent (< 4 cm/an), ont généralement des vallées axiales qui sont profondes de plus de 500 m ce qui implique que les panaches hydrothermaux s'étendent rarement au-delà de l'axe des dorsales. Dans ces conditions, il est possible que le matériel composant les panaches soit recyclé dans le panache ascendant et subir ainsi un nouveau cycle de re-précipitation/oxydation. Cependant, il convient de souligner que des anomalies en fer et manganèse dissous ont été détectées sur plus de 500 km en s'éloignant de l'axe de la dorsale lente médio-Atlantique (Saito et al, 2013) (Figure 2-34).

Concernant les dorsales à taux d'expansion plus rapide, telles que la dorsale Est-Pacifique, l'absence de vallée axiale permet une dispersion latérale efficace des panaches hydrothermaux, qui peuvent être tracés sur plusieurs milliers de kilomètres (Klinkhammer and Hudson, 1986; Lupton and Craig, 1981). En conséquence, les composés hydrothermaux portés par les panaches peuvent être dispersés sur de vastes zones océaniques. A cela, s'ajoute l'effet de la turbulence qui peut dans certains cas devenir dominante. Dans certains systèmes exposés, le courant général peut être perturbé par des mouvements verticaux, des ondes internes et des courants de marée qui vont alors dominer les processus de mélange et créer des panaches discontinus (Walter, 2010).

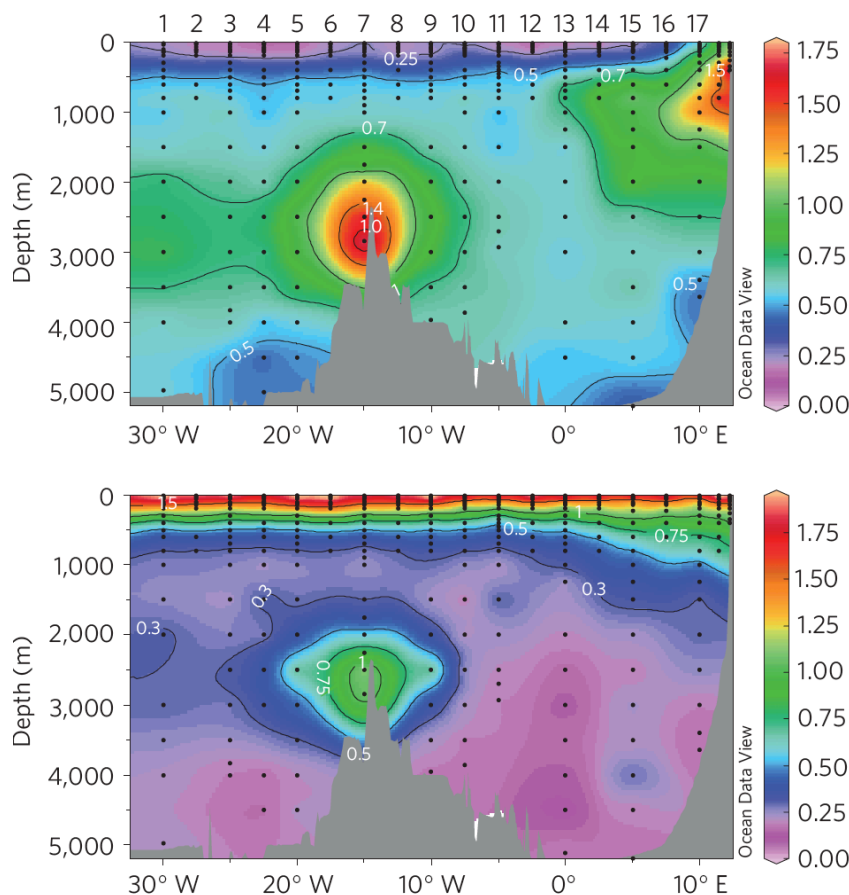


Figure 2-34 Profil de concentration en Fer total dissous (diagramme au dessus) et en Manganèse total dissous (diagramme en dessous) le long d'une section E-O de l'Atlantique Sud Equatorial. (D'après Saito et al, 2013)

Taux de sédimentation des particules dans les panaches hydrothermaux

Seule une partie des éléments présents dans les fluides hydrothermaux émis sur le plancher océanique est déposée directement dans les édifices hydrothermaux. Selon certains auteurs (Rona, 1984), environ 5 % de la matière métallifère hydrothermale qui pénètre dans l'océan s'accumule sous la forme de cheminées hydrothermales et de sulfures massifs, et environ 95 % est déposée hors du champ hydrothermal. Selon d'autres auteurs (Feely et al, 1994), plus de 99 % du fer et plus de 99,9 % du manganèse émis par les sites hydrothermaux du segment North Cleft de la dorsale Juan de Fuca finissent dispersés dans la colonne d'eau. Sur le site hydrothermal d'Endeavour, il a été déterminé que plus de 90 % de la matière particulaire du panache hydrothermal est transporté à plus de 2 km du site (Dymond and Roth, 1988). Une conclusion similaire a été suggérée par une analyse théorique (Converse et al, 1984) et sur d'autres sites hydrothermaux de la dorsale Juan de Fuca (Baker et al, 1985).

Les particules minérales forment immédiatement lors du mélange du fluide hydrothermal de haute température et l'eau de mer. La taille des particules minérales varie de moins de 10 μm à plus de 500 μm . Certaines de ces particules sont de nature très complexes (Feely et al, 1990; Roth and Dymond, 1989; Toner et al, 2009; Trefry et al, 1985; Trocine and Trefry, 1988; Walker and Baker, 1988). Les particules sont composées essentiellement de sulfures de minéralogie diverses (ex : pyrite $[\text{FeS}_2]$, sphalérite $[\text{ZnS}]$, pyrrhotite $[\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}]$, chalcopryrite $[\text{CuFeS}_2]$), de sulfates (anhydrite $[\text{CaSO}_4]$, barytine $[\text{BaSO}_4]$) et, dans certains cas, de silice amorphe (SiO_2). Au cours des processus de mélange dans le panache hydrothermal, d'autres phases minérales peuvent se former, notamment les oxydes et hydroxydes de fer et manganèse. Des agrégats de matière organique peuvent être également présents, et sont de nature et d'origine très diverses (ex : résidus de tissus biologiques, polymères bactériens). Enfin, un certain nombre de particules originellement présentes sur le fond océanique autour de sites hydrothermaux (sédiments métallifères, particules volcaniques) peut être entraîné lors de la remontée du panache hydrothermal.

En principe, la dispersion des particules dans le panache hydrothermal dépend de la taille des particules, la densité des minéraux composants, et la vitesse à laquelle les panaches s'élèvent dans la colonne d'eau. Cela a été clairement démontré par (Feely et al, 1987; Feely et al, 1994) pour les particules de pyrite, chalcopryrite, sphalérite et anhydrite dans le panache du site Monolith. Les particules de pyrite de taille supérieure à 50 μm sédimentent à une distance de 1 300 m du site ; les particules de chalcopryrite et de sphalérite ayant une densité inférieure sédimentent dans les 1 500 m, et les particules d'anhydrite de densité plus faible dans les 2 000 m.

Ce fractionnement minéralogique dans les particules du panache hydrothermal se traduit également par un taux de sédimentation différent entre les éléments chimiques (Figure 2-35). Jusqu'à présent, relativement peu d'études ont permis d'estimer les flux particulaires dans les panaches à l'aide de pièges à sédiments (Lukashin et al, 2012). Néanmoins, les données obtenues concernant les flux à différentes distances des sites hydrothermaux ont permis d'établir que le flux de la plupart des éléments diminue rapidement (relation sous forme logarithmique) en s'éloignant de la source hydrothermale. Les flux sont les plus élevés à la verticale des panaches à flottabilité neutre (Dymond and Roth, 1988; Lukashin et al, 2004). Les flux des métaux tels que Fe, Mn, Cu et Zn ont tendance à diminuer avec la distance des sources hydrothermales, mais les diminutions relatives des flux sont différentes entre les éléments (Figure 2-35). C'est la preuve de la différenciation des éléments en fonction de la distance des sources hydrothermales. **Un processus similaire est donc attendu dans le cas de la mise en suspension de particules lors des phases d'exploitation des sulfures hydrothermaux.**

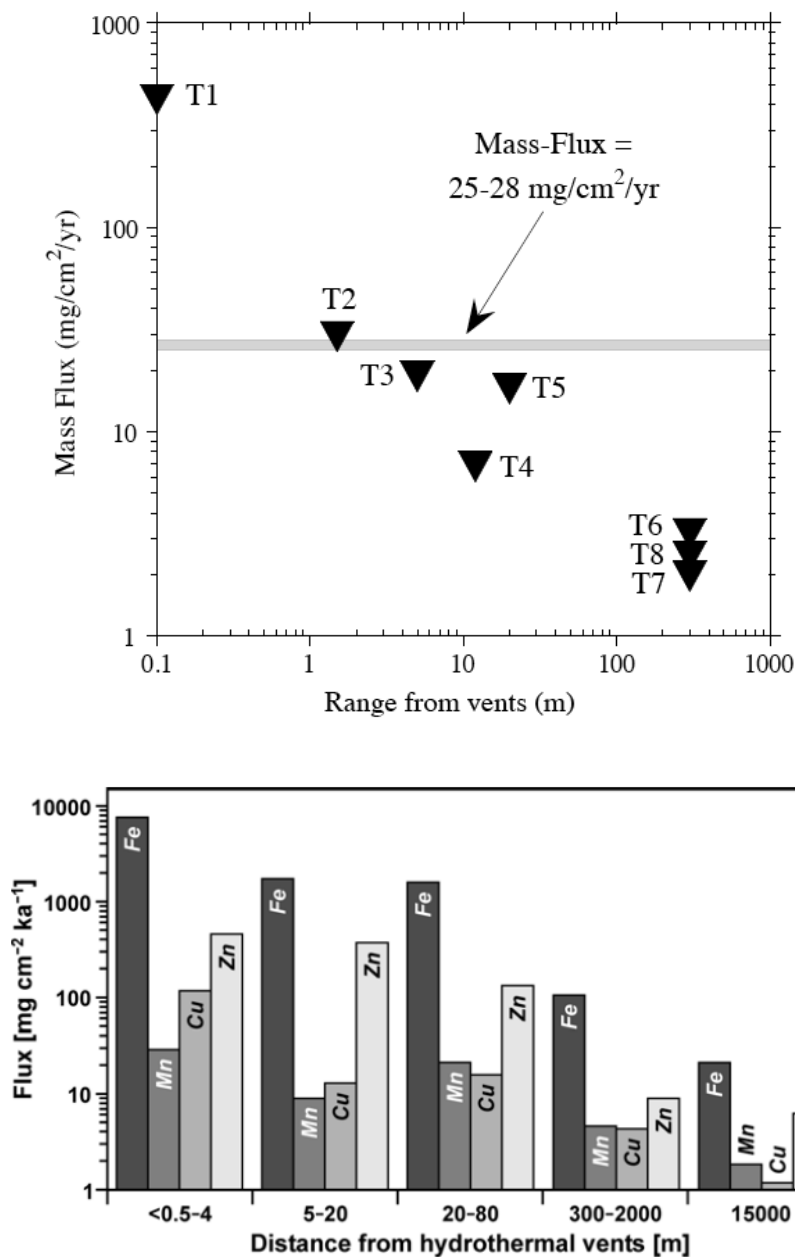


Figure 2-35 Taux de sédimentation moyens total (diagramme au dessus) et du Fe, Mn, Cu et Zn (diagramme au dessous) dans le panache hydrothermal de EPR à 13°N, en fonction de la distance par rapport aux sources hydrothermales.

D'après les données de (Dymond and Roth, 1988; German et al, 2002; Khripounoff and Alberic, 1991)

Temps de résidence des éléments dissous et particulaires des panaches hydrothermaux

Il est maintenant bien admis que l'activité biologique, notamment microbienne, exerce une influence importante sur la cinétique et la nature des réactions géochimiques dans les panaches hydrothermaux (Bennett et al, 2011a; Bennett et al, 2011b; Cowen and Li, 1991; Cowen et al, 1986; Cowen et al, 1990; Cowen et al, 1999; Cowen et al, 2002; Dick et al, 2009; Lam et al, 2008; Sunamura et al, 2004; Sylvan et al, 2012). Ainsi, la densité cellulaire des panaches hydrothermaux est systématiquement plus élevée que dans les eaux profondes environnantes. De même, les cinétiques d'oxydation du manganèse, de l'ammoniaque, et du méthane dans les panaches hydrothermaux sont plus importantes que dans l'eau de mer. Ces

observations indiquent bien que les panaches hydrothermaux représentent un biome microbien potentiellement unique.

Les mesures des cinétiques d'oxydation du fer ferreux Fe(II) dans les panaches hydrothermaux montrent une dépendance importante avec les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer environnante (O_2 , pH, T) et dans une moindre mesure avec la composition initiale du fluide hydrothermal (Field and Sherrell, 2000; Statham et al, 2005). Ainsi, les taux d'oxydation du Fe(II) les plus rapides se mesurent le long de la dorsale médio-atlantique ; ils sont intermédiaires sur les sites de la dorsale Pacifique du Sud-Est et de la dorsale Indienne ; et ils sont les plus lents le long de la dorsale Pacifique du Nord-Est. En revanche, le comportement du Mn dans les panaches diffère de celui du Fe. Seule une partie insignifiante du Mn est présente sous forme particulaire et les rapports Mn/Fe dans les particules en suspension sont beaucoup plus faibles que les rapports mesurés dans les fluides hydrothermaux (Mottl and McConachy, 1990; Trocine and Trefry, 1988).

De manière générale, le Mn (total) est oxydé beaucoup moins rapidement que le Fe (Cowen et al, 1990) peut être tracé sur de longues distances (Figure 2-34). A l'échelle de certains traceurs comme le fer ou le méthane, on considère le Mn comme un traceur conservatif (Cowen et al, 1990) avec un temps de résidence pouvant aller de quelques semaines à plusieurs mois. (Klinkhammer, 1985) ont calculé par exemple un temps de demi-vie de 45 jours. A titre de comparaison, le fer total a une demi-vie de quelques heures (ex. (Statham et al, 2005); (Field and Sherrell, 2000)) et le méthane, de quelques jours (11 jours (Kadko, 1990) à 17 jours (De Angelis, 1993)). Le comportement du manganèse a ainsi permis dans certaines études de déterminer le taux de mélange ou de dilution (mixing ratio) du panache et ainsi d'évaluer les concentrations endmember dans le fluide initial.

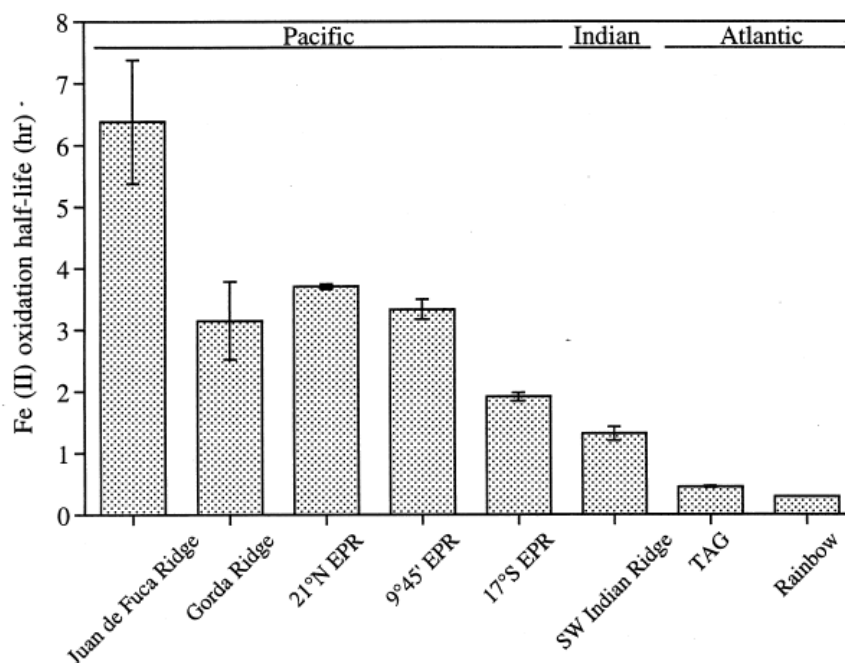


Figure 2-36 Vitesse d'oxydation du Fer ferreux dissous (rapportée en demi-vie) dans les panaches hydrothermaux de différents sites hydrothermaux. D'après Field and Sherrell, 2000

La distribution du méthane dissous dans les panaches hydrothermaux est contrôlée par la dilution et l'oxydation microbienne, ce qui se traduit la plupart du temps par une diminution

des concentrations avec la distance et également un enrichissement en ^{13}C . Cette dernière information permet de déterminer le « vieillissement » du panache et donc d'estimer la distance à la source. Il apparaît dans de nombreuses études que l'oxydation du méthane a lieu dans les panaches « vieillissant » lorsque celui-ci est pris en charge par les courants océaniques (Cowen et al, 2002). Cependant, il a été démontré qu'il n'y avait pas de corrélation directe entre les concentrations en méthane et les taux d'oxydation spécifiques aux panaches, suggérant que d'autres processus biogéochimiques et/ou physiques viennent se superposer (ex. déstabilisation du panache par des courants océaniques).

Concernant la dégradation des particules hydrothermales du panache la cinétique de dissolution de ces particules semble essentiellement contrôlée par la minéralogie, la granulométrie, et la présence de composés organiques (Feely et al, 1987; Toner et al, 2009). L'activité des micro-organismes n'est pas encore clairement établie mais semble être liée à la nature et composition des particules (Sylvan et al, 2012).

Il a été démontré que les différents minéraux des panaches hydrothermaux résistent à leur dissolution dans l'eau de mer à des vitesses différentes et que les particules grossières sont généralement plus résistantes (Tableau 2-20). Parmi les minéraux répertoriés dans le tableau, la chalcopirite et la pyrite sont les moins rapidement dissoutes et l'anhydrite est le plus facilement dissous du fait de sa solubilité rétrograde en dessous de 160°C . En conséquence, malgré leur décantation au fond, les minéraux les moins solubles seront exportés plus loin des sources hydrothermales. La présence de composés organiques associés aux particules hydrothermales peuvent également influencer sur les taux de dissolution (Toner et al, 2009). Les taux de dissolution très variables des différentes particules, ainsi que l'implication potentielle des micro-organismes constituent des points de vigilance importants dans l'estimation des impacts potentiels de l'exploitation des sulfures hydrothermaux.

Tableau 2-20 Estimation des temps nécessaires pour une dissolution complète des minéraux de sulfures et sulfates principaux de panaches hydrothermaux, en fonction de la taille des particules.
Données compilées d'après (Feely et al, 1987) à partir des expériences de dissolution sur le site hydrothermal du Sud de la ride Juan de Fuca.

Minéraux	Formule	Temps nécessaire pour une dissolution complète en jours (j) ou années (a)				
		2 μm	10 μm	30 μm	50 μm	100 μm
Chalcopirite	CuFeS_2	964 j	13 a	40 a	66 a	132 a
Pyrite	FeS_2	218 j	3 a	9 a	15 a	30 a
Marcasite	FeS_2	23 j	113 j	340 j	1,5 a	3,1 a
Sphalérite	ZnS	48 j	241 j	2 a	3,3 a	6,6 a
Pyrrhotite	Fe_{1-x}S	11 j	55 j	164 j	273 j	1,5 a
Barytine	BaSO_4	58 j	289 j	2,4 a	4,0 a	7,9 a
Anhydrite	CaSO_4	0,5 j	2,3 j	7,0 j	12 j	23 j

2.4.5. Les autres types de ressources minérales marines profondes

2.4.5.1. *Les sites de production d'hydrogène naturel*

L'hydrogène, de même que le méthane, est généré en grande quantité lors de la serpentinisation des péridotites du manteau (roches ultrabasiques long des dorsales lentes ou ultra-lentes) ou lors de la réaction des laves en fusion avec l'eau de mer lors des éruptions ou lorsque les chambres magmatiques se situent à très faibles profondeurs (Baross et al, 1982; Charlou et al, 2002; Charlou et al, 2010; Charlou et al, 1998; Keir, 2010; Lilley et al, 1993) Tableau 2-20. On sait maintenant que la production d'hydrogène et de méthane est étroitement liée aux affleurements de roches ultrabasiques présents sur le plancher océanique et sur les murs des dorsales lentes. De l'hydrogène est produit par voie abiotique à faible température (< 20°C) par diffusion et dégazage de monts serpentinisés « inactifs » ou à haute température (> 350°C) au niveau des cheminées hydrothermales « actives ». La présence d'hydrogène est importante pour l'activité biologique des systèmes hydrothermaux (Petersen et al, 2011) et est impliquée notamment dans la méthanogénèse (production de méthane par les micro-organismes).

Tableau 2-21 Compositions chimiques types des fluides hydrothermaux en différents contextes géodynamiques et en fonction de la nature de la roche du substratum. D'après la compilation de (German and Von Damm, 2003)

	Dorsale	rapide	intermédiaire	intermédiaire	lente	(arrière) arc
	Substratum	basalte	basalte	sédiments	ultrabasique	felsique
pH	25°C, 1atm	2.5- 4.8	2.8 - 4.5	5.1 - 5.9	2.7 - 9.8	1.0 - 5
H₂S	mM	0.5 - 5.9	0 - 19.5	1.1 - 6.0	0.1 - 1.0	2.0 - 13.1
Mn	mM	< 7.1	< 1.0	< 0.2	< 2.3	< 7.1
Fe	mM	< 5.6	< 18.7	<0.18	<25	< 2.5
Cu	µM	< 150	< 142	< 1.1	< 162	< 34
Zn	µM	< 400	< 600	< 40	< 185	< 3000
Co	µM	< 0.4	< 0.2	< 0.005	< 14	-
Pb	µM	< 0.4	< 0.4	< 0.6	<0.2	3.2
CH₄	mM	< 0.5	-	-	< 2.5	-
NH₄	mM	< 0.1	<0.8	< 16	-	-
H₂	mM	<727	<0.5	-	< 16	-

Depuis 1995, sept sites actifs de haute température (> 350°C) ou de moyenne température (de l'ordre de 90°C) ont été découverts en domaine mantellique le long de la dorsale médio-atlantique à des profondeurs variant de 1 700 à 4 100 m (Charlou et al, 2010). Tous sont producteurs de quantités importantes d'hydrogène. De récents travaux montrent que le phénomène de serpentinisation est présent sur de nombreux segments des dorsales ultra-lentes arctiques et Ouest indienne (Cannat et al, 1995; Gracia et al, 1997; Rona et al, 1992). L'hydrogène se rencontre également dans les systèmes hydrothermaux à substrat basaltique (Lilley et al, 1982) mais généralement en concentration moindre. Dans certains cas bien particuliers, notamment en lien avec des éruptions sous-marines et l'ébullition du fluide hydrothermal, l'hydrogène peut atteindre de fortes concentrations sur les dorsales rapides (Tableau 2-20). Cet enrichissement est néanmoins de courte durée. A noter également que

certaines systèmes hydrothermaux en contexte ultrabasiques peuvent être de faible profondeur (ex Baie de Prony, Nouvelle Calédonie) et caractérisés par de fortes concentrations en H₂ et CH₄.

Les flux globaux d'hydrogène issus de la serpentinisation océanique sont, pour l'instant, mal connus. Les estimations actuelles de ces flux varient de 90 à 190 milliards de moles par an (Charlou et al, 2010). Ces calculs très préliminaires devront être précisés par une exploration continue et approfondie des dorsales lentes et ultra-lentes apportant les données de « terrain » mais aussi grâce aux expérimentations et travaux en laboratoire qui permettront de mieux comprendre les mécanismes réactionnels et modéliser le processus naturel de production-migration et les processus géochimiques et thermodynamiques mis en jeu à grande échelle.

Considérant que les ressources potentielles en hydrogènes sont associées aux sites hydrothermaux actifs en contexte ultrabasique, les impacts potentiels concernant leur exploitation seront celles associées aux activités des sites hydrothermaux.

2.4.5.2. *Les sédiments métallifères et saumures de la Mer Rouge*

La fosse Atlantis II Deep, en mer Rouge, est le seul bassin anoxique océanique qui ne soit pas euxinique (riche en hydrogène sulfuré) et qui possède de fortes concentrations en fer dissous. Elle représente donc un exemple unique de ce type de condition. De telles conditions ont existé dans l'océan profond Précambrien, lors du dépôt des gisements de fer rubané (Banded Iron Formation = BIF) de -3 600 à -1 800 Ma, et à 750 Ma durant la période de glaciation totale de la terre (Bekker et al, 2012).

La fosse Atlantis II Deep a été une zone privilégiée de l'exploration océanographique entre 1965 et 1985. Son étude s'est poursuivie depuis de manière plus épisodique entre 1985 et aujourd'hui. Il s'agit d'une dépression topographique située à 2 000 m de fond remplie de saumures hydrothermales chaudes, riches en métaux dissous et stratifiées. Ces saumures résultent de l'accumulation de fluides hydrothermaux denses issus de l'interaction d'eau de mer avec des sédiments évaporitiques adjacents du Miocène et les basaltes océaniques (Anschutz and Blanc, 1995 a et b; Anschutz et al, 1995; Blanc and Anschutz, 1995; Schoell and Faber, 1978; Zierenberg and Shanks, 1983; Zierenberg and Shanks, 1986). Actuellement la saumure profonde a une densité de 1,2, une salinité de 270, une température de 67°C et des teneurs millimolaires en Fe dissous. Les basaltes océaniques du fond de la fosse sont recouverts de sédiments métallifères de 1 à 30 m d'épaisseur déposés depuis 23 000 a ns (Anschutz and Blanc, 1995a). Les raisons qui ont motivé l'étude de ce système ont évoluées au cours du temps : de 1965 à 1968, description d'un site exceptionnel (Hunt et al, 1967) ; de 1969 à 1977, évaluation du potentiel minier des sédiments métallifères; de 1979 à 1997, comparaison de ce système avec les sources hydrothermales de type fumeurs noirs découvertes en 1979.

Les sédiments métallifères de la mer Rouge représentent un cas particulier et constituent à ce jour la plus importante minéralisation hydrothermale dans les océans. Bien que des niveaux à argile néoformés (nontronite) et hydroxydes de Fe et Mn (goethite, hématite, manganite, todorokite) soient observés, une grande partie des dépôts est composée de sulfures (sphalérite, pyrite, chalcoppyrite).

Dès 1969, deux sociétés industrielles (Preussag et IGS) conduisent des travaux d'exploration afin d'estimer le volume des dépôts et de comprendre les conditions de formation dans

diverses fosses (18 fosses sont actuellement connues). La plus grande, la fosse "Atlantis II Deep", couvre près de 60 km² à une profondeur de 2 000 m. Dans cette fosse, les sédiments métallifères atteignent une trentaine de mètres d'épaisseur sous une couche de 180 m de saumures (Figure 2-37) ; ils représentent 94 millions de tonnes de minerai et contiennent 1,7 millions de tonnes de zinc, 0,4 million de tonnes de cuivre, et 4 000 tonnes d'argent. En mai-juin 1979, les premiers essais de pompage sont effectués à partir d'un navire de forage en eau profonde. Plus récemment (été 2010), un permis d'exploitation a été délivré.



Figure 2-37 Photographie de sections de carottes (VA22-146KS) dans les sédiments métallifères de la mer Rouge (Fosse Atlantis II Deep).

(Section supérieure de 0 à 30 m datée de -23 000 ans à aujourd'hui). D'après P. Anschutz (EPOC, Bordeaux).

2.4.5.3. Les boues métallifères riches en terres rares

Une étude récente publiée par une équipe de géochimistes de l'université de Tokyo (Kato et al, 2011) a suscité un intérêt majeur pour les sédiments pélagiques de l'océan Pacifique qui montrent un enrichissement important en terres rares. Cette étude a en partie reposé sur l'analyse de plus de 2 000 échantillons de carottes sédimentaires de 78 sites dans l'océan Pacifique (Figure 2-38). Ainsi, deux zones d'enrichissements majeurs ont été identifiées : une dans le Pacifique Sud-Est avec des teneurs en terres rares entre 0,1 et 0,2 % et une autre près d'Hawaï avec des teneurs entre 0,04 et 0,1 %. L'enrichissement important en terres rares est directement lié aux processus de précipitation ou d'adsorption des terres rares de l'eau de mer sur des phases minérales riches en Fe et Mn d'origine probablement hydrothermale. Cet enrichissement en Fe, Mn et terres rares des boues rouges du Pacifique est d'ailleurs connu depuis très longtemps (German et al, 1990; Murphy and Dymond, 1984) avant même la découverte des systèmes hydrothermaux océaniques (Bostrom and Peterson, 1966; Cronan and Garrett, 1973).

Cependant, les concentrations annoncées (de l'ordre 0,1 à 0,2 % de terres rares) sont nettement inférieures à celles des minerais exploités à terre (de l'ordre de 5%) et similaires à celles de certains encroûtements cobaltifères où les terres rares sont associées à d'autres éléments valorisables tels que cobalt et platine. Dans les sédiments, la concentration maximale en terres rares lourdes tel que le dysprosium (72 g/t) est plus faible que celle des gisements terrestres (ex : Mount Weld en Australie 500 g/t) et comparable à celle des encroûtements (58 g/t). Le dysprosium est l'une des terres rares indispensables aux aimants permanents et dont l'offre pourrait être insuffisante à très court terme. La connaissance du potentiel réel des sédiments de Polynésie implique de réaliser un maillage d'échantillonnage resserré afin de déterminer la continuité latérale et verticale ainsi que les variations de concentrations en terres rares. La conclusion de l'équipe japonaise qui indique qu'1 km² de sédiments ces boues fournirait 1/5 de la consommation mondiale (1377 tonnes en 2009) de terres rares paraît prématurée.

Ces concentrations sont du même ordre de grandeur que celles de certains gisements de terres rares terrestres actuellement exploités en Chine. Cependant les gros gisements de Chine, des Etats Unis et d'Australie peuvent contenir des concentrations en terres rares comprises entre 5 et 10%. En revanche, une exploitation semble irréaliste parce que cet enrichissement est observé en profondeur, entre 10 et 70 mètres sous le fond de la mer. Ainsi, l'intérêt suscité par cette étude est essentiellement causé par l'importance des réserves potentielles en terre rares qu'elle révèle (1 km² exploité fournirait un cinquième de la demande mondiale annuelle actuelle) plutôt que par la possibilité d'une exploitation future.

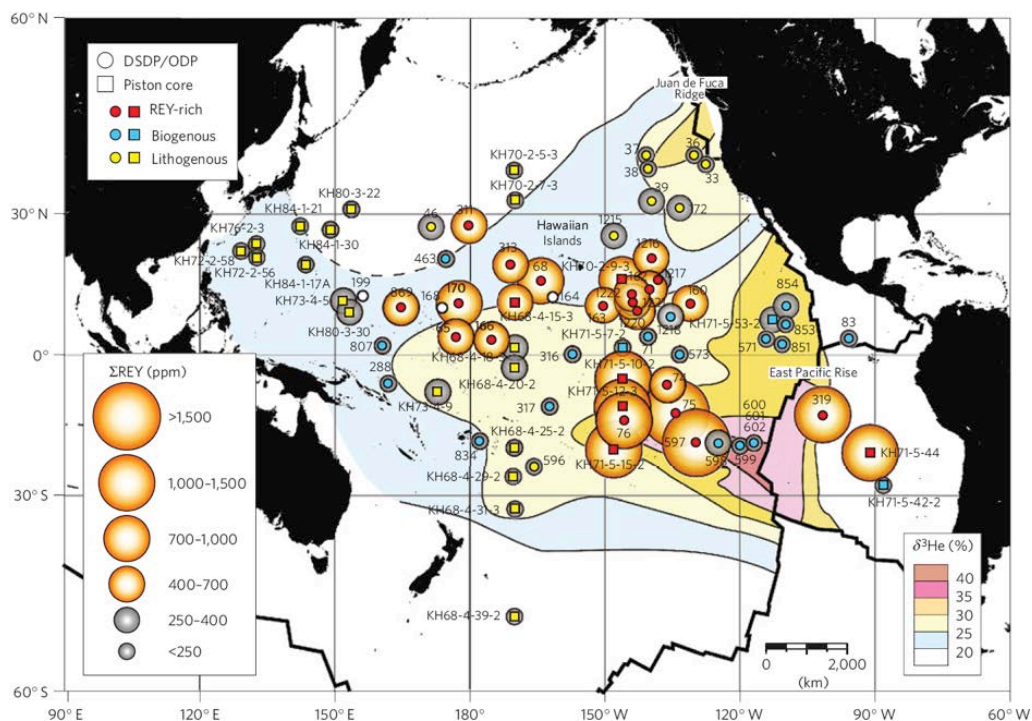


Figure 2-38 Distribution des teneurs moyennes en terres rares dans les premiers 2 m des sédiments marins dans l'océan Pacifique. D'après (Kato et al, 2011).

La superposition de la distribution des anomalies de la composition isotopique en hélium des océans montre l'importance du piégeage des terres rares par les particules hydrothermales provenant de la dorsale Sud Pacifique.

2.5. Degré d'évaluation et d'exploitation actuel des ressources minérales marines.

2.5.1. Enjeux économiques

Dès 1973, la présence de champs particulièrement riches avec une forte densité de nodules a été démontrée dans le Pacifique équatorial Nord, le long d'une ceinture Est-Ouest limitée par les zones de fracture de Clarion et de Clipperton d'où le nom de la zone CCFZ (Figure 2-4) (Morgan, 2000). Afin d'estimer les réserves potentielles en métaux des nodules et de les comparer à celles des dépôts terrestres, des efforts importants ont été menés depuis plus de 40 ans pour déterminer l'abondance en nodules et les tonnages en métaux stratégiques (Mn, Cu, Ni, Ti, Te, Co, Y etc.) de la zone CCFZ, notamment sous l'impulsion de l'ISA et grâce au travail de compilation de plusieurs organismes (Hein et al, 2013; ISA, 2010; Lenoble, 1996). Les estimations (Tableau 2-21) montrent que les nodules de la zone CCFZ renferment six mille fois plus de Ti, trois fois plus de Co et plus de Mn et Ni que la totalité des ressources terrestres globales, qui comprennent les réserves directement exploitables mais aussi celles de moindre importance économique. La zone de CCFZ a donc suscité un grand intérêt économique, avec 13 permis d'exploration (représentant chacun une zone de 75 000 km²) accordés ou en cours de signature avec l'AIFM.

Malgré ces investigations et le développement actif de techniques d'exploration et d'exploitation (cf. chapitre 3), l'exploitation des nodules n'a pas encore abouti pour diverses raisons : incertitude sur la rentabilité d'une exploitation, coût des traitements métallurgiques, problèmes politiques liés au droit de la mer et fluctuations du cours des métaux. L'exploitation des nodules pose également des questions majeures concernant l'impact environnemental de leur extraction sur de grandes surfaces (Halfar and Fujita, 2007). Ils constituent cependant une réserve potentielle importante en nickel, cuivre et cobalt qui permettraient de diversifier les sources d'approvisionnement en cas de tension sur les ressources continentales (Lampietti and Marcus, 1979). Dans ce contexte, la France a obtenu un permis minier dans le Pacifique Nord équatorial afin de réaliser des cartes à haute résolution, de comprendre les processus de formation des nodules les plus riches et de connaître la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes associés. Cette approche scientifique est indispensable afin de minimiser l'impact environnemental de leur exploitation éventuelle.

Tableau 2-22 Estimation des tonnages (x106 tonnes) en nodules de la zone de Clarion-Clipperton en comparaison avec les réserves terrestres et zones à encroûtements les plus riches d'après les données de l'USGS.

Elément	Symbole	Ressource estimée, nodules de la zone CCFZ ^(a)	Ressource estimée, encroûtements de la zone Pacifique "principale" ^(a)	Réserve terrestre probable ^(b)	Réserve terrestre prouvée ^(b)
Manganèse	Mn	5992	1714	5200	630
Cuivre	Cu	226	7.4	1000+	690
Titane	Ti	67	88	899	414
Terres rares ^(c)	(REE)	15	16	150	110
Nickel	Ni	274	32	150	80
Vanadium	V	9.4	4.8	38	14
Molybdène	Mo	12	3.5	19	10

Lithium	Li	2.8	0.02	14	13
Cobalt	Co	44	50	13	7.5
Tungstène	W	1.3	0.67	6.3	3.1
Niobium	Nb	0.46	0.4	3	3
Arsenic	As	1.4	2.9	1.6	1
Thorium	Th	0.32	0.09	1.2	1.2
Bismuth	Bi	0.18	0.32	0.7	0.3
Yttrium	Y	2	1.7	0.5	0.5
Platinoïdes ^(d)	(PGE)	0.003	0.004	0.08	0.07
Tellure	Te	0.08	0.45	0.05	0.02
Thallium	Tl	4.2	1.2	0.0007	0.0004

Les éléments surlignés en rouge correspondent aux métaux dont les réserves marines sont supérieures aux réserves terrestres. Données rapportées par (Hein et al, 2013).

(a) tonnage global en nodules de la zone Clarion-Clipperton (CCZ) et en encroûtements de la zone pacifique ("Prime Area") de 21,1 milliards de tonnes et de 7,5 milliards de tonnes (d'après Hein and Koschinsky, 2013)

(b) Estimation de réserves mondiales (données USGS) probables et prouvées (réserves économiques à sub-économiques)

(c) Terres rares (tonnage en oxydes)

(d) Eléments du groupe du platine (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt)

Traditionnellement, l'intérêt économique des encroûtements s'est porté sur les ressources en cobalt et, dans une moindre mesure, sur le nickel. De par leur très faible vitesse de formation (quelques mm par million d'années), les encroûtements sont plus épais dans l'océan Pacifique du Nord-Ouest, où la croûte océanique est la plus ancienne et les volcans sous-marins les plus nombreux. Les encroûtements du Pacifique Nord- Ouest sont également très riches en métaux, ce qui a permis de définir cette large zone comme "Zone Principale à Encroûtement" ou "Prime Zone for Crust" (Hein et al, 2009). Bien que toujours incertaines, les estimations de ressources qui ont été réalisées dans cette zone (Tableau 2-22) montrent qu'elle renferme presque deux mille fois plus de thallium, quatre fois plus de cobalt, et neuf fois plus de tellure que la totalité des ressources terrestres globales directement exploitables et d'importance économique moindre réunies. A noter également que les concentrations les plus élevées en cobalt (1.8 %) et en platine (3.5 g/tonne) sont situées en Polynésie, entre 1 500 et 2 000 mètres de profondeur. En revanche, aucune estimation de ressources n'a été établie à ce jour pour le Pacifique Sud, et en particulier pour la ZEE française.

Concernant les ressources en terres rares qui font actuellement l'objet de fortes tensions en approvisionnement à l'échelle mondiale, les nodules et encroûtements ne constituent pas une réserve principale. En revanche, l'intérêt économique de leur exploitation tient surtout de la nécessité des pays industrialisés de diversifier leur approvisionnement en terres rares, dans un contexte où un seul pays, la Chine, détient la quasi-totalité des ressources (97 % de la production globale (Price, 2010)).

Depuis quelques années, l'industrie minière s'intéresse aux minéralisations hydrothermales sous-marines. Des permis d'exploitation ont été délivrés en 2010 et 2011 sur des champs hydrothermaux des ZEE de la mer Rouge et de Papouasie Nouvelle-Guinée situés respectivement à 2 000 m et 1 500 m de profondeur. En 2011 et 2012, l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) a délivré pour la première fois des permis d'exploration dans les eaux internationales. Ces permis concernent les sulfures

hydrothermaux dans l'océan Atlantique et ont été déposés par la Russie et la France et dans l'océan Indien par la Chine et la Corée. Il est important de souligner que les sites hydrothermaux actifs ne sont pas à considérer en priorité comme des sites d'intérêt minier potentiel en raison de la température (jusqu'à 400°C) des fluides qui y circulent. En revanche, les gisements matures inactifs (dont la croissance est achevée) constituent les ressources principales, ce qui nécessite de développer des méthodes spécifiques permettant de localiser et d'évaluer ces gisements.

C'est donc un total de plus de 1,8 millions de km² de fond océaniques qui ont fait l'objet de dépôts de permis d'exploration, dont la moitié concerne des activités dans les ZEE qui ne dépendent pas de l'AIFM (Figure 2-39). Il est important de souligner que la très grande majorité des activités d'exploration minière pour les ressources en sulfures hydrothermaux se sont effectuées dans les ZEE alors que les activités en lien avec les nodules concernent la Zone régulée par l'AIFM.

L'enjeu économique des ressources minérales marines est donc important pour la France, mais également pour l'Europe. L'économie européenne est largement dépendante, souvent à plus de 90 %, de ses importations en métaux. Toutes les recherches ne pourront pas être menées par un seul pays. L'Europe devra se positionner du point de vue géopolitique par rapport aux autres grands pôles mondiaux, financer des recherches dans les eaux internationales et ne pas se restreindre à ses seules ZEE. C'est un enjeu majeur si l'Europe veut conserver sa position de leader du point de vue scientifique et technologique et se positionner sur les enjeux économiques que constituent les ressources potentielles des grands fonds océaniques.

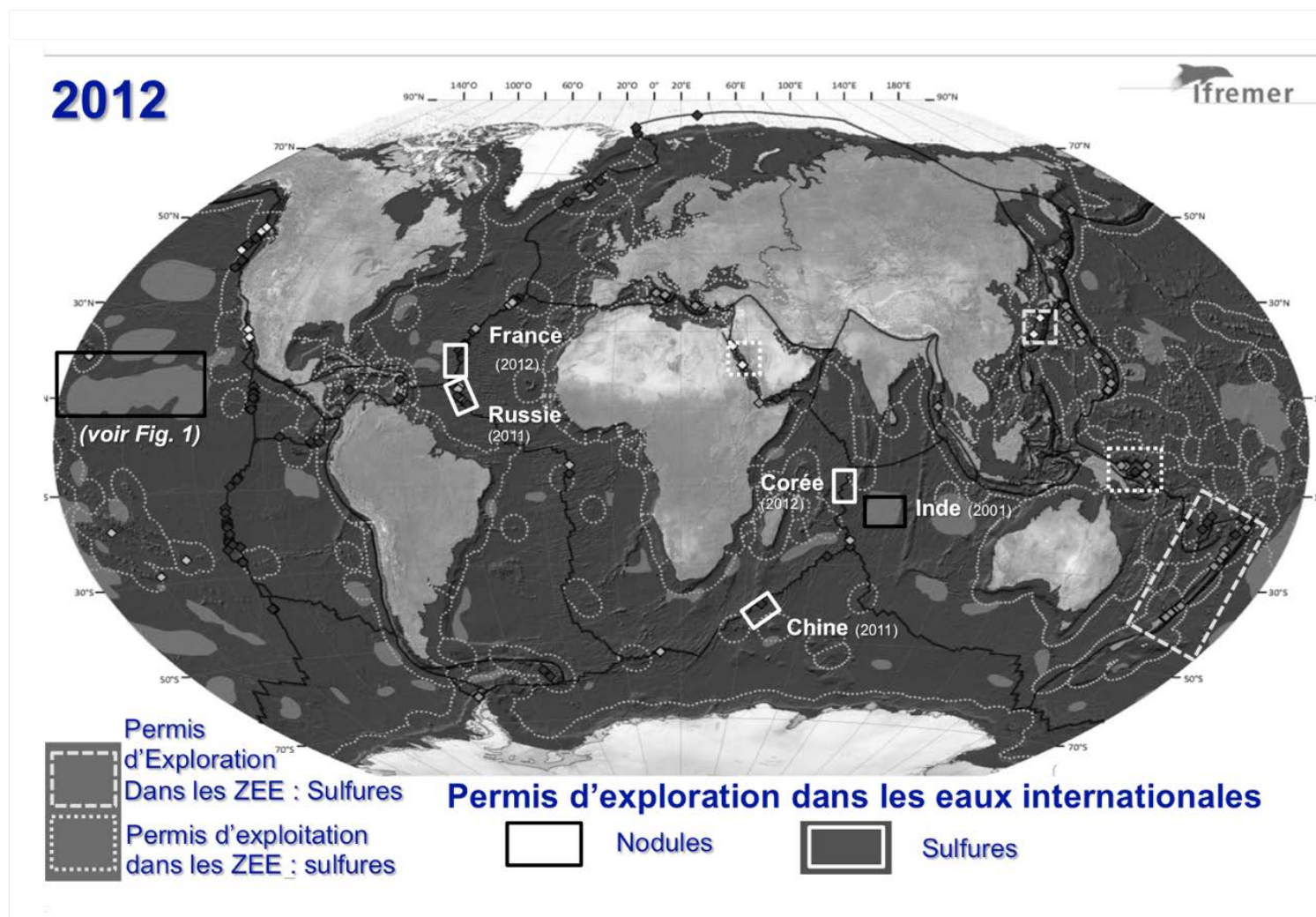


Figure 2-39 Localisation des permis d'exploration et d'exploitation attribués dans les ZEE et des permis d'exploration attribués par l'AIFM.
Les zones en gris clair, dans les océans, permettent de visualiser les principaux champs de nodules polymétalliques. Les losanges, sur les dorsales (traits noirs, au centre des océans) indiquent les principaux champs hydrothermaux connus.

2.5.2. Les nodules polymétalliques

À l'échelle mondiale, la zone de Clarion-Clipperton est la plus riche en métaux et en poids de nodules au mètre carré (de 8 à 10 kg/m²). Les nodules y sont particulièrement concentrés en cuivre (0,82 %), en nickel (1,28 %) et en manganèse (25,40 %). Les estimations sur cette zone montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km² (soit 15 % des fonds du Pacifique) à des profondeurs allant de 4 000 à 5 000 mètres, le poids total des nodules est de 34 milliards de tonnes, soit 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt.

En ce qui concerne le cuivre, la consommation mondiale annuelle est d'environ 16 millions de tonnes. Les nodules de la zone Clipperton représentent ainsi une réserve couvrant environ 17 années de la consommation mondiale. Des estimations de l'*United States Geological Survey* (USGS) montrent que la ressource potentielle en cuivre contenu dans des nodules polymétalliques à l'échelle mondiale est d'environ 700 millions de tonnes, ce qui est du même ordre de grandeur que les réserves prouvées dans les mines continentales (630 millions de tonnes). Notons qu'à terre, les ressources potentielles en cuivre sont estimées à 3 milliards de tonnes (Source : USGS).

L'évaluation de leur potentiel impliquerait maintenant d'inventorier les zones les plus riches en nodules grâce aux outils modernes de cartographie et d'imagerie à haute résolution et de mieux comprendre les processus de formation des nodules présentant les plus fortes concentrations.

2.5.2.1. Historique de la prospection minière française

La prospection des nodules polymétalliques dans le Pacifique a débuté par le Pacifique Sud autour de la Polynésie française pour continuer dans le Pacifique Nord entre les zones de fracture de Clarion et de Clipperton. Contrairement à l'exploration des sulfures hydrothermaux et des encroûtements qui a essentiellement été motivée par des objectifs purement scientifiques, l'exploration des nodules a été réalisée dans le cadre de prospection minière. Historiquement, la France (CNEXO puis Ifremer) a joué un rôle très important dans la prospection des nodules. Elle s'est déroulée en quatre phases majeures.

Phase 1 : Exploration du Pacifique Sud (1970-1974)

Dès 1970, le groupe français, qui ne comprenait alors que la Société Le Nickel (SLN) et le Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), entreprit une étude bibliographique exhaustive des données existantes sur les nodules polymétalliques : répartition géographique des indices, teneurs et abondance des nodules, relation avec la physiographie des fonds, la nature des sédiments, la présence de volcanisme, etc... Parallèlement, il réalisait le choix et la mise au point des outils d'exploration les mieux adaptés : engins libres préleveurs et caméras, capables de descendre par leurs propres moyens, de prélever ou de photographier le fond de l'océan et de remonter en surface après s'être libéré d'un lest.

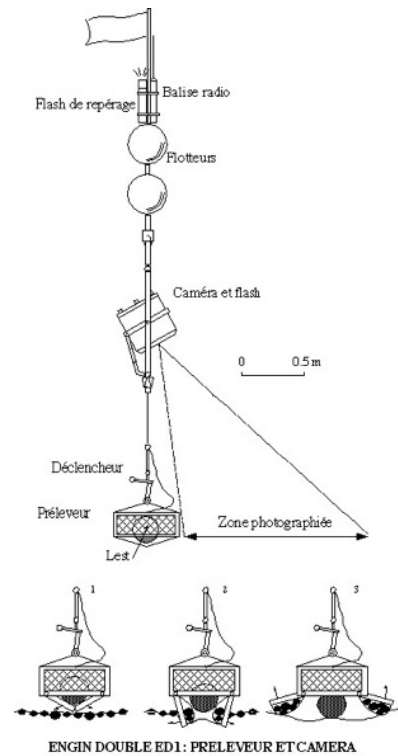


Figure 2-40 Photo et principe de fonctionnement de l'Engin Double (ED1).

La synthèse des données bibliographiques faisait rapidement apparaître :

- Une distribution spatiale des teneurs en nickel et en cuivre en faveur de l'océan Pacifique ;
- Une corrélation positive entre les teneurs en nickel, en cuivre et en manganèse, opposée à celle du fer, alors que le cobalt paraissait indépendant ;
- L'existence probable de deux grandes familles géochimiques dont l'une plus riche en nickel, cuivre et manganèse ;
- Une corrélation positive entre la famille géochimique riche en Ni, Mn, Cu et la présence d'une sédimentation ralentie de type argile rouge ou boues à radiolaires; les travaux ultérieurs ont montré une meilleure corrélation avec ce dernier faciès ;
- L'insuffisance de l'information jusqu'alors recueillie sur l'abondance des nodules ;
- Des disparités fortes dans la répartition géographique de cette information.

Les fonds océaniques proches de la Polynésie Française faisaient partie des zones jusqu'alors peu connues et où pouvait exister une sédimentation ralentie favorable à la présence de nodules riches en manganèse, nickel et cuivre. C'est tout naturellement dans cette zone que les premiers travaux d'exploration systématique ont été entrepris à partir de la base de Vairao que le CNEXO avait installée dans l'île de Tahiti.

Au total durant cette période, 16 campagnes d'exploration et une campagne de dragage ont été réalisées, totalisant 451 jours à la mer. 761 localités ont été échantillonnées, 2241 prélèvements effectués, 243 photographies du fond réussies, 19 traits filmés et 125 km d'images télévisées. Le poids total de nodules recueillis a atteint près de huit tonnes. 50 000 km d'enregistrements bathymétriques ont été effectués.

Les travaux de laboratoire comportèrent plus de 17 000 analyses chimiques (essentiellement métaux principaux Fe, Mn, Cu, Ni, Zn), des études aux microscopes métallographique et électronique, l'analyse minéralogique aux rayons X, des études à la microsonde électronique.

Les mesures bathymétriques effectuées au cours de ces campagnes, s'ajoutant aux données déjà existantes, ont permis l'élaboration d'une carte bathymétrique au 1/1 000 000^{ème} (GEBCO 297-327-328-358-359).

Phase 2 : Exploration systématique de la zone Clarion – Clipperton (1975-1976)

A la fin de 1974, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), puis au début de 1975, les Chantiers de France Dunkerque (CFD) ont rejoint la Société Le Nickel (SLN) et le CNEXO pour former AFERNOD, société en participation. Le programme prévoyait la reconnaissance systématique de la zone du Pacifique Nord, comprise entre les fractures de Clarion et de Clipperton, que les données de la littérature indiquaient comme la plus favorable.

Les travaux d'Afernod, utilisant les techniques géostatistiques à partir des données de la littérature et de ses données propres, avaient conduit à adopter une grille de reconnaissance de maille élémentaire carrée de 50 milles marins (environ 93 km) de côté. En effet, il apparaissait sur les variogrammes des teneurs une interdépendance des valeurs sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres. On pouvait ainsi espérer mettre en évidence les zones les plus favorables sur la base de quelques observations positives, tout en réalisant l'exploration de larges surfaces en quelques mois. La zone à prospecter, dont la superficie initiale dépassait 12 millions de kilomètres carrés, fut réduite progressivement à partir des critères suivants :

- abandon des zones situées à l'Ouest des îles de la Ligne en raison de leur trop grande profondeur ;
- limitation vers le Sud à l'approche des sédiments carbonatés de la zone équatoriale (boues à globigérines) où les nodules ont rarement été rencontrés ;
- limitation vers l'Est à l'apparition des sédiments carbonatés sur le flanc de la ride Est Pacifique, pour des raisons identiques, vers la longitude de 120° W. A l'arrivée sur une localité, 7 préleveurs et caméras étaient lâchés sur des points de station disposés en ligne tous les 300 m environ.

Entre août 1975 et septembre 1976, huit campagnes totalisant 198 jours de mer, visitèrent 259 localités réparties sur 2,25 millions de kilomètres carrés, où furent réalisés 1 828 prélèvements et 1 629 photographies du fond. 17 850 analyses chimiques furent effectuées au laboratoire confirmant celles faites en mer. Un examen très poussé de la morphologie et de la taille des nodules, associé à l'étude détaillée des photographies permit d'améliorer l'estimation de l'abondance des nodules sur le fond et leur faciès morphologiques correspondant à diverses familles géochimiques caractérisées par leur teneur en éléments stratégiques (Mn, Ni, Cu).

Phase 3 : Confirmation des résultats obtenus dans la zone sélectionnée (NORIA) (1976-1977)

Il fut tout d'abord décidé d'étendre assez largement l'exploration autour de la zone sélectionnée afin de mieux cerner les contours. La zone finalement prospectée atteint une superficie de 431 500 km².

La réalisation de trois campagnes de géophysique permit l'enregistrement de 9 700 km de sismique réflexion et 9 800 km de magnétisme et de bathymétrie. Six autres campagnes permirent de visiter 267 localités et d'effectuer 1 432 prélèvements, 1 373 photographies et 8 432 analyses chimiques. Ces campagnes ont permis de confirmer une orientation générale Nord-Sud des collines abyssales, soulignant une fracturation assez récente de même

orientation due au rejeu probable des cicatrices laissées par l'expansion océanique. Pour tenir compte de cette anisotropie, l'exploration a été réalisée selon une maille rectangulaire de 25 milles marins en Nord-Sud et 17 milles marins en Est-Ouest. La réalisation de deux profils se recoupant en forme de croix avec des stations espacées de 2,4 km en moyenne le long des profils confirma la validité d'une telle maille en ce qui concerne la composition chimique des nodules.

Après des études en simulation sur l'influence de la réduction du nombre de prélèvements par localité sur la qualité de l'information, il fut décidé de réunir le nombre de prélèvements par localité à 5 au lieu de 7. Pour saisir par contre les variations de l'abondance sur le fond, il aurait fallu adopter des intervalles entre stations 10 à 100 fois plus petits.

Phase 4 : Délimitation des sites miniers

La taille des sites miniers qui ont été envisagés durant la première période d'exploitation des nodules polymétalliques dépend de trois groupes de facteurs :

- le tonnage annuel que l'on envisage d'extraire et la durée minimum de l'exploitation ;
- l'efficacité des systèmes de ramassage ;
- les qualités du gisement retenu.

Les études préliminaires sur la faisabilité économique de ce type d'exploitation conduisent à penser que la cadence annuelle des premières tentatives d'exploitation devra dépasser 2 millions de tonnes humides, avec récupération de quatre métaux (manganèse, nickel, cobalt, cuivre), pour assurer leur rentabilité. Ceci correspond à la capacité maximale d'une unité de ramassage telle qu'on peut actuellement la concevoir. Il était à l'époque envisagé de passer ultérieurement à 4 millions de tonnes humides par an, capacité qui était jugée plus optimale pour les usines de traitement. La durée d'exploitation de ces premiers systèmes est de l'ordre de 20 à 25 ans, correspondant à la durée de vie des plus gros équipements, en particulier le support de surface nécessaire au ramassage en mer. L'efficacité des systèmes de ramassage reste très difficile à estimer et a fait l'objet de nombreuses controverses entre experts.

Les qualités du gisement retenu peuvent être exprimées par :

- la teneur des nodules en métaux récupérables ;
- leur répartition spatiale sur le fond.

Afin de délimiter les sites miniers avec le minimum de travaux, il a été décidé d'employer conjointement deux méthodes que le CNEXO avait commencé à développer dès 1976.

A) Une cartographie des fonds sous-marins suffisamment précise pour reconstituer avec le minimum d'incertitude la répartition de collines et de plaines abyssales dont les dimensions moyennes semblaient osciller entre :

- 2 à 10 km entre crêtes ;
- 5 à plusieurs dizaines de kilomètres d'allongement ;
- 100 à 200 m de variation d'altitude.

Le sondeur multifaisceaux Sea-Beam installé à l'époque sur le N.O. Jean Charcot était en effet capable de cartographier à chaque passage une bande de 3 à 4 km de large avec une résolution en altitude de quelques mètres. Même lorsque la navigation sur zone par les satellites Transit laissait subsister des erreurs de plusieurs centaines de mètres dans la position, il restait

parfaitement possible d'accoler les bandes successives avec le minimum d'incertitude et ainsi de reconstituer la structure d'ensemble (Figure 2-41).

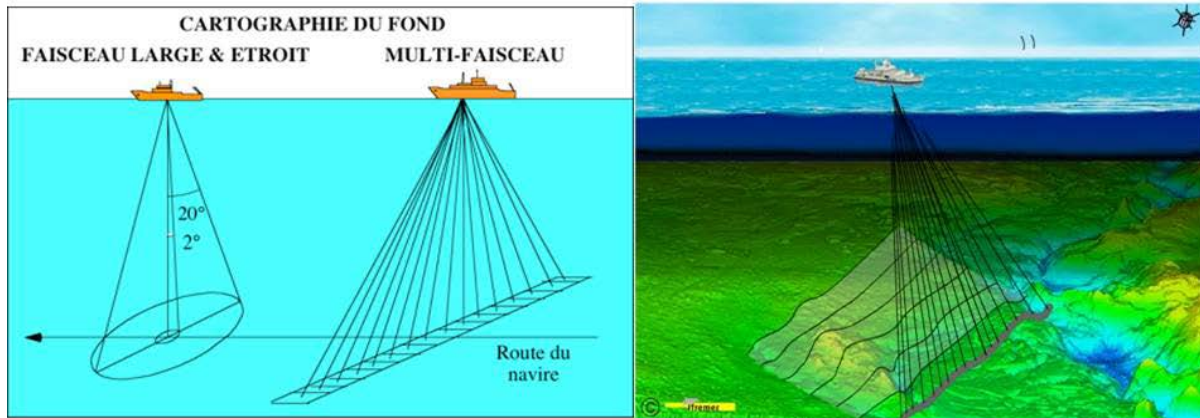


Figure 2-41 Sondeurs à faisceau large, à faisceau étroit et multifaisceaux.

B) L'observation de la couverture de nodules et des obstacles métriques à décimétriques à l'aide d'un poisson tracté derrière le navire (RAIE) ou d'un poisson autonome (EPAULARD). Equipés de caméras photographiques, de capteurs de pression et de sondeurs de sédiments, ces poissons permettent l'estimation de l'importance et de la nature des obstacles et de l'abondance des nodules (Figure 2-42). L'expérience a montré qu'il était préférable de disposer du levé bathymétrique par sondeur multifaisceaux avant la mise en œuvre des poissons. Les profils peuvent alors être choisis plus judicieusement en fonction de l'objectif à atteindre: reconnaissance des accidents ou évaluation de la couverture nodules. Le contrôle de la trajectoire est également grandement facilité.

La mise en œuvre de ces engins pouvait se faire indifféremment à bord du Jean Charcot ou d'un navire de plus petit tonnage, mais doté d'un treuil grand fond à forte capacité de câble. En les utilisant à bord du Jean Charcot, on peut enchaîner les opérations de cartographie à grande vitesse (10 noeuds) et l'observation du fond à vitesse de 1,5 nd (RAIE) à 2,5 nd (EPAULARD).

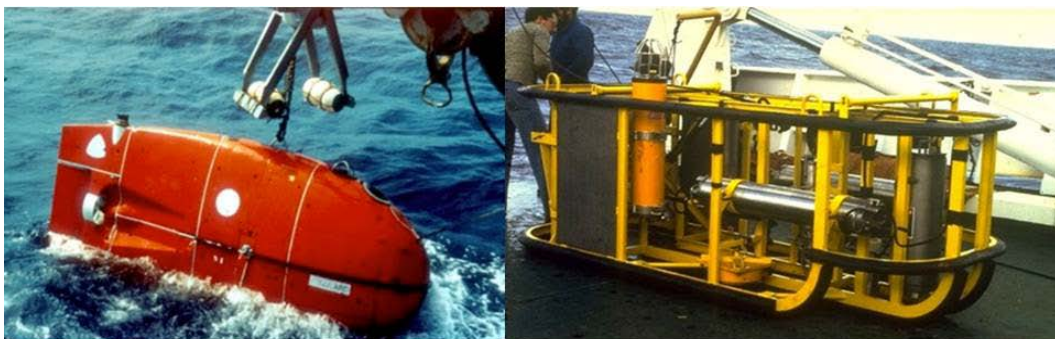


Figure 2-42 Epaulard et RAIE.

La mise au point des systèmes RAIE et EPAULARD a demandé plusieurs années et la réalisation de plusieurs campagnes d'essais technologiques. En octobre 1979, la première campagne mettant en œuvre le RAIE a pu être réalisée dans le Pacifique sur champs de nodules (NIXO 39). En 30 jours de mer, 15 traits de RAIE ont été réalisés totalisant 498 km et rapportant plus de 22 000 photographies. Fin mars 1980 le Jean Charcot effectuait une première campagne de levé bathymétrique au sondeur multifaisceaux (NIXO 40). Au cours de cette campagne de 35 jours de mer, 15 400 km de profils ont été réalisés assurant le levé de

bandes de 3 km de largeur au 1/25 000^{ème}. Un montage au 1/50 000^{ème} a été réalisé sur une superficie totale de 23 700 km².

Entre le 20 décembre 1980 et le 4 mai 1981, trois campagnes du N/O Jean Charcot ont été exécutées (NIXO 41 à 43), totalisant 97 jours de mer. Elles ont permis d'échantillonner les 450 000 km² de la zone NORIA par l'exploration de 24 "boîtes" choisies en tenant compte des caractéristiques économiques et d'environnement préalablement mis en évidence. Pour chacune de ces boîtes un levé Sea-Beam correspondant à une surface de 1 000 à 1 200 km² a été suivi par une évaluation du potentiel minier utilisant essentiellement les données provenant de traits de RAIE et/ou d'EPAULARD (bathymétrie détaillée et couverture nodules par photographies), ainsi que quelques prélèvements par engins libres et par carottiers. Le coefficient de réverbération du fond a été également mesuré au cours de deux de ces trois campagnes, en vue de déterminer l'utilité des mesures acoustiques pour l'estimation de l'abondance des nodules. De même, l'étude des enregistrements du sondeur 3,5 kHz a permis de préciser l'interprétation des zones étudiées et de tenter l'extrapolation des résultats économiques obtenus par ailleurs.

2.5.2.2. *Historique de la prospection au niveau international*

Le premier industriel à s'être intéressé aux nodules polymétalliques fut sans doute la société américaine Newport News Shipbuilding and Dry Dock Company à partir de 1962. Après avoir absorbé cette compagnie, Tenneco fonda en 1968 Deep Sea Ventures, Inc. une filiale entièrement dédiée au développement des technologies de mise en valeur des nodules.

En octobre 1974 Deep Sea Ventures devint l'opérateur unique du consortium Ocean Mining Associates (OMA) formé entre Tenneco, U.S. Steel, Union Minière (Belgique) et un groupe de cinq sociétés japonaises. En janvier de la même année Kennecott, société minière américaine avait formé un consortium, connu depuis sous le sigle KCON, avec quatre autres sociétés minières, Noranda (Canada), Rio Tinto Zinc (Grande Bretagne), Consolidated Gold Field (Australie) et Mitsubishi (Japon). AFERNOD se constituait en septembre 1974 entre le CNEXO, le CEA et la Société Le Nickel bientôt suivis par France-Dunkerque.

En mai 1975, quatre sociétés minières et métallurgiques allemandes réunies au sein du groupe AMR (Arbeitsgemeinschaft Meerestechnisch Gewinnbare Rohstoffe) s'associaient à International Nickel Corporation (INCO) et un regroupement de 19 compagnies japonaises (DOMCO) au sein d'Ocean Management Inc. (OMI).

En novembre 1977, la compagnie américaine Lockheed fondait Ocean Minerals Company (OMCO) avec Billiton (Shell, Pays-Bas) et Amoco (Standard Oil of Indiana).

Les quatre consortia multinationaux furent enregistrés aux Etats-Unis, et se livrèrent à de nombreux travaux durant les années 70 tant en matière d'exploration des gisements, que de développement des technologies de ramassage et de traitement. En 1978-1979 trois d'entre eux réalisèrent des pilotes de ramassage à la mer, dont deux avec succès. On estime à environ 400 millions de dollars les dépenses effectuées par ces consortia entre 1970 et 1980.

Ce n'est qu'en 1982 que fut fondé le groupe Deep Ocean Research Development (DORD) entre 49 organisations japonaises, parmi lesquelles on retrouve les sociétés déjà impliquées dans les consortia nord-américains. A la même période l'Union Soviétique annonçait la formation de Yuzmorgeologiya et le gouvernement indien d'un programme national mené sous l'égide du Department of Ocean Development.

Les discussions conduites au sein de la III^{ème} conférence sur le droit de la mer conduisirent les Etats-Unis (1980), puis l'Allemagne fédérale (1980), la France et la Grande Bretagne (1981) à prendre des dispositions législatives provisoires pour définir les conditions dans lesquelles leurs ressortissants pouvaient obtenir des titres miniers. Le Japon et l'URSS ont pris des dispositions similaires en 1982, et l'Italie en 1985.

Les dispositions prises par la France comportent la loi n° 81-1135 du 23 décembre 1981 sur l'exploration et l'exploitation des ressources minérales des grands fonds marins et le décret n° 82-111 du 29 janvier 1982 pris pour son application. Ces textes ont conduit le CNEXO à déposer une demande de permis d'exploration exclusive pour le compte d'AFERNOD auprès du Ministre chargé des mines. La législation française s'inscrit dans un contexte international fondé sur le mécanisme de réciprocité qui a encouragé les opérateurs privés à régler les conflits de chevauchement.

Dès 1980 des discussions s'étaient engagées entre AFERNOD et les quatre consortia multinationaux en vue d'éviter les chevauchements entre les demandes de titres miniers déposées auprès de leurs gouvernements respectifs. Ces négociations inclurent en 1983 le groupe japonais DORD et aboutirent à un accord éliminant tout chevauchement signé le 15 décembre 1983 à Tokyo. Le gouvernement français, à l'instar des principaux gouvernements occidentaux, a endossé et garanti les résultats de ces négociations par l'accord, signé à Genève le 3 août 1984 entre huit états (Allemagne Fédérale, Belgique, Etats-Unis, France, Grande-Bretagne, Italie, Japon, Pays-Bas).

Le 10 décembre 1982 la France signait la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer. Cette signature emporte quelques conséquences non négligeables : la reconnaissance de principe que les fonds marins et leurs ressources minérales sont le "patrimoine commun de l'humanité", la reconnaissance de l'institution et des procédures mises en place pour l'application de ce principe. La Commission Préparatoire de l'Autorité internationale des fonds marins et du Tribunal international du droit de la mer doit veiller à cette réalisation par l'enregistrement d'investisseurs pionniers dûment identifiés par la Résolution II et conformément à des règles définies au nombre desquelles l'exigence d'absence de conflit de chevauchement entre les demandes.

En décembre 1984 l'échange des coordonnées avec le Japon et l'URSS, sous l'égide de la Commission Préparatoire, conduit à un double constat : l'existence d'un conflit majeur franco-soviétique et l'impossibilité de maintenir certaines dispositions de la Résolution II incompatibles avec la sauvegarde des intérêts nationaux dans ce secteur d'activité.

Des négociations conduites par le Ministère des Affaires Etrangères avec la participation de l'Ifremer ont permis la modification des dispositions contraignantes. C'est ainsi que dans la limite autorisée de 75 000 km² la France (comme le Japon et l'URSS) a pu choisir librement un secteur de 52 300 km² constituant l'élément clé de son site minier. Des négociations ont dû être également entreprises entre l'URSS et les pays dont les consortia multinationaux sont les ressortissants, en vue de régler les conflits de chevauchements de secteurs entre ces acteurs.

L'aboutissement de ce processus est l'enregistrement par la Commission Préparatoire en 1987 des demandes de la France, du Japon et de l'URSS situées dans l'Océan Pacifique et de la demande de l'Inde dans l'Océan Indien.

Le ministère, chargé des mines, qui instruit la demande de permis d'exploration exclusive déposée par l'Ifremer dans le cadre de la loi française est saisi, sous forme d'amendements à la demande initiale, des nouvelles coordonnées du site français défini au niveau international.

L'effondrement du marché des métaux depuis le début des années 1980, a entraîné le désintéressement progressif des sociétés privées. Les consortia multinationaux ont cessé toute activité depuis 1982. Seules quelques personnes suivent le dossier à temps partiel et répondent périodiquement aux sollicitations de la National Oceanographic and Atmospheric Agency (NOAA), administration américaine chargée de la gestion des titres miniers. En Europe, la société Preussag était la seule à poursuivre des études, en coopération avec Ifremer/GEMONOD et avec le soutien financier du gouvernement allemand. Des sociétés norvégiennes, suédoises et finlandaises se sont intéressées au dossier dans l'espoir de trouver des débouchés à leurs produits. La plus active était la société finlandaise RAUMA REPOLA qui a réalisé une étude de projet de pilote de ramassage pour le compte de l'URSS et cherchait à trouver d'autres acheteurs.

2.5.2.3. *Stratégie des acteurs pionniers*

La position et stratégie des différents pays qui se sont lancés historiquement dans la prospection minière sont très diverses :

- **Les États-Unis** n'ont pas signé la Convention des Droits de la Mer en 1982. Les consortiums à direction américaine arrêtent progressivement toute activité sur les nodules (KCON dès 1978, O MCO vers 1981, O MA vers 1982). Vers 1983, toute recherche américaine en mer sur les nodules a cessé. Cependant, ces mêmes consortiums négocient durement l'attribution de zones d'activité préliminaires dans la zone Clarion-Clipperton, tandis que les universités américaines s'investissent dans les études sur l'hydrothermalisme et sur les encroûtements cobaltifères. Des groupes industriels américains sont actuellement impliqués dans les permis obtenus en 2012 sur les nodules par le Royaume Uni.
- **L'Allemagne** poursuit les campagnes dans la zone Clarion-Clipperton jusqu'en 1982 (mission SO-25) mais mène, dans le même temps, des campagnes d'exploration dans le bassin du Pérou.
En 2005, au nom du Gouvernement de la République fédérale d'Allemagne, l'Institut fédéral des sciences de la terre et des ressources naturelles (BGR) a présenté une demande en vue d'explorer des nodules polymétalliques dans deux secteurs distincts de la zone du Pacifique riche en nodules soit une superficie totale de 149 976 km² (ISA, 2005). La demande est fondée sur des données de prospection recueillies entre 1976 et 1978 par le consortium allemand Arbeitsgemeinschaft meerestechnisch gewinnbarer Rohstoffe (AMR) dans le cadre des investigations portant sur les nodules polymétalliques menées sous l'égide du consortium Ocean Management Inc. (OMI). L'institut a hérité d'une quantité volumineuse d'archives constituées par la société allemande Preussag AG qui, en tant que membre du consortium AMR, était un des pionniers qui avaient prospecté les nodules polymétalliques dans le centre de l'océan Pacifique et avait même expérimenté des techniques d'extraction dans les années 80.

Le programme de travail actuellement envisagé comporte une analyse approfondie des archives de la société Preussag et des campagnes scientifiques dans la zone agréée. Ces campagnes portent sur deux sujets principaux: a) l'acquisition et l'interprétation de données sur la réflectivité acoustique (en utilisant la fonction sonar à balayage latéral de sondeurs multifaisceaux modernes); b) le prélèvement d'échantillons sur le fond de l'océan pour le calibrage et la vérification au sol de données acoustiques numériques; et c) l'étude de communautés benthiques (taxonomie, composition des assemblages et diversité biologique).

En parallèle, l'Allemagne mène des campagnes d'explorations sur la dorsale indienne dans le but de déposer un permis d'exploration à l'horizon 2015.

- **La France** poursuit les campagnes jusqu'en 1988 et achève cette phase par une série de plongées sur les sites à nodules à l'aide du submersible Nautile (NIXONAUT); puis les recherches cessent totalement jusqu'en 2004. Simultanément, des campagnes de prospection sur les encroûtements cobaltifères sont faites en Polynésie française ainsi que des travaux importants sur les sources hydrothermales. En 2004, une mission de plongée (NODINAUT) est réalisée par l'Ifremer, sur le même site qu'en 1988, sous la responsabilité de biologistes afin de mieux connaître l'environnement vivant des sites à nodules. En 2012, dans le cadre de son contrat avec l'ISA, l'Ifremer monte une campagne en coopération avec les allemands pour étudier la biodiversité (BIONOD).
- **L'URSS (puis la Russie)** par l'intermédiaire de l'entreprise Yuzhmorgeologiya continue à mener des campagnes d'exploration, mais de manière moins soutenue et les résultats obtenus restent pour la plupart confidentiels. En 1990, cette entreprise, qui reçoit la plus grande partie de son budget du Ministère de la Géologie et dont le siège est à Guelendzhik sur la côte orientale de la mer Noire, emploie près de 3 000 personnes.
- **L'Inde** intensifie la prospection nodules dans l'océan Indien et plus particulièrement dans le bassin Indien Central. L'Inde a d'ailleurs été le premier pays à réaliser une étude pilote sur les impacts environnementaux de l'exploitation des nodules (Nath et al, 2012; Sharma, 2001; Sharma et al, 2000; Sharma et al, 2005). Cet effort de prospection continue actuellement.

Si ces nouveaux aspects miniers du fond océanique, associés aux considérations sur l'intérêt de poursuivre les investissements, se traduisent par des stratégies différentes selon les États déjà engagés dans les recherches sur les nodules, ils induisent également l'apparition de nouveaux acteurs dans l'exploration des fonds océaniques.

2.5.2.4. *Les nouveaux acteurs majeurs*

Ce sont les nations souhaitant être reconnues comme « investisseurs pionniers » qui sont à la base du plus grand nombre de campagnes de prospection nodules : la Chine, la Corée du Sud et le consortium IOM effectuent ainsi des missions qui permettent de préciser la répartition des nodules dans le Pacifique Nord en axant leurs campagnes dans des zones peu explorées.

- **Le consortium KORDI (Korean Ocean Research and Development Institute)**
En 1983, à la suite de la signature de la Convention des Droits de la Mer, la Corée du Sud décide de participer à l'exploration des nodules. Une première mission en mer,

destinée à une initiation aux techniques de la recherche des nodules, est effectuée avec l'aide de l'université d'Hawaii, à bord du N/O Kana Keoki. Mais les conditions financières pour de venir « nation pionnière » étant trop élevées, il faut attendre l'assouplissement de ces conditions pour que la Corée du Sud décide de reprendre ses investissements sur les nodules. De 1989 à 1991, elle effectue des missions nodules à l'aide du Fanella en coopération avec l'USGS (US Geological Survey). Une demande d'adhésion est faite en janvier 1994 et dès le 2 août, la Corée du Sud obtient son statut d'« investisseur pionnier ». En 1995, le programme de recherches sur les nodules est réorganisé et placé sous la supervision du KADOM (Korean Association of Deep-Ocean Mineral Development) qui regroupe une trentaine de sociétés privées et d'organisations gouvernementales, parmi lesquelles KORDI, KIGAM (Korea Institute of Geology, Mining and Material) et KMPL (Korea Mining Promotion Corp. Ltd). Dès 1992, un navire océanographique destiné à l'exploration des nodules, Omnuri, est construit. Depuis et jusqu'en 2005, 36 campagnes nodules qui représentent 1 080 jours à la mer sont effectuées. Les raisons du lancement d'un programme de recherches sur les nodules sont multiples. Il s'agit, bien entendu, de raisons économiques et du besoin en matières premières, mais il s'agit également d'une décision politique liée, en particulier, à l'opportunité de s'ouvrir à l'océan profond, à celle de participer à un programme international et à l'espoir de retombées technologiques. Plus que la recherche de minerais dans un avenir proche, l'effort de la Corée du Sud doit être considéré comme un investissement à long terme.

- **Le consortium IOM (Interoceanmetal Joint Organisation)**

IOM, qui comprend à présent deux pays de l'Union Européenne, est initialement un consortium composé exclusivement de pays socialistes qui a obtenu, dans le cadre d'un accord spécifique, un site minier au nom du « Groupe des pays socialistes ». Le consortium est créé le 27 avril 1987 sur la base d'accords intergouvernementaux entre la Bulgarie, Cuba, la Tchécoslovaquie, la République Démocratique Allemande, la Pologne, le Vietnam et l'URSS. Ensuite, en fonction des événements politiques, la composition d'IOM évolue. Le 23 novembre 1989, le Vietnam se retire. Suite à l'unification allemande, l'Allemagne de l'Est quitte l'association le 27 mai 1991. En août 1992, la Fédération Russe reprend les engagements de l'URSS. Le 31 décembre 1992, les nouvelles républiques de Tchéquie et de Slovaquie se partagent les engagements de l'ancienne Tchécoslovaquie. IOM est donc actuellement constitué sur la base d'accords entre six pays et son siège est en Pologne, à Szczecin. IOM débute ses campagnes dans la zone Clarion-Clipperton dès le mois de décembre 1987 et continue d'en faire régulièrement, jusqu'à aujourd'hui, à l'aide des N.O. Yuzmorgeologiya, Professor Logatchev et Gelenzhik. Le 22 août 1991, IOM est reconnu comme « investisseur pionnier » et le 29 mars 2001 ce consortium signe un contrat d'exploration avec l'ISA. En parallèle, il engage une collaboration, dès 1992, avec le consortium chinois COMRA qu'il renouvelle ensuite fréquemment.

- **Le consortium COMRA (China Ocean Mineral Resources Research and Development Association)**

Dès le milieu des années 1970, la République populaire de Chine débute des activités d'exploration des ressources minérales des grands fonds marins. Un programme national, confié à la State Oceanic Administration et au Ministère de géologie et des ressources minérales, est mis sur pied afin de réaliser des programmes de recherche sur les nodules polymétalliques et la première campagne a lieu en 1985. Jusqu'au moment de la demande d'enregistrement de la Chine comme « investisseur pionnier »,

des dizaines de campagnes sont faites par les N.O. Xiangyanghong 5, Xiangyanghong 16 et Hayang Sinao sur une superficie de plus de deux millions de km² dans les parties équatoriale, centrale et orientale du Pacifique Nord et aboutissent à la demande d'un secteur d'une superficie totale de 300 000 km² (entre 7 et 13° N et entre 138 et 157° W). En 1991, le consortium COMRA est créé pour organiser et coordonner toutes les activités chinoises dans le secteur d'exploration correspondant. C'est une entreprise d'État qui bénéficie du soutien de l'Administration d'État pour les affaires de la mer, du Ministère de la géologie et de la Société nationale chinoise de métallurgie des métaux non ferreux. Les campagnes se poursuivent. En 2003, 70 jours de campagnes à la mer sont effectués à l'aide des N.O. Dayang Yihao et Hayang Sinao.

2.5.2.5. *Les acteurs émergents*

Cinq Etats ont fait une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques dans la Zone de Clarion-Clipperton devant l'Autorité en août 2012 : la république de Nauru, le royaume de Tonga, la république de Kiribati, la Belgique et le Royaume Uni par le biais de sociétés parrainées par leur gouvernement.

- **République de Nauru**

Nauru Ocean Resources Inc., sous le patronage de la République de Nauru, a obtenu en juillet 2011 un contrat dans le secteur réservé aux nations en développement par l'Autorité internationale des fonds marins, marquant ainsi une étape nouvelle du plus grand intérêt pour l'administration et la mise en valeur des ressources dans les eaux internationales (ISA, 2011a). Dans la mise en œuvre du plan de travail proposé, Nauru Ocean Resources entend donner un exemple que d'autres nations en développement peuvent suivre, contribuant ainsi à faire en sorte que les ressources de la Zone soient mises en valeur dans une optique de durabilité, « au profit de l'humanité tout entière ». Nauru Ocean Resources est une filiale de droit nauruan de la société Nautilus Minerals Inc. (« Nautilus »), qui est le leader mondial de l'exploration commerciale et de la mise en valeur des ressources minérales en mer profonde dans une optique de durabilité. Nautilus compte parmi ses principaux actionnaires deux des plus grandes sociétés minières mondiales, Teck Cominco et Anglo American, et c'est dans le monde la seule société à avoir mené avec succès des campagnes d'exploration des sulfures polymétalliques, avec des opérations d'échantillonnage et de forage et des essais d'extraction dans des eaux d'une profondeur supérieure à 1 500 mètres.

Nauru Ocean Resources remplit les conditions requises pour présenter une demande portant sur la zone réservée, conformément à l'article 17 du Règlement, étant donné qu'elle a reçu le patronage et se trouve sous le contrôle effectif de la République de Nauru, qui est une nation en développement. Nauru Ocean Resources est une société de droit nauruan ayant son siège social à Nauru et enregistrée à Nauru, et se trouve donc sous le contrôle effectif de Nauru.

- **Royaume de Tonga**

De même que Nauru, Tonga Offshore Mining Limited, sous le patronage du Royaume de Tonga, a reçu en juillet 2011 l'autorisation d'explorer les nodules polymétalliques dans le secteur réservé aux nations en développement par l'Autorité internationale des fonds marins, marquant ainsi une étape nouvelle du plus grand intérêt pour l'administration et la mise en valeur des ressources dans les eaux internationales (ISA, 2011b).

Tonga Offshore Mining est une filiale de droit tongan de la société Nautilus Minerals Inc. (« Nautilus »), qui est le leader mondial de l'exploration commerciale et de la mise en valeur des ressources minérales en mer profonde dans une optique de durabilité.

- **République de Kiribati**

La société Marawa Research and Exploration Ltd. (Marawa), patronnée par le Gouvernement de la République de Kiribati, vient d'obtenir son contrat d'exploration en juillet 2012 (ISA, 2012b).

La découverte de nodules polymétalliques dans les eaux de Kiribati remonte aux années 60, et l'on s'accorde à reconnaître que les minéraux des fonds marins seront d'une grande aide pour que cet État puisse atteindre ses objectifs de développement futurs, tout particulièrement au vu de la base de ressources minérales limitée dont il dispose.

L'intérêt de Kiribati envers l'exploitation des nodules polymétalliques des fonds marins s'est manifesté dès les années 80 dans les plans de développement nationaux de cet État. Son intérêt particulier envers les activités d'exploration dans la Zone de fracture de Clarion-Clipperton découle logiquement du fait qu'une partie de cette dernière se trouve dans la zone économique exclusive de Kiribati. Les blocs attribués aux contractants ou déterminés comme secteurs réservés par l'Autorité internationale des fonds marins se situent à seulement 80 milles marins environ de la frontière de la zone économique exclusive de Kiribati. Celui-ci est de ce fait l'État le plus proche géographiquement de ces blocs établis par l'Autorité, ce qui l'incite au plus haut point à veiller à ce que les activités dans la zone de Clarion-Clipperton soient menées d'une façon responsable au regard de l'environnement, de sorte qu'elles ne produisent aucun effet dommageable sur son environnement marin ou sur celui des États côtiers voisins. En fait, la ceinture de nodules polymétalliques dans les eaux de Kiribati est une extension des gisements découverts dans la zone de Clarion-Clipperton et, en améliorant sa connaissance des minéraux et de l'environnement marin dans cette dernière zone, Kiribati améliorera du même coup sa connaissance de ces mêmes éléments dans sa zone économique exclusive. Leur demande revêt donc une importance d'intérêt national pour la République de Kiribati. En se joignant à l'entreprise d'exploration des grands fonds marins menée par d'autres États dans la zone de fracture Clarion-Clipperton, Kiribati entend améliorer sa connaissance des nodules polymétalliques des grands fonds marins et aussi contribuer aux progrès de la science dans la zone internationale des fonds marins.

En 2008, Kiribati est devenu un chef de file de la préservation de l'environnement mondial en créant la plus vaste zone maritime protégée. Cette zone protégée, d'une superficie de 410 500 km², inclut aussi des monts marins et d'autres habitats des grands fonds.

La société Marawa est une entreprise d'État détenue et contrôlée par la République de Kiribati. Son conseil des directeurs est composé de MM. Tinian Reiher, Ministre des pêches et du développement des ressources marines, Thiarite Kwong, Ministre de l'environnement, des terres et de l'agriculture, et Titabu Tabane, Procureur général.

La société Marawa est administrée par le Ministère des pêches et du développement des ressources marines. L'Unité des minéraux de Kiribati, un service du Ministère créé en 1983, est chargée de gérer les ressources minérales, les côtes et l'environnement marin. Les responsabilités de l'Unité des minéraux incluent la protection et la restauration des habitats benthiques des côtes et pélagiques des fonds marins, le

développement guidé, la surveillance de l'environnement, la recherche scientifique et la promotion de la mise en valeur des ressources minérales des côtes et des fonds marins. Les domaines de compétences de l'Unité comprennent la géologie marine, les systèmes d'information géographiques, l'océanographie, la politique marine et la gestion de l'environnement, y compris la biologie marine.

- **Le Royaume-Uni avec UK Seabed Resources Ltd**

Sous le parrainage du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, UK Seabed Resources Ltd a obtenu de la part de l'Autorité internationale des fonds marins l'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques dans la Zone de Clarion-Clipperton (ISA, 2012a).

UK Seabed Resources Ltd est une filiale en pleine propriété de Lockheed Martin UK Holdings Ltd. (LMUK). UK Seabed Resources et LMUK sont des sociétés de droit britannique établies au Royaume-Uni. LMUK emploie plus de 2 000 personnes à travers le Royaume-Uni. Leader dans le domaine de l'intégration de systèmes, il gère d'importants programmes dans les secteurs aérospatial, militaire et civil.

UK Seabed Resources Ltd détient des droits qui lui permettent d'accéder à un certain nombre de données, de ressources et de connaissances spécialisées de Lockheed Martin Corporation (LMC) ayant trait aux méthodes de prospection, d'analyse et de prélèvement des ressources de nodules polymétalliques. À ce titre, il peut tirer parti de la somme d'expérience et de compétences techniques que LMC a acquise dans le domaine des nodules polymétalliques dans le cadre de ses activités passées et présentes.

UK Seabed Resources Ltd détient des droits qui lui permettent d'accéder à un certain nombre de données, de ressources et de connaissances spécialisées de LMC ayant trait aux méthodes de prospection, d'analyse et de prélèvement des ressources de nodules polymétalliques. L'expérience de LMC dont UK Seabed Resources Ltd pourrait tirer parti est décrite ci-après :

a) LMC a été l'entrepreneur principal et le fournisseur de technologie du consortium Ocean Minerals Company (OMCO), l'un des principaux protagonistes de la prospection des ressources minérales des fonds marins dans les années 70 et 80. Il a, par la suite, pris la place d'OMCO et détient actuellement tous les actifs de l'ancien consortium. Dans le cadre de sa collaboration avec OMCO, LMC a joué un rôle de premier plan dans le développement des ressources de nodules polymétalliques des fonds marins dans la Zone de Clarion-Clipperton, notamment en menant des études pluriannuelles complètes des fonds marins, en réalisant de bout en bout le système de collecte des nodules et en expérimentant en mer un prototype de collecte à grande échelle ;

b) En termes plus généraux, LMC dispose d'une expérience de plus de 50 ans dans la conception et la mise au point de grands systèmes océanographiques, qui l'a ainsi conduit à réaliser de nombreuses opérations dans les grands fonds marins. Les projets menés par l'entreprise ont porté notamment sur les éléments suivants : véhicules sous-marins téléguidés et engins sous-marins autonomes ; cabines de service pour les stations de production de pétrole et de gaz sous-marin ; collecteurs pour puits de pétrole et de gaz sous-marins ; système de modélisation mathématique permettant de prévoir les mouvements d'un navire et de la charge utile lors du lancement et de la récupération d'un équipement ; bouées de mesures océanographiques et météorologiques ; systèmes de conversion de l'énergie thermique des mers ; et instrumentation et personnalisation des bâtiments hydrographiques.

- **La Belgique avec G-TEC Sea Minerals Resources NV (GSR)**

GSR a été créé par G-TEC, qui en a fait une filiale spécialement chargée d'explorer la Zone de fracture de Clarion-Clipperton, dans l'océan Pacifique. G-TEC est une société d'ingénierie et d'études d'envergure internationale, qui se spécialise dans l'exploration, le repérage, l'analyse et l'étude de sites sous-marins et fait appel, pour ce faire, aux techniques sous-marines les plus récentes et les plus évoluées. Constituée en 1993, c'est une société privée qui a son siège près de Liège (Belgique) et des succursales aux Pays-Bas, en France et au Maroc. Elle réalise communément des études de terrain pour de grands projets infrastructurels terrestres et maritimes. Agissant en qualité de contractant spécialisé et de consultant dans les domaines de l'environnement, de la géophysique, de l'hydrographie et de la géologie appliquée, G-TEC intervient dans le monde entier, sur terre comme en mer.

G-TEC Sea Minerals Resources NV (GSR) a obtenu son contrat relatif à l'exploration des nodules polymétalliques (ISA, 2012c). Le secteur faisant l'objet de la demande se situe dans la Zone de fracture de Clarion-Clipperton, dans l'océan Pacifique. GSR estime qu'il remplit les conditions fixées par l'Autorité et qu'il dispose des ressources techniques et financières nécessaires pour apporter une contribution constructive à l'exploration de la Zone et à l'action de l'Autorité dans ce domaine.

La demande de GSR, qui est une entreprise belge, porte sur un secteur des fonds marins où l'ancienne Union minière de Belgique, devenue Umicore, menait des activités dans le cadre d'une licence octroyée par les États-Unis (USA-3) à Ocean Mining Associates (OMA). Umicore appuie la demande et le futur programme d'exploration de GSR et partage avec lui l'expertise et les connaissances qu'il a acquises au sujet des nodules polymétalliques et de leur affinage. GSR hérite à présent de cette participation belge d'avant-garde à l'exploration et aux essais d'extraction des nodules polymétalliques.

À l'appui de GSR, le Gouvernement belge confirme que la législation pertinente est en cours d'élaboration. L'Université de Gent appuie la demande de GSR et participera à l'exécution du plan de travail relatif à l'exploration. Les principaux partenaires de GSR disposent de ressources et de capacités techniques, opérationnelles et financières considérables. Ils possèdent des compétences extrêmement poussées dans les domaines de la logistique et des activités opérationnelles se rapportant à l'industrie offshore, ainsi qu'une bonne connaissance des aspects pratiques des interventions dans les fonds marins. Ils innovent aux niveaux des techniques et des méthodes utilisées dans ce secteur. L'un des partenaires clefs est le leader mondial dans son secteur, où il exerce depuis plus de 150 ans. Umicore, qui est lui aussi un intervenant d'envergure mondiale, dispose d'une grande expertise en sciences des matériaux, en chimie et en métallurgie et possède, par le biais de la société à laquelle il a succédé, une bonne connaissance des nodules polymétalliques et du secteur visé par la demande de GSR. Les principaux partenaires de GSR, qui sont bien connus du Gouvernement belge, ont demandé que leur identité ne soit pas, pour l'instant, rendue publique.

2.5.2.6. *Stratégie de la France dans le cadre du contrat quinquennal*

Les opérateurs, dont le plan de travail a été approuvé en août 1997, ont passé avec l'Autorité un contrat d'exploration en 2001, sur la base des dispositions adoptées dans le Code minier.

Les plans de travail présentés n'envisagent que des travaux d'exploration générale pour les cinq premières années. Ils ne prévoient de passer à l'exploration détaillée, aux études de faisabilité et aux tests miniers, que lorsque les conditions économiques permettront d'envisager des perspectives d'exploitation commerciale.

La France a signé le contrat d'exploration avec l'AIFM pour 3 périodes de 5 ans le 20 juin 2001. Il prévoit principalement une étude de la biodiversité sur toute la zone de Clarion-Clipperton sur une période de 15 ans.

Activités pour la période quinquennale 2001-2006

Les travaux réalisés par Ifremer comprennent deux types d'opérations qui se sont focalisés sur l'environnement géologique et biologique.

Les aspects traités en relation avec l'environnement géologique comprennent :

- L'amélioration de la couverture bathymétrique avec l'utilisation de sondeurs multifaisceaux; des études sur la réflectivité des fonds peuvent être envisagées ;
- L'étude de la distribution des sédiments grâce à l'utilisation d'une sismique adaptée ;
- La réalisation de carottages en vue de la détermination de la nature des dépôts sédimentaires ;
- La reconnaissance visuelle à proximité immédiate du fond en vue d'étudier la variabilité de la couverture des nodules, de leur morphologie et leur disparition aux limites des plages minières ;
- L'étude des relations entre la couverture sédimentaire, les types de sédiments et les nodules.

La caractérisation de l'écosystème benthique a nécessité deux volets d'étude :

- Etude de la structure des communautés biologiques en relation avec les différents contextes édaphiques.

Ce travail a permis d'observer et d'échantillonner quantitativement la faune benthique pour en évaluer la répartition et la densité puis de réaliser l'inventaire des différentes espèces afin d'en définir la diversité spécifique. Ce travail a pour objectif de comparer les communautés faunistiques prélevées soit par carottage (macrofaune) soit par chalutage (méga-faune) et observées grâce au Nautile. Les anciennes traces de dragages, qui ont pu perturber le sédiment il y a une vingtaine d'années, ont fait l'objet d'un échantillonnage précis afin d'établir si la faune a réussi à recoloniser un sédiment perturbé et a pu retrouver son état d'équilibre. Ce programme nécessite un important travail de tri du matériel qui peut être réfléchi dans le cadre d'une organisation internationale permettant d'établir des collaborations avec les spécialistes en taxonomie pour la détermination des espèces récoltées.

- Etude du fonctionnement des écosystèmes benthiques.

Ce thème concerne les relations entre les apports trophiques d'origine allochtone et la structure des populations vivant sur le sédiment. S'agissant d'une thématique développée depuis plusieurs années à l'Ifremer en Atlantique, cela va permettre de comparer des écosystèmes profonds aux mêmes latitudes dans des océans distincts. Il nécessite la mise en place de mouillages de longue durée et donc l'obligation de

programmer au moins deux campagnes à la mer. De telles opérations ne peuvent se concevoir que dans le cadre d'une concertation internationale pour disposer d'un temps de navire supplémentaire sur zone.

Les activités menées par l'Ifremer au nom de la France dans la période 2001-2006 sur deux secteurs à nodules dans le Pacifique nord équatorial ont mis en œuvre l'Atalante et le submersible habité Nautille pendant la campagne pluridisciplinaire NODINAUT qui avait pour objectif principal d'établir un état de référence de l'écosystème benthique sur ces secteurs et d'évaluer la capacité de la communauté benthique à recoloniser un substrat perturbé. Ces études ont été menées en collaboration avec des scientifiques impliqués dans deux projets internationaux d'étude de la biodiversité dans le domaine abyssal, le projet Kaplan « Biodiversity, species ranges and gene flow in the Abyssal Pacific nodule province : predicting and managing the impacts of deep seabed mining » et le projet « CeDAMar : Census of the Diversity of Abyssal Marine Life ».

Les premiers résultats de ces études suggèrent que la diversité de l'habitat des communautés benthiques dans les zones à nodules, due à la présence/absence de nodules sur le fond et à une variabilité dans la forme, la taille et la composition chimique des nodules, a pour conséquence une augmentation de la biodiversité benthique à l'échelle locale et à l'échelle régionale. Cette observation est faite à la fois pour la faune vivant à la surface du sédiment ou des nodules, et pour la faune vivant dans la colonne sédimentaire, également sensible à la présence/absence des nodules. De plus, il semble que les différents compartiments de taille de la faune benthique présentent des réponses contradictoires à la présence/absence de nodules sur le fond. Il a également été montré que le sédiment d'une ancienne trace de drague avait retrouvé une activité biologique significative.

Programme d'activités pour la période quinquennale 2006-2011

Les travaux réalisés par Ifremer comprennent tout d'abord un approfondissement de l'identification taxonomique de la faune benthique récoltée au cours de la campagne NODINAUT afin d'améliorer la compréhension de la composition de la communauté et de la distribution des espèces à large échelle spatiale. Cette tâche, longue et difficile, est réalisée avec la contribution de spécialistes à l'échelle internationale et grâce au soutien de projets internationaux tels que le projet CeDAMar.

Il a également été nécessaire d'améliorer les connaissances sur l'inventaire et la distribution géographique des espèces à l'échelle régionale afin d'identifier d'une part où se trouvent les espèces potentiellement capables de recoloniser les zones pouvant être impactées lors d'une future exploitation des nodules et d'autre part d'évaluer les capacités réelles d'échanges entre populations de ces espèces. Ces deux objectifs nécessitent d'étudier la faune abyssale par des approches combinées de taxonomie classique et de biologie moléculaire.

Cette étude a nécessité l'échantillonnage des deux secteurs Sud-Est et Ouest des permis français, complété par l'échantillonnage d'un secteur plus à l'Est dans le cadre du projet Kaplan. Un échantillonnage complémentaire des différentes classes de taille de la faune benthique permettrait à terme de pallier certaines difficultés rencontrées en particulier 1) un échantillonnage insuffisant du fait des faibles densités d'organismes surtout dans la partie ouest de la zone de fracture Clarion-Clipperton, 2) des problèmes dans le traitement des échantillons pour l'approche moléculaire.

Programme d'activités en écologie pour la période quinquennale 2011-2016

La finalité principale des activités pour cette période est de fournir les fondements scientifiques d'une stratégie de préservation de la biodiversité.

L'élaboration de stratégies de préservation de la biodiversité dans la zone à nodules de Clarion-Clipperton est actuellement freinée par la méconnaissance de la distribution des espèces à l'échelle de cette vaste zone couvrant près de 6 millions de km². Cette méconnaissance s'explique en grande partie par la grande richesse spécifique de la faune benthique d'une part, et par le manque d'expertise taxonomique sur des espèces profondes, de petites tailles et peu emblématiques d'autre part. En conséquence, rares sont les groupes taxonomiques pour lesquels une identification au niveau spécifique est possible. Parmi ceux-ci, l'expérience montre que 50 % à 90 % des espèces abyssales sont nouvelles pour la science. Dans leur grande majorité cependant ces espèces ne sont ni décrites ni nommées, limitant les études biogéographiques aux données traitées par un seul et même taxinomiste.

Dans le cadre de son programme d'activité pour la période quinquennale 2011-2016, l'Ifremer se propose de pallier ce frein dans l'étude de la distribution des espèces de la zone à nodules de Clarion-Clipperton, grâce à une stratégie reposant sur trois axes :

1. Une collaboration étroite avec le contractant allemand (BGR) dans le cadre d'une campagne à la mer commune qui a permis en 2012 d'acquérir des données standardisées et parfaitement comparables sur les permis d'exploration allemand et français distant de près de 1 500 km.
2. Une collaboration étroite avec des taxinomistes spécialistes de chacun des groupes taxonomiques dominant la mégafaune, la macrofaune et la méiofaune benthique. Cette collaboration se fera en particulier avec l'équipe du DZMB au Senckenberg Museum.
3. Un inventaire taxonomique s'appuyant sur une caractérisation morphologique et moléculaire des espèces ainsi que l'application des outils de la métagénomique à la description de la biodiversité benthique.

Pour la période 2011-2016, l'Ifremer s'est associé avec le Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) et le Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (DZMB) du Senckenberg Museum pour organiser en 2012 une campagne océanographique ciblée sur deux secteurs à nodules attribués à la France et à l'Allemagne, ayant respectivement pour coordonnées géographiques moyennes 14°N-130°W, et 12°N-118°W. La campagne (BIONOD) a été réalisée à bord du navire océanographique l'Atalante du 29 mars au 10 mai 2012. Les travaux ont constitué principalement en un échantillonnage des différents compartiments faunistiques de la communauté benthique (méga-, macro-, méiofaune et microorganismes) en mettant en œuvre les outils appropriés à ce type d'étude, soit un système de caméra tractée, une drague épibenthique, un carottier de type USNEL et un carottier multitube (Figure 2-43).



Figure 2-43 Outils de prélèvements - Drague épibenthique, carottier multitubes, carottier USNEL.

Le dépouillement et l'analyse des prélèvements de la campagne BIONOD s'étalera sur la totalité de la période d'activité. L'objectif est d'obtenir des listes d'espèces pour l'ensemble des groupes taxonomiques dominant la faune benthique des zones à nodules, que ces listes soient comparables pour tous les sites d'étude et pour toutes les campagnes océanographiques déjà réalisées sur ces sites d'études (en particulier la campagne française Nodinaut réalisée en 2004 et la campagne du projet allemand Mangan réalisée en 2010).

Des collaborations avec des taxonomistes spécialistes des groupes dominants de la mégafaune, la macrofaune et la méiofaune benthique permettront d'obtenir une caractérisation morphologique et moléculaire des espèces. En parallèle à cette approche de type « barcoding », des outils de la métagénomique seront appliqués à la description de la diversité de la faune benthique.

Parallèlement ont été acquis des paramètres de l'environnement tels que des profils sédimentaires du carbone organique, de l'azote, de l'oxygène, de métaux dissous et particulaires ainsi que des mesures des flux d'oxygène à l'interface eau/sédiment. L'analyse des concentrations en métaux des eaux interstitielles ainsi que des premiers centimètres de sédiments (collectés sur les carottages USNEL et multitubes), couplée à des analyses isotopiques du nickel, du cuivre et du fer, permettent d'étudier l'influence des processus de diagénèse précoce sur les cycles de ces métaux et de comprendre leur contribution dans la formation des nodules polymétalliques déposés sur ces sédiments (en particulier les enrichissements en métaux tels que Ni, Cu, Zn des nodules).

2.5.2.7. *Les permis en cours*

L'état des demandes de permis à l'AIFM par les contractants présentés dans ce chapitre est synthétisé dans le Tableau 2-22. En 2001-02, l'AIFM a signé des contrats de 15 ans avec plusieurs parties, en leur donnant des droits exclusifs d'exploration des nodules dans des régions de surface similaires de 75 000 km². Une carte détaillée des permis miniers dans l'océan Pacifique est également présentée Figure 2-44. De plus, un certain nombre de pays ont accordé des licences d'exploration pour les nodules polymétalliques.

Parmi ceux dont l'information est disponible, on peut noter (Rapport de la Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations, LC 234, France):

Les Îles Cook, qui sont un État libre associé à la Nouvelle-Zélande, sont titulaires de droits souverains sur les ressources naturelles situées dans les fonds marins de leur ZEE. Depuis les années 1970, des sondages internationaux d'exploration des fonds marins réalisés dans le Pacifique Sud ont montré que la ZEE des îles Cook disposait d'importantes ressources en

nodules polymétalliques (Clark et al, 1995). Depuis la création de la Cook Islands Seabed Minerals Authority (SBMA) en 2009, aucun permis d'exploration n'a encore été délivré.

Les Fidji réunissent 322 îles d'une superficie de 18 000 km² disséminées sur une surface de 1 300 000 km² dans le Pacifique Sud. A la fin 2011, 171 licences d'exploration en eaux profondes avaient été délivrées par les Fidji, mais aucune distinction particulière n'ont été faites en fonction des types de ressources. Les activités d'exploration ont essentiellement été menées pour les sulfures hydrothermaux.

La Nouvelle-Zélande, dont les eaux profondes contiennent des champs de nodules, n'a pour l'instant pas délivré de permis d'exploration. Les ZEE de l'archipel de Madère (Portugal) dans l'océan Atlantique, ainsi que de la France (Polynésie), Kiribati et Tuvalu, et Niue dans l'océan Pacifique possède également des ressources en nodules mais ne font pas l'objet pour l'instant de contrats d'exploration spécifiques.

Tableau 2-23 Contrats d'exploration des nodules polymétalliques (CCFZ: zone de fracture Clarion-Clipperton).

Contractant	Parrainé par	Zone concernée
Organisation mixte InterOceanMetal	Bulgarie, Cuba, Fédération de Russie, Pologne, République Tchèque et Slovaquie	CCFZ
Yuzmorgeologiya	Fédération de Russie	CCFZ
Gouvernement de la République de Corée	Corée	CCFZ
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	Chine	CCFZ
Deep Ocean Resources Development Co. Ltd.	Japon	CCFZ
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	France	CCFZ
Gouvernement de l'Inde	Inde	Océan Indien
Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles	Allemagne	CCFZ
Nauru Ocean Resources Inc.	Nauru	CCFZ
Tonga Offshore Mining Ltd.	Tonga	CCFZ
Marawa Research and Exploration Ltd.	Kiribati	CCFZ
UK Seabed Resources Ltd.	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	CCFZ
G-TEC Sea Mineral Resources NV	Belgique	CCFZ
Ocean Mineral Singapore Pte. Ltd.	Singapour	CCFZ

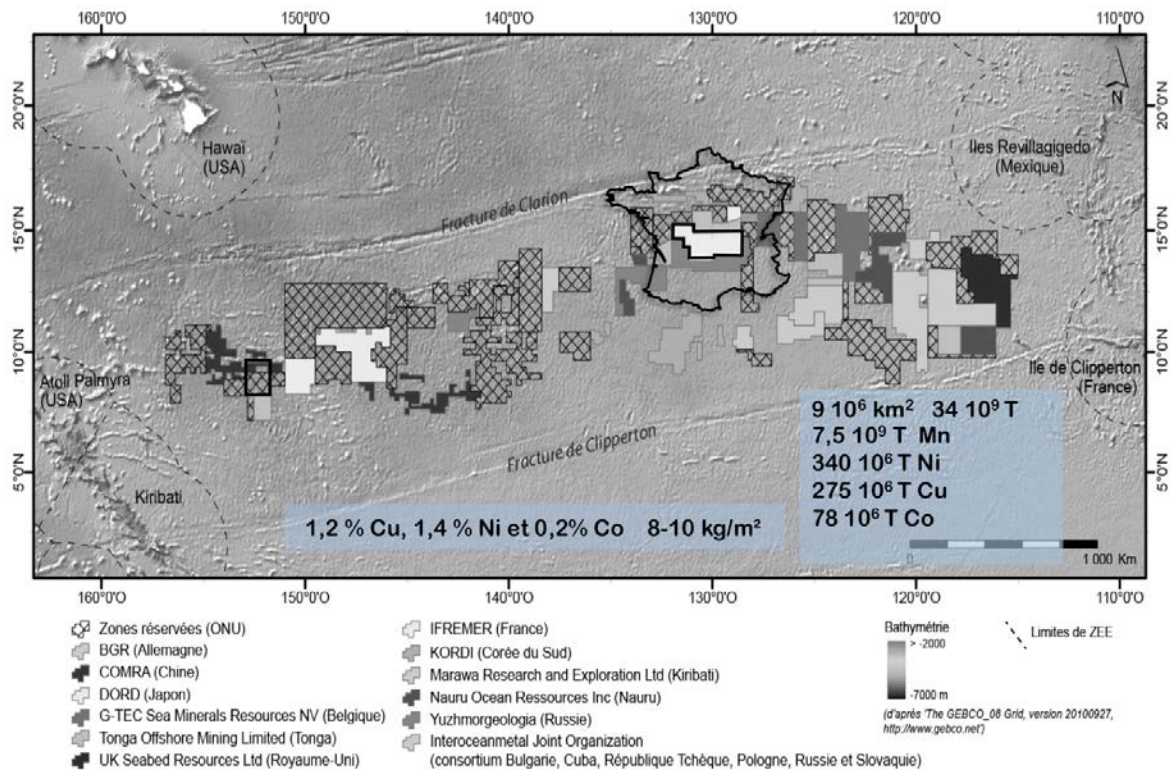


Figure 2-44 Position des permis accordés par l'AIFM dans la zone à nodules de Clarion-Clipperton. Les deux zones du permis accordées à la France, sont en blanc et entourées d'un trait noir. La carte de France superposée est à l'échelle, ce qui permet de mieux visualiser la dimension des zones bénéficiant de permis.

2.5.3. Les encroûtements hydrogénétiques

Les estimations montrent que 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des fonds des océans, sont recouverts d'encroûtements de manganèse.

Du point de vue économique, beaucoup reste à faire pour évaluer les dépôts, localiser les zones les plus fortement concentrées en métaux et identifier des zones relativement planes et continues sur lesquelles un ramassage serait possible sans trop de dilution dans du substrat stérile. Les concentrations les plus élevées (maximum de 1,9 % pour le cobalt et de 4,5 g/t de platine) sont situées en Polynésie. Dans la zone des Tuamotu, les croûtes forment un tapis plat et continu sur des formations sédimentaires indurées. Dans cette zone, on estime qu'une surface de 100 km² de fond marin contient environ 10 millions de tonnes de croûtes polymétalliques, ce qui représente plus de 100 000 tonnes de cobalt et 10 tonnes de platine (pour des concentrations de 1 % en Co et de 1 g/t en Pt).

Les images sonar existant en Polynésie ont permis de déterminer que les substrats durs favorables à la formation des encroûtements représentent environ 50 000 km². Il y aurait donc en Polynésie, environ 50 millions de tonnes de cobalt et 5 000 tonnes de platine, ce qui représente, au taux de consommation mondiale actuel (88 000 t/an pour le cobalt et 230 t/an pour le platine), près de 600 ans de ressources pour le cobalt et près de 22 ans pour le platine. Il convient cependant de nuancer ces chiffres, car beaucoup de zones, telles que les pentes des volcans, présentent des rugosités trop élevées pour un ramassage efficace. Comme pour les nodules, une réelle évaluation du potentiel des encroûtements métallifères implique de réaliser des cartographies en haute résolution près du fond marin afin de déterminer la continuité des

minéralisations et de rechercher des zones relativement plates, qui seraient seules favorables à un ramassage. Ces opérations mettant en œuvre des submersibles devraient également permettre de sélectionner et de comprendre la formation des zones les plus riches.

Contrairement aux sulfures hydrothermaux et aux nodules polymétalliques, peu d'études se sont focalisées sur le potentiel minier des encroûtements hydrogénétiques. Par conséquent, il n'existe aucun gisement exploité ou ne serait-ce même évalué selon les codes de classification des ressources en vigueur (ex : JORC, NI 43-101, SAMREC, CRIRSCO,...). Ainsi, il est difficile de présenter précisément les degrés d'évaluation ou d'exploitation de ces minéralisations. Par contre, des zones prospectives ont pu être définies à partir de critères empiriques pour orienter la prospection, l'évaluation et l'exploitation des encroûtements.

A partir des données disponibles, une tentative de répartition mondiale des dépôts cobaltifères a pu être proposée et quelques grands traits sur leur localisation et leur mode de genèse dégagés. Les encroûtements cobaltifères sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, monts sous-marins isolés ou alignements volcaniques ; ils caractérisent des zones dépourvues d'apports sédimentaires durant des périodes pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de Ma ; les encroûtements les plus riches semblent situés dans un intervalle bathymétrique situé approximativement entre 800 et 1 600 m.

Les équipes de recherches allemandes et américaines ont été particulièrement actives dans l'exploration et l'étude scientifique des encroûtements dans le Pacifique Nord et plus particulièrement dans les ensembles Hawaii - Iles de la Ligne. La France a également été active dans la prospection de sa zone économique exclusive du Pacifique Sud.

En juillet 2012, l'Autorité Internationale des Fonds Marins a reçu des demandes de permis d'exploration de la COMRA (China Ocean Minerals Ressources Research and Development Association) ainsi que de la Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) (ISA, 2006). La demande de la COMRA porte sur une étendue totale de 3 000 km² située dans l'Ouest de l'océan Pacifique ; celle du JOGMEC porte sur la même surface, à l'Est de l'île de Minami-Torishima dans le Pacifique occidental. Les projets d'exploitation des encroûtements sont actuellement largement moins avancés que pour les nodules et les sulfures hydrothermaux.

2.5.3.1. Les critères d'exploration

Critères d'exploration à l'échelle régionale

Malgré l'absence de travaux d'exploration intensifs sur les encroûtements Fe-Mn impliquant l'identification d'un ou plusieurs gisements, quelques études ont tenté de définir les zones potentielles et leur extension probable à l'aide de critères empiriques (Gaowen et al, 2011; Hein et al, 2009; Herzig et al, 2002). Ces travaux récents résultent de la volonté de l'AIFM de développer une réglementation (lancée en 2001 et adoptée en novembre 2012) pour l'exploration et l'exploitation des encroûtements de manganèse cobaltifères (Tableau 2-24).

Parmi les critères définis par les différents auteurs pour identifier les zones les plus intéressantes, nombreux ont trait à la géomorphologie des fonds océaniques. La profondeur des monts sous-marins, leur forme et leurs dimensions, la densité de ces monts à l'échelle régionale, la présence d'atolls et la pente des flancs jouent un rôle majeur quant à la présence et/ou à l'accessibilité de la ressource. Ainsi, Hein et al. (2009) considèrent comme prospectifs

les groupes de monts sous-marins situés à moins de 2 500 m de profondeur présentant une forme de plateau (Figure 2-45), des pentes inférieures à 20°C, un âge supérieur à 20 Ma et l'absence d'atoll ou de récif de grandes dimensions. Les paramètres océanographiques jouent également un rôle important lors de la définition des zones prospectives. Parmi les critères à prendre en compte, nous citerons : la profondeur et l'extension de la zone de minimum d'oxygène (OMZ), la présence permanente de forts courants profonds et intermédiaires ou encore une faible charge particulaire issue des apports fluviaux et éoliens.

Tableau 2-24 Critères régionaux définis aux fins de la prospection des encroûtements Fe-Mn source (ISA, 2002)

Critères régionaux	De grands édifices volcaniques d'une profondeur inférieure à 1000 – 2500 mètres
	Des édifices volcaniques de plus de 20 millions d'années
	Des structures volcaniques qui ne sont pas couronnées par des atolls ou des récifs de grandes dimensions
	Des zones de courants de fond forts et permanents
	Une zone d'oxygène minimum peu profonde et étendue
	Des zones à l'abri des débris fluviaux et éoliens

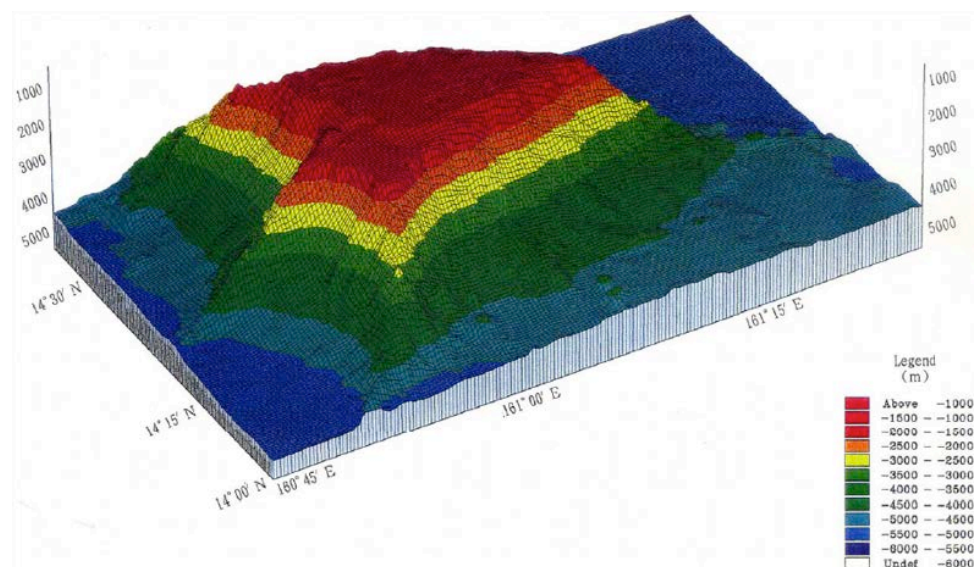


Figure 2-45 Mont sous-marin caractérisé par une zone sommitale en forme de plateau, idéale pour la prospection des encroûtements hydrogénétiques. D'après (Hein et al, 2009)

Critères d'exploration et d'évaluation à l'échelle locale

Bien que les critères géomorphologiques et océanographiques demeurent importants à l'échelle locale, d'autres paramètres devront être pris en considération pour pouvoir définir des zones prospectives. Deux de ces critères concernent directement le minerai *stricto sensu*. Le premier est associé à la teneur de coupure (c.à.d. à la teneur minimale à partir de laquelle l'encroûtement sera considéré comme minerai potentiel) en cobalt, élément qui représente, pour le moment, la substance primaire d'un gisement d'encroûtement de manganèse. Cette teneur varie selon les auteurs entre 0.5 % (Gaowen et al, 2011) et 0.8 % (source ISA ; Tableau 2-25). Le deuxième paramètre correspond à l'épaisseur moyenne de l'encroûtement de manganèse. Les auteurs s'accordent pour considérer comme prospective toute zone dont l'épaisseur des encroûtements est supérieure ou égale à 40 mm (Gaowen et al, 2011; Hein et al, 2009).

Tableau 2-25 Critères particuliers au site définis aux fins de la prospection des encroûtements.

Critères locaux	Microtopographie douce
	Terrasses, ensellement et passes (sommets)
	Stabilité de la pente
	Absence de volcanisme local
	Teneur moyenne en cobalt = 0.8 %
Epaisseur moyenne de l'encroûtement = 40 mm	

2.5.3.3. Les zones potentielles

A partir des critères régionaux et locaux définis précédemment, plusieurs zones apparaissent déjà prospectives pour l'exploration des encroûtements hydrogénétiques. La plus intéressante demeure la région du Pacifique Equatorial Central où de nombreuses études ont été menées durant ces dernières décennies (Hein et al, 2009). Particulièrement, la ZEE exclusive des Etats-Unis de Johnston Island, les îles Marshall et les eaux internationales des *Mid-Pacific Mountains* (Figure 2-46) apparaissent comme propices au dépôt de permis de recherche pour les encroûtements Fe-Mn (source ISA, 2002 – ISBA/8/A/1). Toutefois, les ZEE des Kiribati et de la Polynésie française (Figure 2-46), bien que moins étudiées, présentent tous les critères régionaux et locaux nécessaires au développement d'encroûtements Fe-Mn potentiellement économiques.

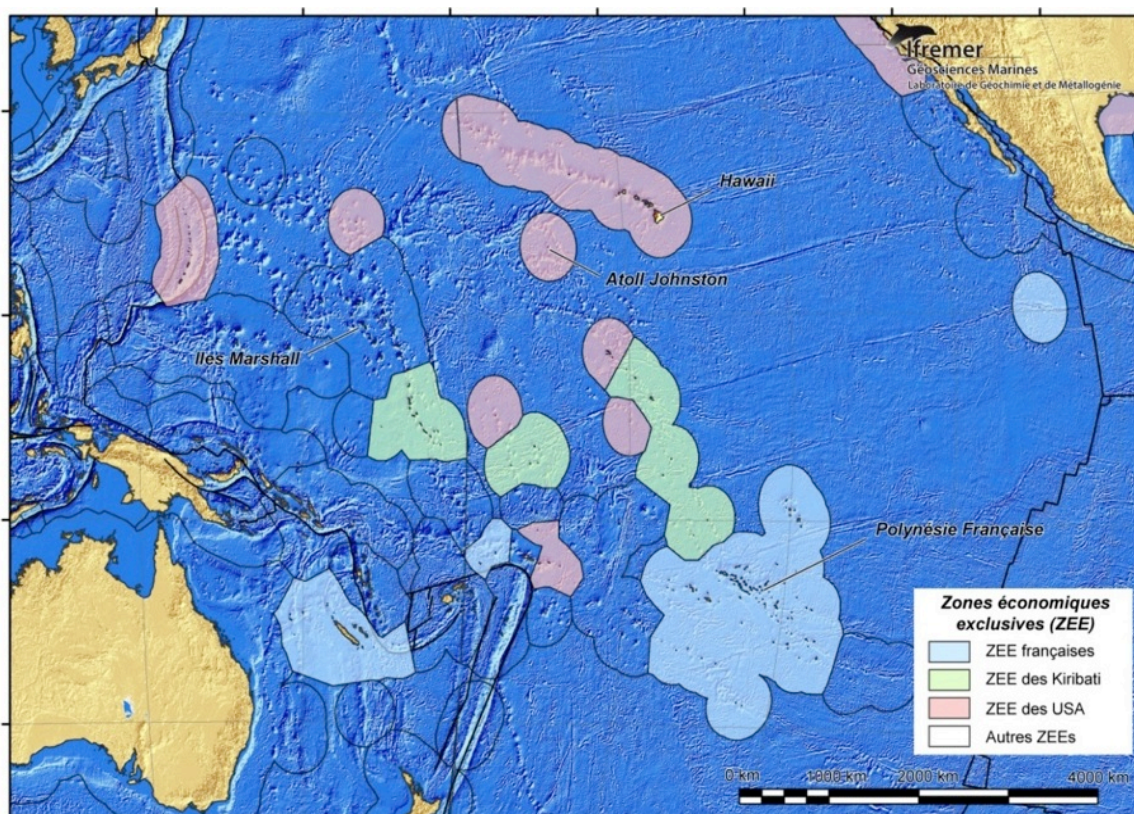


Figure 2-46 Carte du Pacifique présentant les ZEE des USA, de France et de Kiribati.

En dehors de l'océan Pacifique, quelques études récentes ont été réalisées dans les océans Indien et Atlantique (Hein et al, 2013; Muiños, 2013) pour évaluer le potentiel des encroûtements Fe-Mn. Muiños et al. (2013) concluent que la zone économique exclusive du Portugal incluant les Açores renfermerait des « ressources potentielles » équivalentes à celles

du Pacifique et ce, malgré des teneurs en métaux (ex : cobalt, nickel, cuivre) plus faibles. Toutefois, cette étude étant basée sur moins de 20 échantillons répartis sur plus de 350 000 km², il est extrêmement hasardeux de parler de ressources potentielles d'un point de vue minier.

Des études d'évaluation précises vont très probablement être entreprises dans les 10 à 15 prochaines années. En effet, trois pays ont fait la demande auprès de l'ISA pour obtenir un permis d'exploration pour les encroûtements. La Chine et le Japon ont fait leur demande respective en juillet et août 2012 alors que la demande russe a eu lieu en février 2013.

2.5.3.2. Degré d'exploration des encroûtements en Polynésie Française

La Zone Economique Exclusive de Polynésie Française, avec une superficie de 4 800 000 km² est le deuxième domaine maritime du Pacifique Sud après celui de l'Australie. Malgré plusieurs campagnes océanographiques françaises et étrangères depuis les années 1970, elle reste encore mal connue notamment en ce qui concerne la topographie de détail des fonds marins et leur nature.

Un cadre géologique particulier

La Polynésie française prolonge géographiquement l'archipel des Iles de la Ligne. Elle est composée d'archipels volcaniques d'environ 50 km de long, à relief émergé, parallèles et encadrant une unité géographique de 1 000 km de long, l'archipel des Tuamotu dont les atolls sont les seuls témoins émergés (Figure 2-46). Les chaînes volcaniques sont les archipels de la Société (au Sud-Ouest), des Australes (au Sud-Ouest), des Gambiers (au Sud-Est) et des Marquises (au Nord-Est).

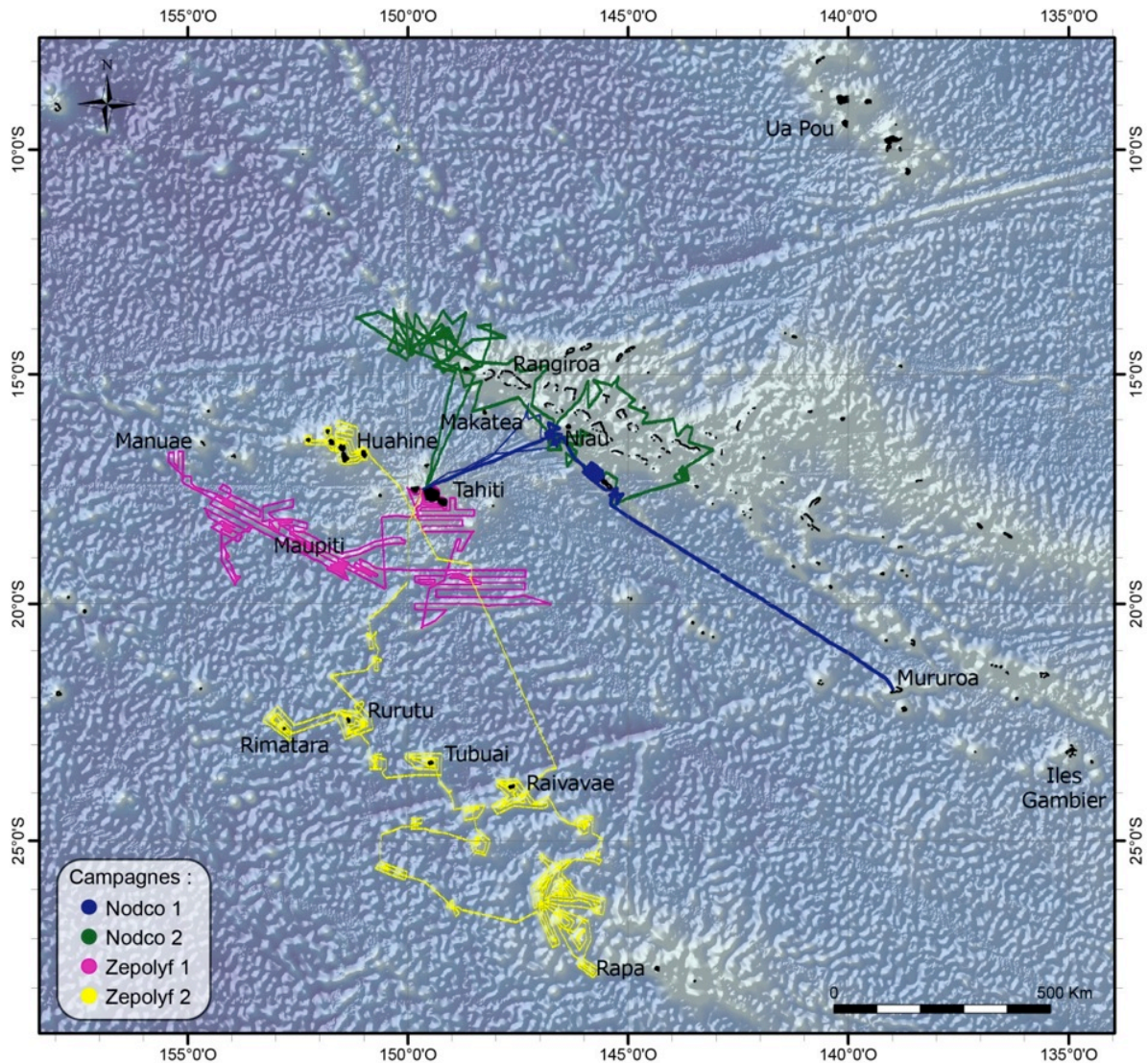


Figure 2-47 Localisation des campagnes NODCO et ZEPOLYF.

Ces archipels forment des édifices volcaniques délimités à la base par l'isobathe 4 000 m et les sommets émergés atteignent 2 200 m (à Tahiti). Ils sont séparés de l'archipel des Tuamotu (4 000 m à la base) par de profonds bassins (jusqu'à 5 000 m de profondeur). L'archipel des Tuamotu est encadré par la zone de fracture (ZF) des Marquises (au Nord) et la zone de fracture Australes-Mururoa (au Sud), délimitant le bassin du Tiki. Au Nord de la ZF des Marquises et limité à l'Est par l'archipel des Marquises, se situe le bassin du Tapu.

Les chaînes volcaniques de Polynésie française sont bien documentées dans la littérature et sont considérées comme des points chauds. Les atolls des Tuamotu sont les témoins émergés d'une chaîne sous-marine mise en place avant la formation des points chauds polynésiens. Contrairement à ces chaînes volcaniques, la chaîne des Tuamotu est peu documentée car le substratum océanique n'a pas été foré.

L'histoire de la Polynésie française comporte deux épisodes principaux : la formation de l'archipel des Tuamotu et la formation des petits archipels volcaniques parallèles.

Les archipels volcaniques émergés de points chauds

Les chaînes volcaniques polynésiennes entourant l'archipel des Tuamotu sont des linéaments volcaniques d'âge progressif, parallèles et orientés NW-SE, dont l'extrémité méridionale est approximativement perpendiculaire à la dorsale Est Pacifique (EPR), centre d'accrétion océanique actuel. Ces chaînes sont bien documentées : îles des Marquises (Duncan and McDougall, 1974), îles de la Société (Dymond, 1975), îles Pitcairn-Gambier (Duncan and McDougall, 1974), îles des Australes (Turner and Jarrard, 1982). Les âges et les structures sont concordants pour les quatre archipels : le volcanisme qui constitue ces îles est daté Miocène à actuel, l'âge des volcans augmente vers le Nord-Ouest. La présence d'un lagon autour de ces îles indique un âge plus ancien. On observe une migration du volcanisme vers le Sud-Est, avec un taux moyen de 11 cm/an, équivalent dans les quatre chaînes.

La croûte océanique sous-jacente a été datée de 45 à 65 Ma (Herron, 1972). Le volcanisme polynésien est daté Miocène (25 Ma) à actuel : les archipels sont beaucoup plus récents que le plancher océanique. La position actuelle de ces chaînes est contrôlée par la dorsale Est Pacifique. Les zones de fracture des Marquises, Tuamotu et Australes-Mururoa sont des failles transformantes engendrées par l'ancienne dorsale d'orientation Nord-Nord-Ouest (la direction d'expansion de la dorsale a changé entre 16 et 6 Ma) (Mammerickx, 1975). L'intersection de la direction générale des archipels avec les ZF contrôle la distribution des îles dans les chaînes volcaniques.

(Duncan and McDougall, 1976) proposent trois hypothèses pour la chronologie entre la dorsale Est Pacifique et les points chauds polynésiens :

- (1) les points chauds se forment après le changement de direction de la dorsale,
- (2) le début d'activité du volcanisme polynésien a entraîné une réorientation de la dorsale,
- ou (3) les deux phénomènes sont dus à un réajustement du mouvement des plaques tectoniques.

L'archipel des Tuamotu : une ride océanique avortée

L'archipel des Tuamotu s'étend entre les ZF des Marquises et des Australes-Mururoa sur 2 000 km de longueur et 400 km de largeur. Seuls les atolls émergent et recouvrent le substratum volcanique. L'archipel des Tuamotu est en fait formé de deux segments parallèles de 1 000 km de longueur, orientés WNW-ESE et séparés par une faille transverse à rejet horizontal de 300 km de long (Pautot and Hoffert, 1975).

On observe une dissymétrie entre le flanc sud abrupt et linéaire de l'archipel et le flanc nord qui s'enfonce graduellement vers la ZF des Marquises. Le substratum océanique n'a pas été foré mais il est estimé à 43 Ma par les anomalies magnétiques (Mammerickx, 1981), et à 70 Ma (comme âge minimum) au site 318 du D SDP (Leg 33) par les profils sismiques (Schlanger, 1974). Les deux segments de l'archipel ont la même origine et sont formés par le même phénomène volcano-tectonique : le jeu de failles délimite les différents blocs.

Pour tester l'hypothèse d'un point chaud, l'archipel des Tuamotu a été comparé à l'archipel d'Hawaii et des différences sensibles ont été établies (Hoffert, 1980; Pautot and Hoffert, 1975). Ainsi, l'archipel des Tuamotu peut être considéré comme une structure volcano-tectonique surimposée à une croûte océanique plus ancienne créée par accrétion à la dorsale fossile des Galápagos. L'archipel correspondrait à une zone de faiblesse de la lithosphère avec des phénomènes de distension : la chaîne des Tuamotu serait une dorsale océanique avortée.

Le mécanisme pourrait être le suivant : un bombement dû à un réchauffement de la lithosphère est suivi de fissuration et d'extrusion aux points de faiblesse ; ce phénomène cesse avant la création du rift et l'enfoncement général de l'archipel depuis l'Eocène (Burckle and Saito, 1966) s'accompagne de nouvelles manifestations volcaniques.

Historique des campagnes et potentiel en ressources minérales

En Polynésie Française, la présence de nodules riches en cobalt est connue dès 1965 par quelques prélèvements effectués par Méro; d'après des indications ponctuelles, la mission du CNEXO, TAHINO 1 (ou NIXO 01) en 1970, permet l'échantillonnage des premiers encroûtements dans cette partie du Pacifique. A partir des concrétions ainsi obtenues, des travaux concernant la minéralogie, la composition chimique ainsi que la vitesse de croissance ont été effectués (Pichocki, 1987). Cependant les cadres bathymétriques, structuraux, sédimentologiques et hydrologiques étaient très mal connus et ne permettaient pas de replacer les connaissances acquises sur les échantillons en fonction de leur environnement géologique. Les connaissances bathymétriques sont synthétisées par la carte au 1/1 000 000^{ème} de Monti et Pautot (1974) et les reconnaissances géologiques de détail se limitent à quelques sites étudiés durant les missions TRANSPAC I et II en 1972 (Pautot and Hoffert, 1975 ; Hoffert, 1980), les missions COPANO I et II en 1979 (Andrews et al, 1983) ainsi que par quelques forages du Glomar Challenger (Leg 33).

Les campagnes NODCO 1 et NODCO 2

Le but des missions NODCO a été successivement d'établir le cadre géologique d'un site en précisant son environnement bathymétrique, morphologique, structural et sédimentaire, puis, en utilisant les données ainsi acquises, de les tester en fonction des connaissances topographiques générales de l'archipel des Tuamotu.

La mission NODCO 1 (1986), relativement courte, puisqu'elle a consisté en une dizaine de jours sur zone, a été consacrée à l'étude du site de Niau déjà échantillonné durant la mission NIXO 01. La cartographie de détail est établie à l'aide du sondeur multifaisceaux Sea-Beam. Le cadre structural et sédimentaire est défini à l'aide des 272 profils de sondeur à sédiment (3,5 kHz). L'image acoustique du fond fournie par le sonar latéral (SAR) précise la micro-topographie. Enfin, un trait photographique réalisé à l'aide de l'engin autonome Epaulard et des dragages permettent d'observer la répartition des différentes phases sédimentaires, la dynamique sédimentaire actuelle et de prélever des échantillons parfaitement situés dans le contexte géologique.

La mission NODCO 2 (1987), d'une durée d'une vingtaine de jours sur zone, a consisté à étendre les résultats obtenus sur le site de Niau et ce, en se focalisant sur les élévations topographiques dégagées de tout apport sédimentaire (Le Suave et al, 1990). A priori, le choix des sites a été fait selon des environnements géologiques caractéristiques :

- *L'environnement de type « mont sous-marin intra-plaque »*, proche des modèles étudiés par les chercheurs américains et allemands dans les zones d'Hawaii et des îles de la Ligne. La terminaison nord-ouest de l'archipel des Tuamotu correspond bien à ce type d'environnement, d'autant plus que l'absence d'atolls émergés préserve, à priori, ces zones des apports sédimentaires biogéniques détritiques. Les zones de Matahiva Nord et de Matahiva Nord-Ouest ont été étudiées dans cette optique.
- *L'environnement de type « plateaux »* et plus précisément leur bordure, correspond au site de Niau. Pour tester l'extension vers le Sud-Est des sites de type Niau, les zones d'Anaa et Haraiki ont fait l'objet d'investigations. Durant la campagne NODCO 2, un levé de sismique réflexion a été réalisé afin de préciser la structure de l'archipel des

Tuamotu. Pour pouvoir corréliser les données de stratigraphie sismique ainsi établies avec les données préexistantes issues des forages du Glomar Challenger, ce levé sismique a été réalisé de manière à passer sur l'emplacement du site 318 du DSDP.

Les données issues des deux campagnes NODCO ont fait l'objet de publications. Il s'agit en particulier de (Amosse and Le Suave, 1989; Le Suave, 1986; Le Suave et al, 1989; Kosakevitch, 1988; Pichocki and Hoffert, 1987).

Campagnes ZEPOLYF1 et ZEPOLYF2

Le programme ZEPOLYF (pour Zone Economique de POLYnésie Française) a eu pour objectif prioritaire de contribuer au développement économique du Territoire. Il consiste dans sa phase stratégique à établir la topographie précise des fonds océaniques de la ZEE de Polynésie Française et à faire l'inventaire de ses ressources potentielles biologiques et minérales. Il s'agit d'un programme pluriannuel qui associe plusieurs partenaires dont l'Etat Français et le Territoire de Polynésie Française, et qui comprend plusieurs volets.

Un volet stratégique essentiellement géologique et géophysique visant à élaborer la connaissance morphologique de base sous forme cartographique de la zone et un volet tactique d'inventaire des ressources biologiques.

- Le premier objectif du programme ZEPOLYF était de répertorier et représenter tous les monts sous-marins et les hauts fonds dont la profondeur est inférieure à 2 000 m par une cartographie de détail. La connaissance de la morpho-bathymétrie constitue en effet un élément capital pour l'évaluation du potentiel en ressources halieutiques.
- Le deuxième objectif consistait à identifier les ressources biologiques par des campagnes de pêche expérimentale.
- Le troisième objectif était la réalisation d'un inventaire des ressources minérales de type encroûtements sur ces hauts-fonds.
- Enfin, le quatrième objectif était d'offrir à la Polynésie Française une véritable base de données géocodées, synthèse des études réalisées (bathymétrie, courantologie, nature des fonds, potentiel halieutique,...) lui permettant ainsi d'accéder à une meilleure connaissance de son environnement et à une meilleure maîtrise de son développement.

La campagne ZEPOLYF1 a eu lieu du 8 au 28 décembre 1996 au Sud-Ouest de la Polynésie Française. Deux dragages ont été effectués durant cette campagne : l'un sur le sommet aplati d'un guyot, l'autre sur la partie basse d'un autre guyot.

2.5.4. Les sulfures hydrothermaux

Après trente-cinq années d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux (Figure 2-4; Figure 2-26) démontre l'importance des processus hydrothermaux associés au volcanisme sous-marin. Les gisements de type sulfures massifs des fonds océaniques représentent les minéralisations les plus prometteuses en milieu marin. Ceci est lié à leur richesse en métaux de base (cuivre, zinc, plomb), métaux précieux (argent et or) mais également parfois en métaux rares (ex : indium, sélénium, germanium,...).

Ainsi, depuis une décennie, plusieurs compagnies privées et organismes scientifiques se sont intéressés à ces gisements et à l'évaluation de leurs ressources. L'exploitation de sulfures hydrothermaux semble désormais possible considérant un certain nombre de critères : (1) De fortes concentrations en métaux de base (cuivre et zinc) (2) l'enrichissement significatifs en métaux précieux (or et argent) ; (2) une localisation des gisements proche des côtes, ce qui explique l'intérêt particulier pour les ZEE des états côtiers ; (3) une profondeur d'eau relativement faible, de préférence moins de 2000 m ; et (4) l'identification de plusieurs sites inactifs dans une zone relativement restreinte.

Malgré des connaissances encore parcellaires, plusieurs auteurs ont tenté d'estimer les quantités de métaux accumulés dans les minéralisations hydrothermales (Hannington et al, 2011; Herzig et al, 2002). Ces approches sont souvent biaisées du fait que les techniques d'exploration efficaces ne permettent de localiser que les sites actifs (Fouquet and Lacroix, 2012; Fouquet Y., 2013).

En raison de leur richesse en métaux, de leur emprise minime (quelques hectares) sur le fond, de leur caractère massif ne générant pas de stériles et de la profondeur plus faible que celle des nodules, l'exploitation des sulfures constituera sans doute, avant les encroûtements cobaltifères et les nodules, la première exploitation minière dans les grands fonds océaniques.

Les deux principales sociétés privées qui travaillent sur ce sujet sont la société Nautilus Minerals, Inc. et la société Neptune Minerals, Inc. La plupart des sites appartenant à ces deux acteurs industriels sont en cours d'évaluation et, par conséquent, quasiment aucune valeur de ressources n'est disponible. Toutefois, il existe deux sites (Solwara 1 et Solwara 12) situés dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle-Guinée et appartenant à Nautilus Minerals (Inc.) où les données sont suffisantes pour proposer une estimation des ressources.

A part le cas de la Papouasie-Nouvelle-Guinée qui est actuellement le seul pays à avoir délivré des permis d'exploitation minière des sulfures hydrothermaux en eau profonde, d'autres pays ont délivré des licences d'exploration ou réalisé des campagnes d'exploration concernant les ressources en sulfures hydrothermaux inclus dans leur ZEE. On peut noter en particulier le Royaume des Tonga (basin de Lau), les Iles Salomon, les Fidji (bassin nord-fidjien), le Vanuatu et la Nouvelle-Zélande. Des dépôts de sulfures hydrothermaux ont également été identifiés dans les ZEE du Canada (Middle Valley), de l'Equateur (Galápagos Rift), du Japon (Okinawa Trough), de la République des Palaos, et d'une collectivité d'outre-mer de la France (Wallis et Futuna). A noter également la présence de niveaux à sulfures hydrothermaux dans la fosse d'Atlantis II Deep dans la mer Rouge qui font l'objet de permis d'exploitation dans les ZEE de l'Arabie Saoudite et du Soudan.

Concernant les activités dans la Zone régulée par l'AIFM, des contrats d'exploration des sulfures hydrothermaux ont été délivrés ou en attente de signature dans l'océan Atlantique au gouvernement de la Fédération de Russie et à l'Ifremer (Figure 2-48). D'autres permis ont également été accordés ou sont en cours de signature dans l'océan Indien avec le gouvernement de la République de Corée, la Chine et l'Inde (COMRA) (Figure 2-49).

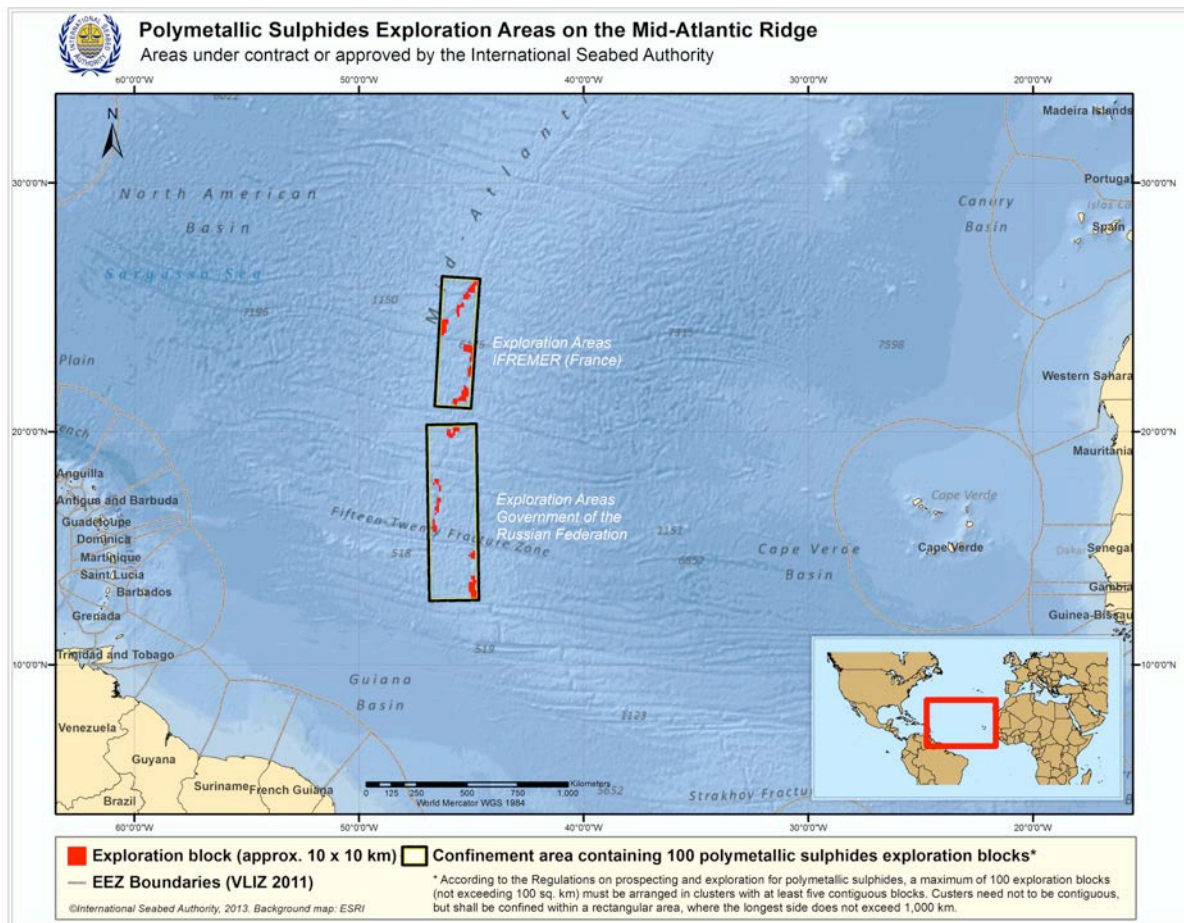


Figure 2-48 Zones sous contrat ou approuvées par l'AIFM dans l'océan Atlantique.

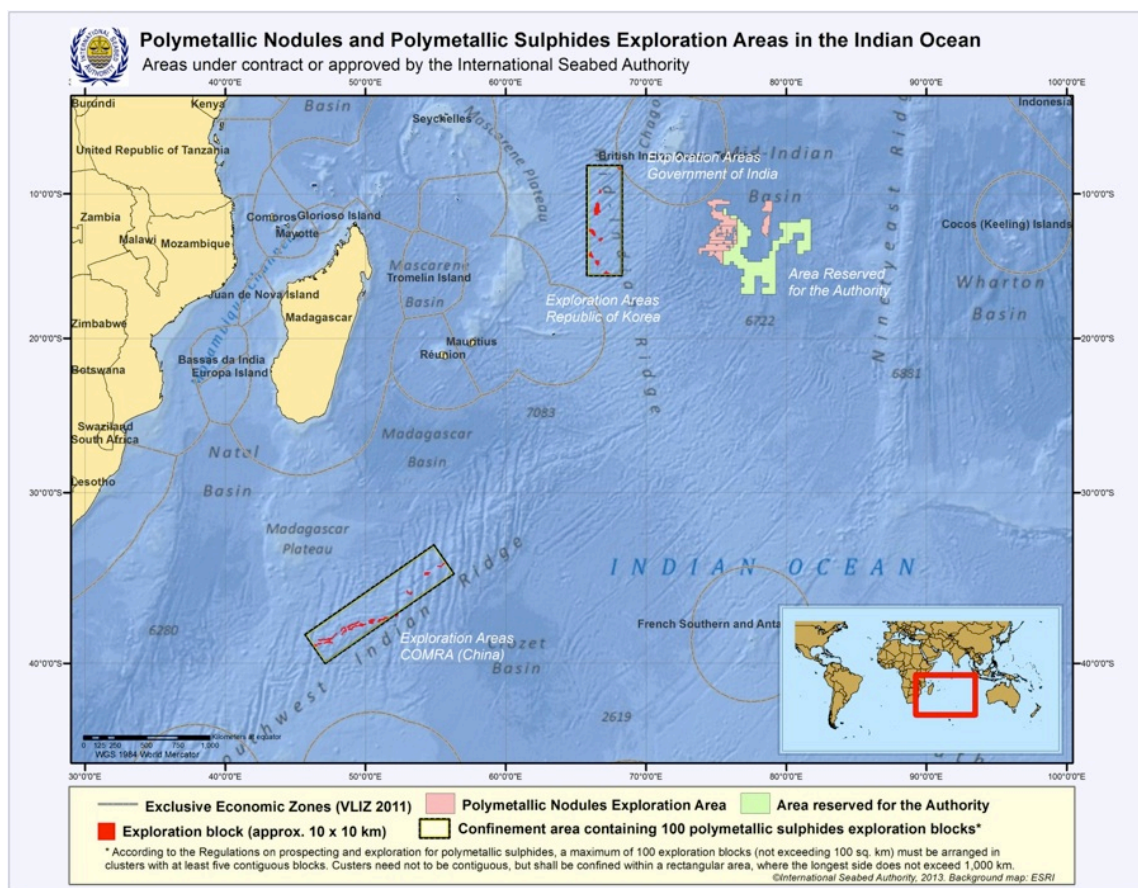


Figure 2-49 Zones sous contrat ou approuvées par l'AIFM dans l'océan Indien.

2.5.4.1. Les acteurs principaux de l'exploration minière des sulfures hydrothermaux

La société Neptune Minerals, Inc.

La société Neptune Minerals, Inc. a été fondée en 2011 et a obtenu ses permis d'exploration au travers de l'acquisition des sociétés Dorado Ocean Resources (Hong-Kong) et Neptune Minerals, Plc. (Royaume-Uni). Ces deux dernières étaient respectivement la deuxième et la troisième compagnie en termes de surface de permis d'exploration pour les sulfures hydrothermaux. Au total, Neptune Minerals détient 83 941 km² de permis d'exploration et a déjà soumis plusieurs dossiers de demande de permis qui totalisent 167 484 km². Les permis sont principalement situés dans le sud-ouest pacifique et plus particulièrement sud l'axe Volcanique de Tonga Kermadec.

En dehors de ces chiffres correspondant aux surfaces détenues par Neptune Minerals, très peu d'informations sont disponibles sur la localisation, la nature ou la géochimie des sites appartenant à la société. Aucune estimation de ressources utilisant les codes de l'industrie minière n'a été rendue publique. Toutefois, la société continue son activité d'exploration et d'évaluation au sein de ses permis d'exploration.

La société Nautilus Minerals, Inc.

La société Nautilus Minerals, Inc. est l'une des plus actives dans le domaine de l'exploration et de l'évaluation des sulfures polymétalliques océaniques. En 2005, elle s'associe avec la société Placer Dome, pour débiter des opérations de forages sur le site de Solwara 1 découvert lors d'explorations scientifiques (Papouasie-Nouvelle-Guinée). Au 31 décembre 2012, Nautilus possédait 290 000 km² de permis d'exploration auxquels s'ajoutent plus de 240 000 km² pour les demandes en cours dans les zones économiques exclusives des Tonga, de Papouasie-Nouvelle-Guinée, des îles Salomon, des Fidji, du Vanuatu et de Nouvelle Zélande (Figure 2-50). De plus, Nautilus est la seule société à avoir obtenu un permis d'exploitation pour les sulfures massifs océaniques en 2011. Ce permis a été déposé dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle-Guinée et concerne le site de Solwara 1.

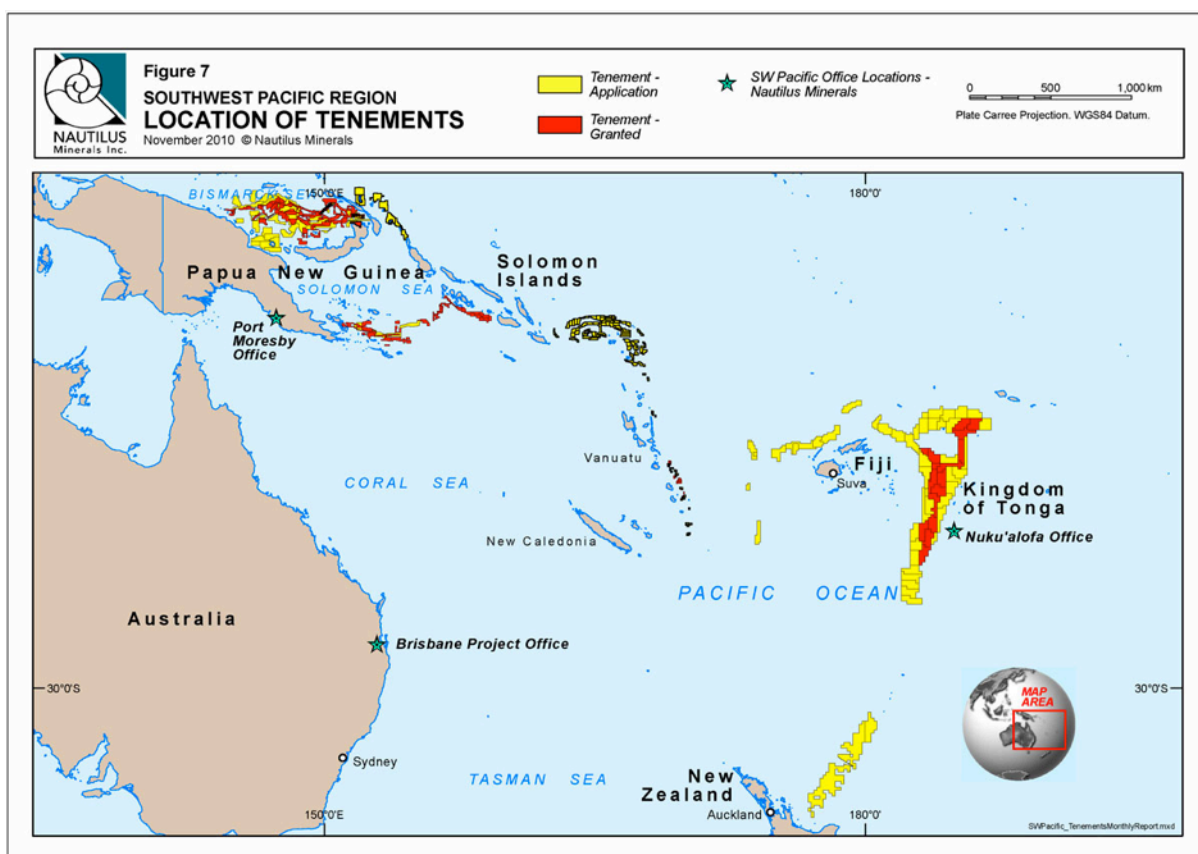


Figure 2-50 Carte de localisation des permis d'exploration accordés (rouge) et demandés (jaune) par la société Nautilus Minerals Inc.

(Source : <http://www.nautilusminerals.com/s/PhotoGallery-Maps.asp>).

2.5.4.2. L'exploration minière des gisements de Solwara 1 et 12

La plupart des travaux d'exploration et d'évaluation réalisés dans le bassin de Manus ont été réalisés par la société Nautilus Minerals. En revanche, les nombreuses missions océanographiques scientifiques menées depuis la fin des années 1980 par plusieurs pays dont la France, l'Allemagne, les USA, l'Australie, la Russie et la Corée du Sud (Auzende et al, 1997; Binns and Scott, 1993; Bolton et al, 1988; Craddock et al, 2010; Dekov and Rouxel, 2012; Gamo et al, 1997; Gena et al, 2001; Kim et al, 2004; Lisitsyn et al, 1993; Moss and Scott, 2001; Reeves et al, 2011; Sinton, 1997; Tufar, 1990).

L'estimation des ressources minérales menée par la société Nautilus a permis d'identifier dix-neuf sites (Solwara 1 à Solwara 19), tous situés dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle-Guinée (Figure 2-51). A part deux sites minéralisés qui sont dominés par les sulfates (Solwara 17 et Solwara 19), les dépôts sont tous du type « Seafloor Massive Sulfides » (SMS). Les sites de Solwara 1 et Solwara 12 sont ceux qui ont été les plus étudiés et les seuls pour lesquels des estimations de ressources ont été calculées.

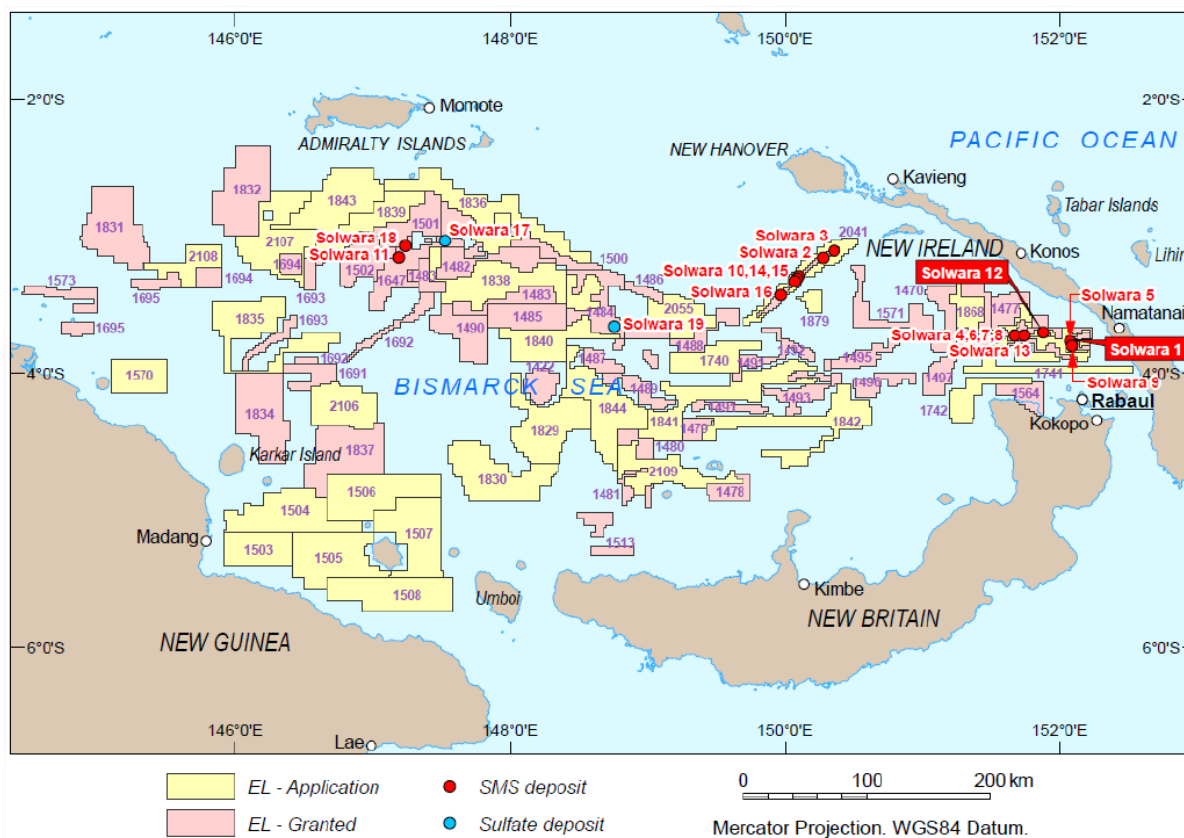


Figure 2-51 Carte de localisation des sites Solwara 1 à Solwara 19.
(Source : Lipton, 2012).

Contexte géologique régional

Le bassin de Manus est un bassin arrière-arc, compris entre les arcs volcaniques tertiaires de Nouvelle-Irlande et de Nouvelle-Angleterre, les fosses de subduction de Manus, aujourd'hui faiblement active, et de Nouvelle-Angleterre (Figure 2-52). Le bassin de Manus s'ouvre principalement, depuis environ 3,5-4 Ma, séparés par de grandes zones de fracture, Wuillaumez FZ, Djaul FZ et Weitin FZ. Son ouverture résulte du démantèlement de l'arc volcanique situé à la frontière convergente des plaques Pacifique et Australie. La partie centrale du bassin est caractérisée par un axe d'accrétion bien développé, le Manus Spreading Center (MSC), se propageant vers le Nord et présentant des caractéristiques proches des dorsales médio-océaniques, c'est-à-dire une ride axiale, coupée par un graben, où se situe l'accrétion actuelle et flanquée de dépressions latérales. Cette ride est située à 2 500 m de profondeur et est orientée N45 (Auzende et al, 1997; Auzende et al, 2000; Martinez and Taylor, 1996).

L'activité magmatique de long de la dorsale de Manus entre Wuillaumez FZ et Djaul FZ se manifeste par la production de laves basaltiques de type MORB (Sinton, 1997). Plusieurs sites hydrothermaux ont été étudiés le long de cette dorsale (sites Vienna Woods, Tufar2 et 3)

(Lisitsyn et al, 1993; Tufar, 1990). Les dépôts hydrothermaux les plus abondants et riches se sont développés dans un bassin en pull-apart (East Manus Basin ; EMB) limité respectivement au Nord-Est et au Sud-Est par les zones de failles transformantes Weitin FZ et Djaul FZ (Figure 2-52). Dans ce bassin, l'activité magmatique est marquée par le développement de plusieurs rides d'accrétion disposées en échelon et d'édifices volcaniques isolés. Les laves émises présentent une grande variété depuis des basaltes aux rhyolites en passant par des termes intermédiaires de type andésites. Les études géochimiques ont permis de mettre en évidence une composante d'arc importante en relation avec la présence de zones de subduction situées à moins de 200 km du bassin (Sinton, 1997). Plusieurs sites hydrothermaux actifs ont été découverts dans cette région présentant de grandes différences de leur composition et de leur abondance (Binns and Scott, 1993; Craddock et al, 2010; Gamo et al, 1997; Gena et al, 2001; Hrischeva et al, 2007; Moss and Scott, 2001; Pasava et al, 2004; Petersen et al, 2003; Reeves et al, 2011).

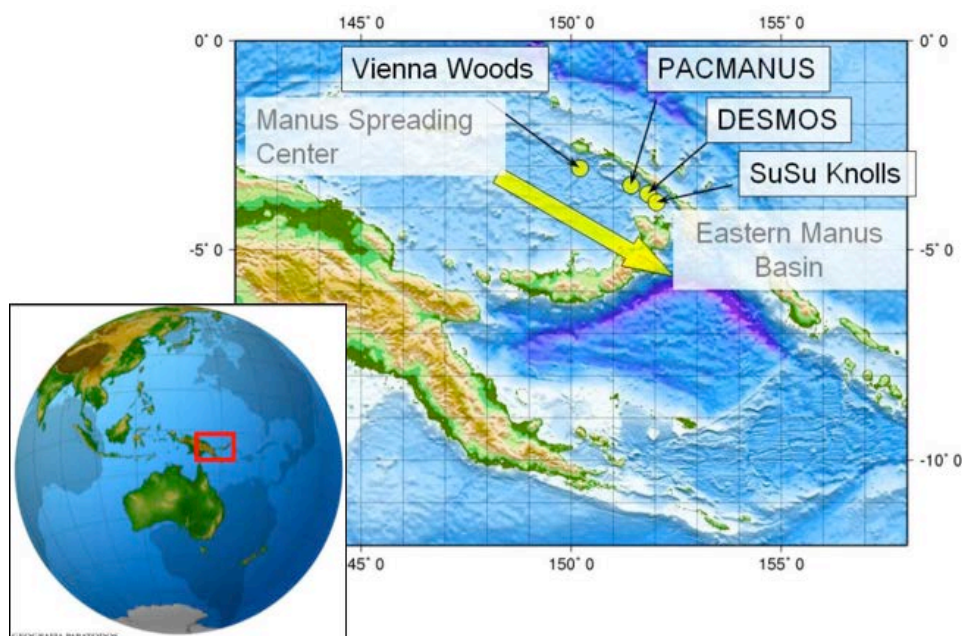


Figure 2-52 Contexte tectonique du bassin arrière-arc de Manus et localisation des sites hydrothermaux (Vienna Woods, PACMANUS, DESMOS, SuSu Knolls).

Le gisement de Solwara 1 appartient au champ hydrothermal de SuSu Knolls.

Contexte géologique local

Le gisement de Solwara 1 se situe dans la mer de Bismarck à 40 km des côtes de la Papouasie-Nouvelle-Guinée (Figure 2-51). Il s'agit de la première cible retenue par Nautilus et la première à avoir fait l'objet d'une étude d'évaluation des ressources (Lipton, 2008). Le gisement de Solwara 1 appartient au champ hydrothermal de SuSu Knolls qui comprends trois sites (Binns et al, 1997; Hrischeva et al, 2007): (i) le site South Su, (ii) le site North Su, (iii) le site Suzette ou Solwara 1. Le substratum sur lequel repose le gisement de Solwara 1 (ou Suzette) est majoritairement constitué d'andésite alors que les sites North Su et South Su se sont mis en place sur un dôme dacitique.

Le gisement de Solwara 12 se situe à 25 km vers le Nord-Ouest de Solwara 1 (Figure 2-50) et est localisé dans le même secteur que le site hydrothermal Desmos (ou parfois Onsen) découvert par les équipes scientifiques japonaises (Douville et al, 1999; Gamo et al, 1997; Gena et al, 2001). Alors que le site Onsen se trouve sur la bordure nord-ouest de la caldeira

Desmos, Solwara 12 se situe au Sud-Est de cette grande structure volcanique (Figure 2-53). Dans le secteur, le substratum est principalement composé de pillow lavas et de hyaloclastites d'affinité basaltique à andésitique (Gena et al, 2006).

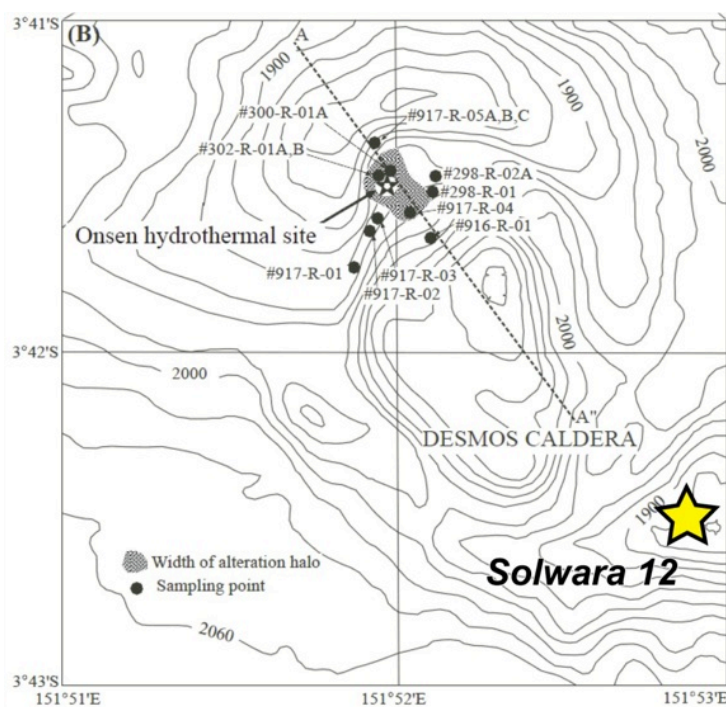


Figure 2-53 Carte bathymétrique de la caldera Desmos et localisation des sites minéralisés Onsen et Solwara 12.

Modifié d'après Gena et al, (2001).

Le gisement de Solwara 1

o Minéralisations du gisement de Solwara 1

Le gisement de Solwara 1 est composé de cheminées de sulfures et sulfates reposant sur un volume relativement important de sulfures massifs. Trois principaux corps minéralisés ont été identifiés à partir de la microbathymétrie, de l'électromagnétisme et des études de terrain par ROV (Remote Operated Vehicle). Deux de ces entités sont orientées selon une direction NW-SE ; la troisième est globalement perpendiculaire aux deux autres et suit une direction NE-SW (Figure 2-54). A ces trois corps principaux, une nouvelle zone a été mise en évidence en 2010 (North 1 ; non présenté sur la Figure 2-54) et se situe à 250 m au nord de la zone minéralisée n°2. Les lentilles minéralisées sont stratiformes et encaissées dans des unités volcaniques et volcanoclastiques dont la nature chimique, bien que majoritairement andésitique, évolue localement des basaltes jusqu'aux rhyolites. L'ensemble du système est généralement recouvert de sédiments composés d'argiles et de silts dont l'épaisseur varie de 0 à 2,7 m (rapports Golder Associates). L'épaisseur des dépôts demeure difficile à évaluer car la plupart des sondages n'ont pas totalement traversé les sulfures massifs (Figure 2-55). Toutefois, les zones de minéralisations les plus développées présentent une épaisseur estimée supérieure à 18 m. L'expression visible de ces minéralisations en surface se résume à des champs de cheminées de sulfures et sulfates relativement bien développés (environ 90 000 m²) et surmontant généralement des monts ou talus composés de cheminées effondrées.

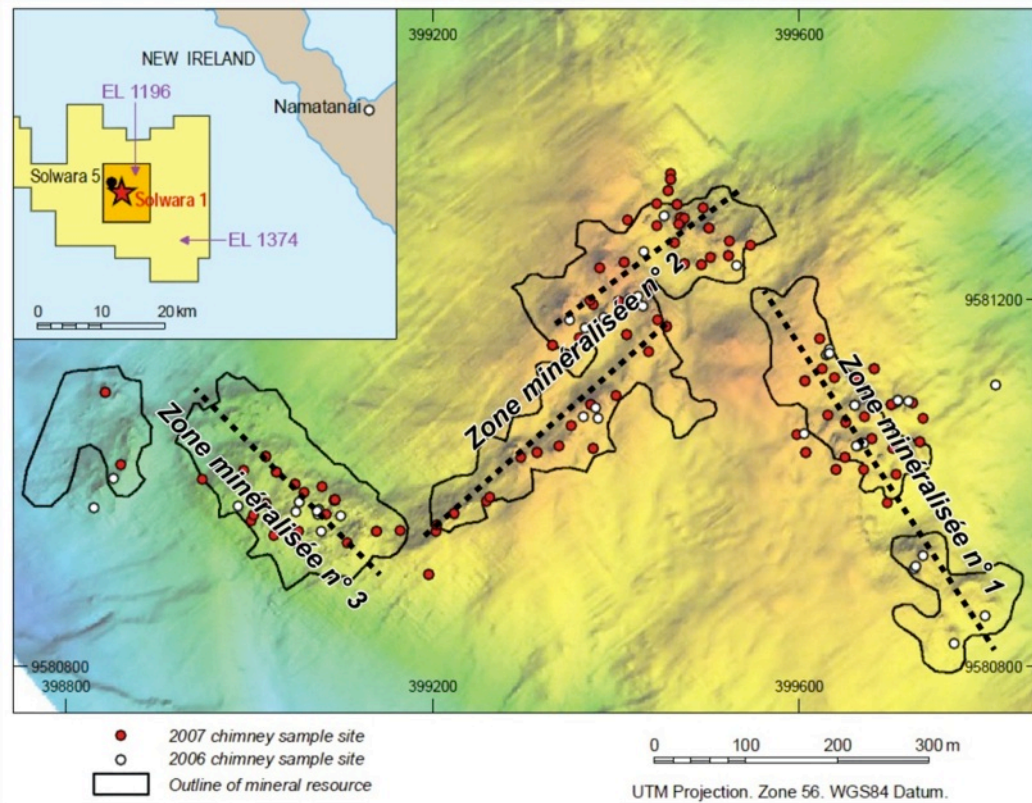


Figure 2-54 Localisation des principales zones de sulfures massifs (contour noir) estimées à partir des données d'électromagnétisme.
 (modifié d'après la source : <http://www.nautilusminerals.com/s/PhotoGallery-Maps.asp>).

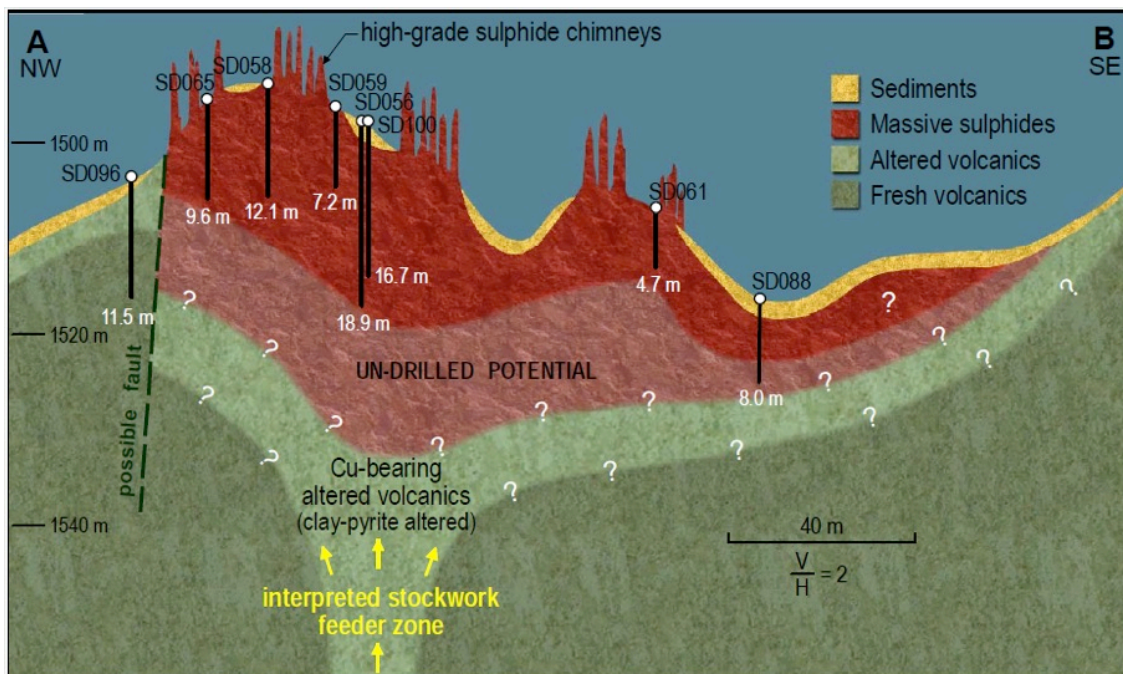


Figure 2-55 Coupe transverse de la zone minéralisée n°2 issue des interprétations lithologiques de sondages.
 (Source : <http://www.nautilusminerals.com/s/PhotoGallery-Maps.asp>).

Les descriptions géologiques issues des travaux de Nautilus sur les sondages ont permis d'identifier différentes « classes » lithologiques. Elles sont basées sur la nature minéralogique, la texture de la roche, la taille des grains et le pourcentage volumique des sulfures. Elles sont séparées en fonction de leur affinité génétique : (i) hydrothermale, (ii) volcanique et (iii) sédimentaire. Le Tableau 2-26 résume les différentes classes lithologiques associées au processus hydrothermal tels qu'elles sont présentées dans le rapport Golder Associates de 2008. En 2010, une nouvelle classification a été proposée. Bien qu'assez proche de la classification originale, celle-ci, plus simple, est sensée mieux représenter les différents types de minéralisations observées (Lipton, 2012).

Tableau 2-26 Descriptions lithologiques des facies hydrothermaux rencontrés sur le site de Solwara 1.
(d'après Lipton, 2008).

Lithology	Code	Descriptions/comments
Massive sulfide	HMS	> 50 % sulfides. Commonly the gangue minerals are also hydrothermal (anhydrite, barite, clay).
Semi-massive sulfide	HSM	20-50 % sulfides. Commonly the gangue minerals are also hydrothermal (anhydrite, barite, clay).
Sulfate-Sulfide	HSS	5-20% sulfides. Gangue components are apparently hydrothermal (anhydrite or barite +/- silica). Little or no clay.
Fe-(Mn)-(Si) Oxides	HFE	Dominant Fe-oxide/oxyhydroxide, scarce sulfides. Only use for intervals of red-brown ferruginous deposit. Black Mn subordinate.
Mn-(Fe)-(Si) Oxides	HMN	Dominant Mn oxide minerals. Red-brown Fe absent or subordinate.
Hydrothermally altered clay-rich rock	HSI	White to very pale grey or buff, "amorphous-looking" typically soft rock. May contain minor anhydrite and fine grained disseminated pyrite. Protolith is undetermined.
Anhydrite-barite rock	HAB	Mixed anhydrite-barite dominated rock. clay-poor. Notably dense
Anhydrite	HAN	Anhydrite dominated rock.
Other hydrothermal rocks	H_Other	Other rocks of probable hydrothermal origin that do not fit into the above categories.

A partir des données lithologiques, la société Golder Associates (société en charge de l'estimation des ressources) a proposé un modèle géologique relativement simple. Celui-ci considère quatre formations principales superposées avec du sommet vers la base : (i) des sédiments non consolidés (Unconsolidated Sediments), (ii) des sédiments partiellement indurés (Lithified Sediments), (iii) les sulfures (Sulfide dominant) regroupant la quasi-totalité des lithologies définies dans le Tableau 2-25, et (iv) le socle ± altéré et ± minéralisé (Basement). Ce modèle géologique a servi de base pour l'établissement du « block model » indispensable à l'évaluation des ressources.

○ Evaluation des ressources du gisement de Solwara 1

L'ensemble des traitements nécessaires à l'évaluation des ressources du gisement de Solwara 1 ne sera pas développé ici, mais les grandes étapes de l'étude seront présentées. Tout d'abord, cette étude a été réalisée par une entreprise indépendante (Golder Associates) à partir des données fournies par la société Nautilus. L'estimation des ressources a suivi le standard minier de classification des ressources NI 43-101, un standard canadien très largement utilisé pour les projets miniers terrestres.

La première étape a consisté à séparer le volume minéralisé correspondant aux cheminées de celui correspondant aux autres lithologies situées en profondeur. En effet, l'échantillonnage réalisé étant différent (cheminées : échantillonnage des surface par ROV ; autres roches : échantillonnage par sondages), il est nécessaire de les traiter séparément. De plus, l'hétérogénéité minéralogique et géochimique des cheminées ne permet pas d'utiliser les mêmes outils géostatistiques que ceux appliqués pour les sulfures ± massifs. Ceci se traduira par un degré de confiance moindre dans l'estimation des ressources pour les cheminées.

Une fois que le volume situé sous les cheminées a été défini, il est possible de construire le « block model ». Cette étape consiste à diviser un volume en plusieurs blocs de dimension régulière et adaptée à la maille d'échantillonnage. Pour le gisement de Solwara 1, chaque bloc est caractérisé par une longueur et une largeur de 10 m, pour une hauteur de 0,5 m. A chaque bloc est assigné une lithologie simplifiée (ex : Lithified Sediments, Sulfide dominant, Basement ; Figure 2-56) et, plus tard, une teneur en Cu, Zn, Ag et Au issue de l'étude géostatistique.

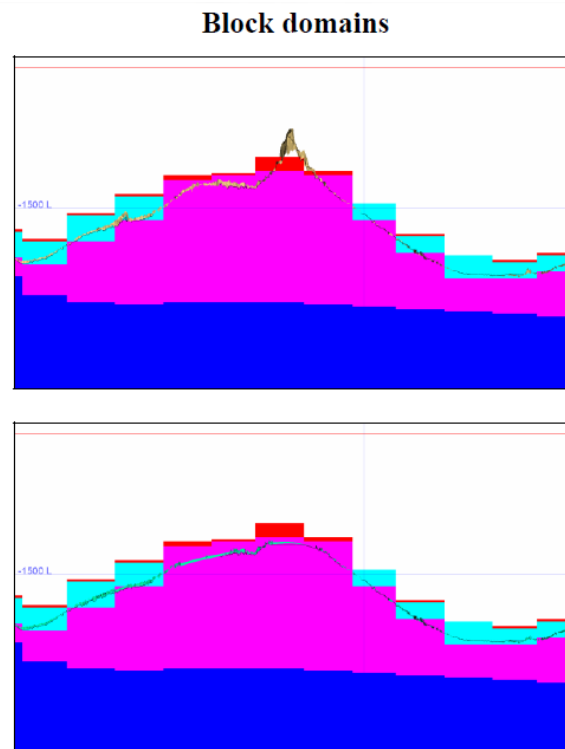


Figure 2-56 Coupe au travers du "block model" établi pour le site de Solwara 1.

La topographie réelle (en haut) et la topographie issue de la soustraction des zones de cheminées (en bas) sont également présentées. Blocs bleus foncés : socle; blocs roses : sulfures; blocs bleus clairs : sédiments; blocs rouges : cheminées. D'après le rapport Golder Associates.

L'étape suivante consiste donc à estimer les teneurs élémentaires (ici Cu, Zn, Ag et Au) de chaque blocs définis précédemment. Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires : (i) vérifier que le jeu de données est homogène spatialement pour une même lithologie, (ii) estimer la variance des données géochimiques (analyse variographique) pour chaque lithologie et selon différentes directions, et (iii) réaliser l'interpolation des teneurs pour chaque bloc (ici krigeage ordinaire). Pour le gisement de Solwara 1, les données erratiques ne permettent pas d'établir une analyse variographique sur l'ensemble des lithologies, ni même de pouvoir estimer la variance selon des azimuts différents.

La dernière étape, réalisée en parallèle de l'estimation, amène à classifier les ressources en prenant en compte tous les paramètres utilisés pour définir la ressource ainsi que leurs incertitudes associées. Cette étape permet donc de donner un degré de certitude sur les valeurs chiffrées des volumes et teneurs. Le gisement de Solwara 1 est caractérisé par des « ressources indiquées » (*indicated resources*) et « estimées » (*inferred resources*) (Figure 2-57). En raison de problèmes inhérents au prélèvement (ex. faible récupération dans certains sondages, maillage moins régulier dans certains secteurs) mais également liés aux incertitudes lors des études géostatistiques, la majeure partie de la zone minéralisée (en vert sur la Figure 2-57) ne fait pas partie des « ressources indiquées ».

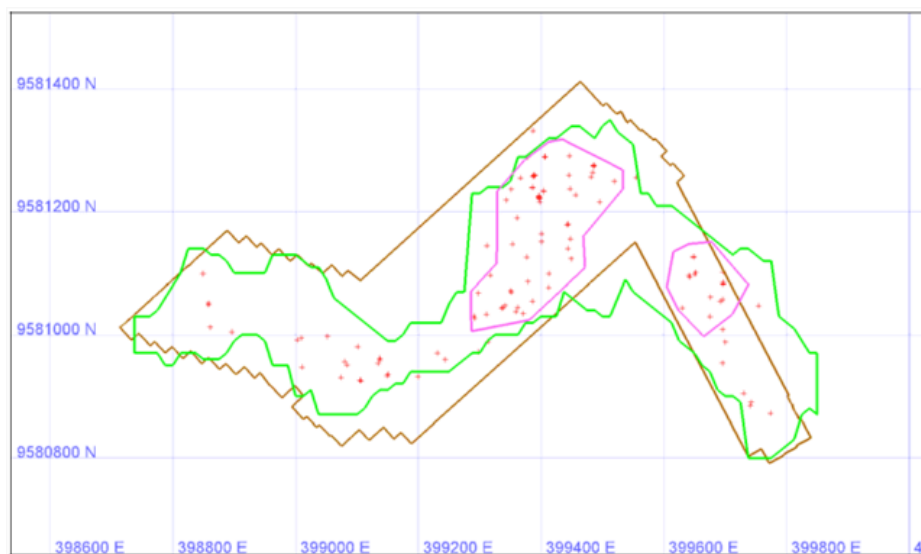


Figure 19-14 Indicated resource area

Brown line = 20cm by 20cm bathymetry limits; magenta line = Indicated Resource limit; green line = resource boundary.

Figure 2-57 Localisation des ressources indiquées (contours violets) et de la ressource totale (contour vert).
D'après le rapport Golder Associates.

Les résultats des différentes estimations des ressources classifiées pour le gisement de Solwara 1 sont présentés dans le Tableau 2-27 et le Tableau 2-28. Dans l'estimation présentée sur le Tableau 2-27, il est important de noter que chaque bloc du gisement de Solwara 1 est considéré comme ressource lorsque la teneur en cuivre est supérieure à 4 % ; c'est ce que l'on appelle la teneur de coupure. Tous les blocs dont la teneur en cuivre est inférieure à 4 %, et ce même pour des valeurs très élevées en Au, Ag ou Zn, sont exclus du calcul de ressources. Le cuivre constitue, dans cette estimation, la substance principale du gisement, c'est-à-dire la substance qui devra permettre au gisement d'être économiquement viable.

Tableau 2-27 Estimation des ressources du gisement de Solwara 1.

Il n'y a pas de ressources calculées pour la lithologie "sédiments non consolidés" en raison du nombre insuffisant de sondages. Les ressources « estimées » (inferred) des sulfures intègrent également les ressources « indiquées » (indicated). 6a teneur de coupure est de 4 % en cuivre. D'après le rapport Golder Associates (Lipton, 2012).

Area	Class	Domain	Tonnes (kt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Zn (%)
1	Indicated	Sulfide dominant	910	7.7	5.4	24	0.4
		Chimney	80	11	17	170	6
	Inferred	Consolidated Sediment	12	5.4	5.5	52	1.1
		Sulfide dominant	1,200	8.8	6.2	27	0.6
		Inferred Total	1,300	8.8	6.9	36	0.9
1 North	Inferred	Consolidated Sediment					
		Sulfide dominant	65	7.8	7.5	49	1.3
		Upper footwall					
		Inferred Total	65	7.8	7.5	49	1.3
Total	Indicated	-	910	7.6	5.4	24	0.4
	Inferred	-	1,365	8.8	6.9	36	0.9

Note: rounding may result in errors in reproducing the totals from the individual components shown in this table. Solwara 1 estimated using OK and Solwara 1 North with IDW.

Pour l'estimation présentée dans le Tableau 2-28, la teneur de coupure est exprimée en cuivre équivalent⁶. Ce paramètre prend en compte les teneurs en cuivre, or et argent de chaque bloc ainsi que le prix des métaux (à l'instant où est réalisée l'estimation) et la perte de ces métaux au cours de différentes étapes (ex : transport, traitement du minerai). Par une formule simple, les teneurs en or et argent sont donc converties en teneurs équivalentes en cuivre.

Tableau 2-28 Estimation des ressources du gisement de Solwara 1 exprimées en cuivre équivalent.

Il n'y a pas de ressources calculées pour la lithologie "sédiments non consolidés" en raison du nombre insuffisant de sondages. Les ressources « estimées » (inferred) des sulfures intègrent également les ressources « indiquées » (indicated). La teneur de coupure est de 2.6 % en cuivre équivalent. D'après le rapport Golder Associates, (Lipton, 2012).

Area	Class	Domain	Tonnes (kt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Zn (%)
1	Indicated	Sulfide dominant	1030	7.2	5.0	23	0.4
		Chimney	80	11.0	17.0	170	6.0
	Inferred	Consolidated Sediment	27	4.1	4.5	49	1.4
		Sulfide dominant	1330	8.1	5.8	25	0.6
		Inferred Total	1440	8.2	6.4	34	0.9
1 North	Inferred	Consolidated Sediment	14	2.8	9.1	81	3.4
		Sulfide dominant	65	7.8	7.5	49	1.3
		Upper footwall	21	2.8	1.1	5	0.2
		Inferred Total	100	6.0	6.3	43	1.3
Total	Indicated	-	1030	7.2	5.0	23	0.4
	Inferred	-	1540	8.1	6.4	34	0.9

Note: rounding may result in errors in reproducing the totals from the individual components shown in this table. Solwara 1 and 1 North estimated using OK.

Cu Equivalent $CuEq = 0.915 * Cu + 0.254 * Au + 0.00598 * Ag$

⁶ Cuivre equivalent = $0.915 * Cu + 0.254 * Au + 0.00598 * Ag$

Dans le Tableau 2-27, on remarque que les ressources indiquées n'ont pu être calculées que pour la lithologie « sulfures » et qu'elles sont de 0.91 Mt à 7.7 % de cuivre, 0.4 % de zinc, 5.4 g/t d'or et 24 g/t d'argent. Le total des ressources estimées (inferred) est quant à lui de 1.3 Mt à 8.8 % de cuivre, 0.9 % de zinc, 6.9 g/t d'or et 36 g/t d'argent. Comparée aux résultats des estimations réalisées en 2008 (1.3 Mt à 7.5 % Cu, 0.8 % Zn, 7.2 g/t Au et 37 g/t Ag ; Lipton, 2008), la ressource estimée en 2012 présente une augmentation de plus de 15 % des teneurs en cuivre alors que les teneurs en or, argent et zinc ont très peu évoluées.

Dans le Tableau 2-28, on remarque que le fait de prendre en compte tous les métaux valorisables dans la teneur de coupure (par l'intermédiaire du paramètre « cuivre équivalent ») permet d'augmenter substantiellement la quantité de minerai sans changer de manière significative les teneurs de chaque métaux.

Le gisement de Solwara 12

o Minéralisations du gisement de Solwara 12

Le gisement de Solwara 12 est un dépôt inactif de type SMS. Il est composé d'une seule zone minéralisée (Figure 2-58) contrôlée par une ride globalement orientée Est-Ouest (Lipton, 2012). Les études de cartographie détaillée ont permis d'identifier plusieurs groupes de cheminées inactives sur une surface de 180 m par 170 m. Les cheminées situées au centre sont riches en cuivre et sont entourées de cheminées de plus basse température riche en zinc. L'ensemble de la zone minéralisée est recouvert d'une importante couverture sédimentaire (Figure 2-59).

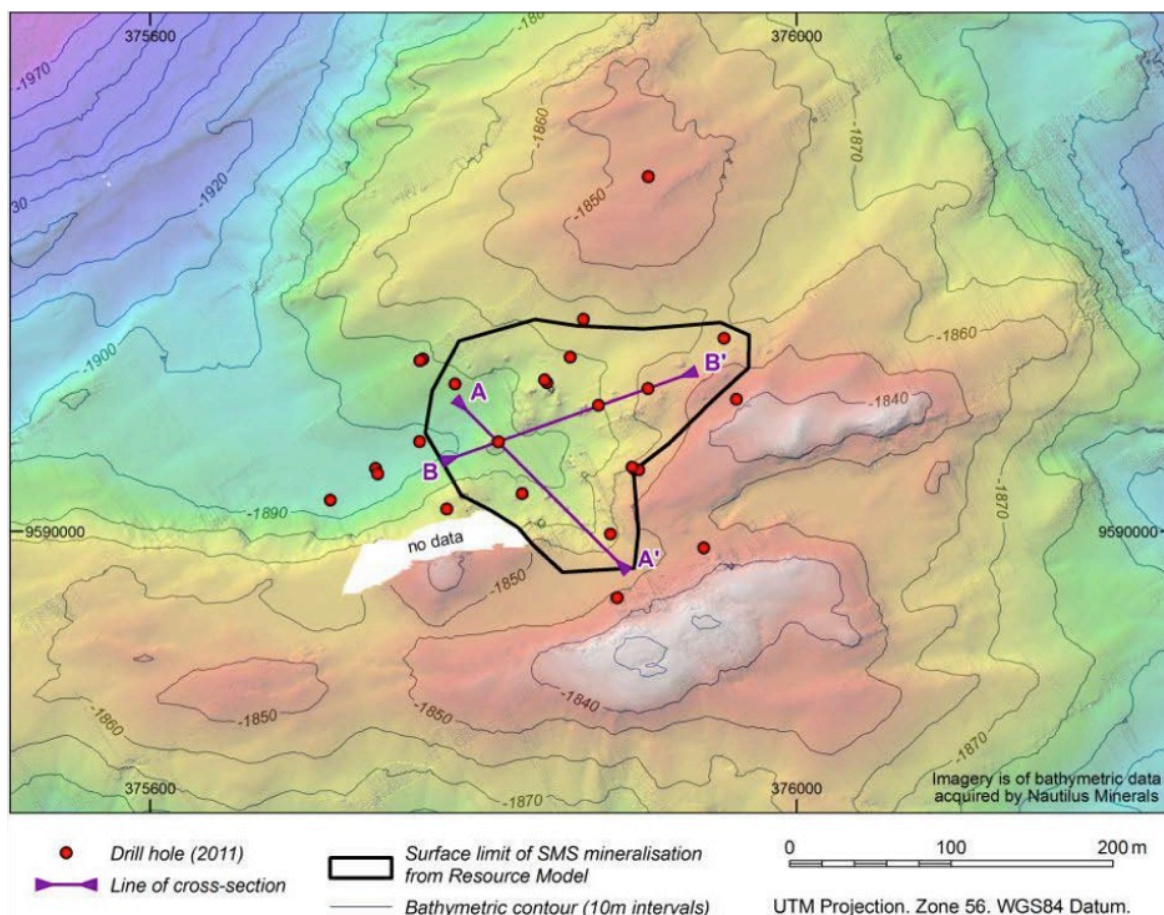


Figure 2-58 Carte bathymétrique présentant la zone minéralisée de Solwara 12 et la position des sondages réalisés. (Lipton, 2012)

Les opérations de sondages ont permis de proposer un modèle simplifié pour le gisement. Quatre grandes structures minéralisées ont été identifiées (Figure 2-59): (i) les cheminées de sulfures, (ii) une minéralisation de sulfures riches en zinc située sous les sédiments, (iii) de sulfures massifs et (iv) des sulfures disséminés au sein de roches volcaniques très altérées. Même si l'épaisseur du gisement est difficile à estimer, les vingt-cinq sondages réalisés montrent que localement la minéralisation peut se continuer jusqu'à 35 m sous le plancher océanique. Les classes lithologiques du site Solwara 1 ont été conservées pour décrire les échantillons prélevés sur le site Solwara 12. Toutefois, les formations lithologiques utilisées pour le « bloc model » sont un peu différentes. Si l'on retrouve les sédiments non consolidés et lithifiés (Unconsolidated and lithified sediments) et les zones à sulfures (Sulfide dominant), le socle plus ou moins altéré est divisé en deux formations : (i) le mur supérieur (Upper footwall) et (ii) le mur inférieur (Lower footwall).

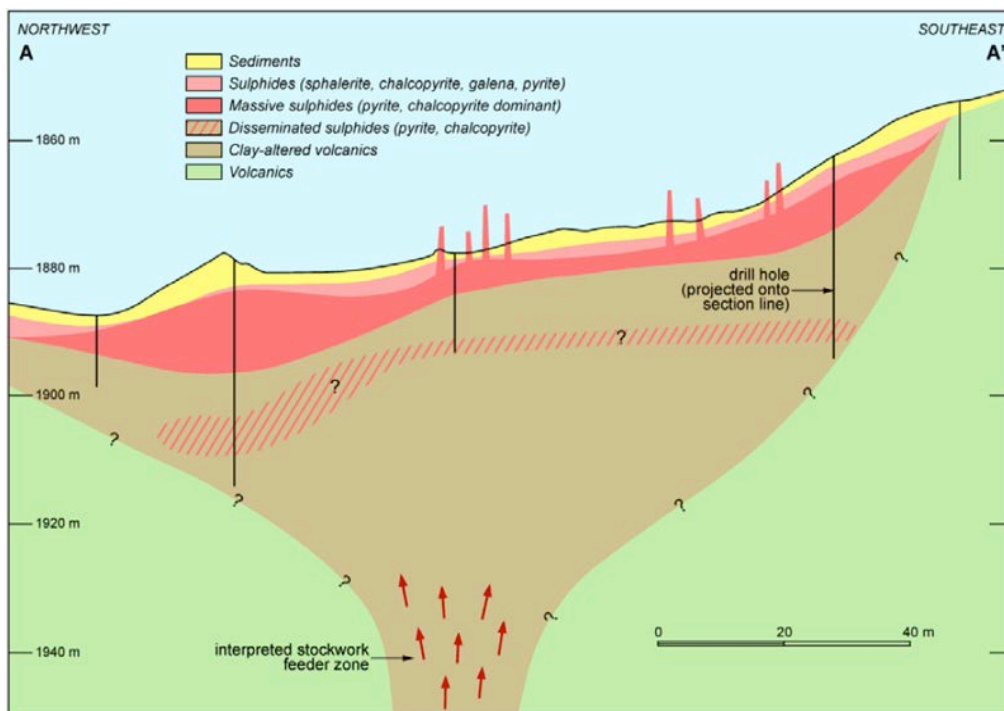


Figure 2-59 Coupe interprétative du site minéralisé de Solwara 12. (Lipton, 2012).

○ Evaluation des ressources du gisement de Solwara 12

Pour l'évaluation du gisement de Solwara 12, le même protocole que celui appliqué pour Solwara 1 a été utilisé. Les cheminées ont été séparées du reste de la minéralisation et les blocs du « bloc model » sont aux mêmes dimensions que ceux de Solwara 1 (ex. 10 m x 10 m x 0,5m). Toutefois, en raison du peu de données disponibles, l'analyse variographique n'a pu être réalisée. Les paramètres définis pour Solwara 1 ont donc été utilisés pour l'estimation du gisement de Solwara 12.

Les résultats de l'estimation sont présentés sur le Tableau 2-29. Toutes les ressources ont été classifiées en « estimées » (inferred) en raison d'une caractérisation relativement faible du gisement. Le manque de données géologiques sur les cheminées et sur le mur inférieur (Lower footwall) ne permet pas un calcul de ressource. La teneur de coupure, exprimée en cuivre équivalent, est de 2,6 % Cu équivalent.

Tableau 2-29 Estimation des ressources du gisement de Solwara 12.

Les estimations ont été réalisées à partir d'un kriégeage ordinaire. La teneur de coupure est de 2,6% CuEq; $CuEq = 0,915 * Cu + 0,254 * Au + 0,00598 * Ag$. (Lipton, 2012).

Class	Domain	Tonnes (kt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Zn (%)
Inferred	Sediment	46	2.9	2.0	35	2.2
	Sulfide dominant	185	8.4	4.0	61	4.0
	Upper footwall	0.7	3.7	0.7	13	0.3
	Inferred Total	230	7.3	3.6	56	3.6

Le total des ressources estimées (inferred) est de 0,23 Mt à 7,3 % de cuivre, 3,6 % de zinc, 3,6 g/t d'or et 56 g/t d'argent. Comparée aux résultats des estimations réalisées du gisement Solwara 1, les teneurs en cuivre et or estimées sur Solwara 12 sont plus faibles alors que les valeurs en argent et zinc sont plus élevées.

2.5.4.3. Les ressources en sulfures de la dorsale Atlantique

La zone la mieux connue et la mieux explorée actuellement, à la fois pour les sites actifs et les sites inactifs, est celle étudiée par la Russie depuis plus d'une dizaine d'années (et aussi dans le cadre d'une coopération entre la France et la Russie), entre 13°N et 21°N sur la dorsale Atlantique (Fouquet et al, 2010; Fouquet, 2013). Une exploration systématique de cette portion de dorsale lente sur environ 1 000 kilomètres de long et 20 kilomètres de large a permis de localiser sept champs hydrothermaux majeurs dont quatre dépôts inactifs. L'ensemble de ces minéralisations totalise plus de 75 millions de tonnes de sulfures. En considérant qu'environ 40 000 kilomètres des 60 000 kilomètres de dorsales sont des dorsales lentes, on peut estimer que la portion de ces dernières ayant moins d'un million d'années (20 kilomètres de large pour un taux d'ouverture de 2 cm/an) contient 40 X 75 millions de tonnes, soit environ 3 000 millions de tonnes de minéralisations sulfurées. Les amas sulfurés fossiles actuellement situés sur les continents et formés en milieu sous-marin au cours des temps géologiques représentent actuellement environ 850 millions de tonnes de sulfures. Avec une teneur de 5 % en cuivre, les minéralisations des océans actuels représentent donc environ 150 millions de tonnes de cuivre, ce qui correspond à une dizaine d'années de consommation mondiale (15,8 millions de tonnes/an). Les réserves mondiales en cuivre sur les continents sont estimées à 630 millions de tonnes, soit à une quarantaine d'années de réserves au rythme de consommation actuel. Notons, enfin, qu'au-delà de la largeur des 20 kilomètres considérée dans les estimations, des dépôts de sulfures hydrothermaux enfouis sous une couverture de sédiments existent sur l'ensemble de la largeur de l'océan. En l'état actuel des technologies, ces dépôts sont difficilement détectables.

Dans ce contexte, un permis d'exploration a été obtenu par la Russie sur la dorsale Atlantique (Figure 2-39). La France (contractant Ifremer) a également déposé une demande de permis d'exploration sur la dorsale Atlantique. La dorsale sud-ouest indienne possède également un fort potentiel en ressources, et fait actuellement l'objet d'un permis d'exploration par la Chine (contractant *China Ocean Mineral Resources Research and Development Association*).

2.5.4.4. *Les activités minières en mer Rouge*

La fosse de sédiments hydrothermaux et de saumures chaudes d'Atlantis II Deep reposant à plus de 2 000 m de profondeur fut découverte en 1963 par les scientifiques du WHOI à bord du navire de recherche Atlantis II. Depuis, 18 fosses semblables ont été identifiées en mer Rouge le long de la dorsale, mais seul Atlantis II Deep apparaît économiquement exploitable.

Contexte historique

En septembre 1975, la Commission de Mer Rouge Saudi-Soudanaise (« *Saudi-Sudanese Red Sea Commission* », ou RSC) a été créée afin d'évaluer le potentiel économique du gisement. La société d'exploration allemande Preussag AG a été engagée et a reçu 28 M\$ pour réaliser une campagne d'exploration géologique et une étude de faisabilité sur 5 ans. D'après les premières estimations de ressources, le gisement présente une forte valeur économique. En mars 1979, Preussag AG lança son premier pré-pilote de test en équipant le navire de forage *Sedco 445* d'un dispositif d'aspiration de 2 200 m de long qui permit de pomper pendant 4 mois 15 750 m³ de boues métallifères à la surface. Il a ainsi été prouvé que les sédiments hydrothermaux d'Atlantis II Deep pouvaient être exploités en continu et concentrés en mer en utilisant les techniques conventionnelles de flottation, (Scholten et al, 2000).

De nombreuses études environnementales ont montré que la phase d'exploitation n'avait que peu d'effets indésirables. Le navire de recherche allemand *Valdivia* a pisté les panaches de boue rejetés à une profondeur de 400 m afin d'être sûr qu'elles ne polluent pas l'eau ou qu'elles ne réduisent la pénétration de la lumière, facteur essentiel au développement de la vie sous-marine. Des images LANDSAT ont montré que les panaches de rejets n'ont affecté ni les récifs coralliens, ni la faune de surface.

Suite à l'effondrement du cours des métaux dans les années 1980, Preussag AG a été forcé d'abandonner le projet, et toutes les données ont été transmises au GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research basé à Kiel. Le 4 juin 2010, une « joint-venture » entre Manafa International Trade Company of Saudi Arabia et Diamond Fields International Ltd. (DFI) a obtenu un permis d'exploitation pour une période de 30 ans de la part de la RSC recouvrant le gisement d'Atlantis II Deep. Le 28 novembre 2011, DFI publie un rapport technique répondant aux normes NI 43-101 estimant les ressources (ressources estimées, ou inferred resources) du gisement Atlantis II Deep à 604,21 Mt de sédiments hydrothermaux comprenant des teneurs moyennes en métaux de 2,03 % Zn, 0,46 % Cu, 41,14 g/t Ag et 2,69 % Mn. Au total, le gisement renfermerait 1,643 Mt de zinc, 0,368 Mt de cuivre, 3 350 t d'argent et 2,179 Mt de manganèse (DFI, 2011; McGarry and Langlands, 2011).

Estimation des ressources

A ce jour, plus de 600 forages ont été réalisés en mer Rouge, en particulier au niveau de la fosse Atlantis II Deep, un bassin d'environ 60 km² composé de sédiments hydrothermaux et de saumures chaudes. C'est le gisement hydrothermal sous-marin le plus étudié actuellement, puisque depuis la fin des années 1960, plus de 40 campagnes océaniques ont été menées en mer Rouge, dont plus de la moitié destinée au carottage et au dragage de la fosse Atlantis II Deep (Scholten et al, 2000). De nombreuses estimations des ressources ont été réalisées avant l'arrêt de l'exploration en mai 1984 par la Red Sea Commission (RSC).

En 1966, la campagne américaine à bord du *Challenger* a permis de collecter jusqu'à 8m de sédiments par carottier à piston ; 66 échantillons ont été analysés chimiquement. La première

estimation date de 1969 et se base sur 41 analyses de 7 carottes (McGarry and Langlands, 2011). La campagne à bord du W ando River a permis récolter 287 échantillons de type « channel » sur 28 stations dans la zone d'Atlantis II Deep. Les campagnes Valdivia ont permis de réviser en 1975 l'estimation des ressources en se basant sur plus de 2500 analyses issues de 136 stations. Entre 1977 et 1981, les campagnes Meseda ont permis de collecter 195 carottes supplémentaires spatialement homogènes sur la zone d'Atlantis II Deep. Jusqu'en 1984, plusieurs ré-estimations se sont basées sur les données préalablement collectées, pour aboutir à des modèles utilisant la méthode du krigeage (McGarry and Langlands, 2011).

Ce n'est qu'en 2011 que l'Institut pour l'Economie Mondiale de Kiel a publié une nouvelle estimation des ressources du gisement en ré-analysant 480 carottes de sédiments issues des campagnes Meseda, utilisant la triangulation Delauney et en modélisant par tranches de 1 m d'épaisseur sur son ensemble (Bertram et al, 2011). Seules les estimations de ressources se basant sur les travaux anciens, qui comprennent 628 carottes de sédiments hydrothermaux représentant une longueur totale d'environ 4 km, apparaissent comme robustes. L'estimation de Guney et coll. (1984) se base sur les analyses de 3,5 t de concentré brut séché et dessalé obtenu par flottation à bord du navire lors du pré-pilote réalisé par Preussag en 1979. La plus récente estimation du gisement Atlantis II Deep a été faite par DFI. Elle répond aux normes NI 43-101 et propose des ressources inférées basées sur 589 stations de carottage (Tableau 2-31).

Le Tableau 2-32 compare les estimations de 1984 et de 2011. Cette dernière estimation est plus aboutie dans le sens où elle comprend une modélisation de blocs plus fine (100 m² au lieu de 300 m²) avec de nouveaux variogrammes et se base sur la globalité du gisement.

Tableau 2-30 Historique des estimations de ressources du gisement Atlantis II Deep exprimé en métal contenu.
(modifié d'après McGarry et Langlands, 2011).

Année	1966	1969	1973	1975	1981
Rapport	Bischoff & Manheim	Preussag	Hackett & Bischoff	Ehrisman & Kron	Al Ukayli et al,
Méthode	Pondération volume	Pondération volume	Pondération volume	Pondération volume	Krigeage
Modèle	Global	By sub-basin	By sub-basin	By sub-basin	By sub-basin
Zn (10 ⁶ t)	2.9	2.1	3.22	2.4	1.6
Cu (10 ⁶ t)	1.06	0.5	0.81	0.5	0.36
Ag (t)	4500	2300	-	8600	3183
Mn (10 ⁶ t)	8.0	-	-	-	-
Pb (t)	80000	-	-	-	-
Co (t)	-	-	-	-	-
Cd (t)	-	6500	-	-	-
Au (t)	45	-	-	-	-
Carottes	7	28	28	136	628

Année	1984	1984	2011	2011	
Rapport	Guney et al,	Mustafa et al,	Bertram et al,	McGarry et Langlands	
Méthode	Krigeage	Krigeage	Delauney	Krigeage Ordinaire	
Modèle	By sub-basin	By sub-basin	By Slice	Global	
Zn (10 ⁶ t)	1.89	1.95	3.27	1.643	
Cu (10 ⁶ t)	0.425	0.425	0.74	0.368	
Ag (t)	3750	3625	6502	3350	
Mn (10 ⁶ t)	-	-	3.83	2.179	
Pb (t)	-	-	-	-	
Co (t)	5369	5230	-	-	
Cd (t)	-	-	-	-	
Au (t)	47	46	-	-	
Carottes	605	628	480	559	

Tableau 2-31 Nombre de stations de carottage dans la fosse Atlantis II Deep ayant servi à réaliser l'estimation des ressources de DFI selon la norme NI 43-101. (modifié d'après McGarry et Langlands, 2011).

Année	1969	1971	1975	1977	1979	1980	Total
Campagne	Wando River	Valdivia 1	Valdivia 3	Meseda 1	Meseda 2	Meseda 3	
Nombre de stations	23	22	73	121	51	299	589

Tableau 2-32 Comparaison des estimations de ressources historique et actuelle. (modifié d'après McGarry et Langlands, 2011)

		Tonnage des sédiments (Mt)	Tonnage du métal (kt)	Teneur volumique du métal	Teneur du métal	Différence de tonnage des métaux
Guney et al, 1984	Zinc	696.33	1890	3.41 kg/m ³	2.06 %	-
	Cuivre	696.33	425	0.77 kg/m ³	0.46 %	-
	Argent	696.33	3.75	6.77 g/m ³	40.95 g/t	-
DFI, 2011	Zinc	604.21	1643	3.47 kg/m ³	2.03 %	-13 %
	Cuivre	604.21	368	0.78 kg/m ³	0.46 %	-13 %
	Argent	604.21	3.35	7.07 g/m ³	41.14 g/t	-11 %
	Manganèse	604.21	2179	4.60 kg/m ³	2.69%	-

2.6. Conclusion

Les nodules polymétalliques peuvent être considérés comme des réserves stratégiques pour des métaux de base et pour certains métaux rares. Leur intérêt minier a été souligné dès les années 1950 du fait de teneurs en nickel égales ou supérieures à celles des gisements de latérites, de teneurs en cuivre supérieures à celles des grands gisements de porphyres cuprifères terrestres (0,5 % de cuivre) et de teneurs en cobalt similaires à celles des gisements terrestres. L'abondance des nodules sur le fond et leur richesse en métaux varie beaucoup. Dès 1973, des champs à forte densité de nodules ont été trouvés le long d'une ceinture Est-Ouest dans le Pacifique Nord (zone dite « Clarion-Clipperton »), qui fait l'objet de demande de nombreux permis miniers. Les nodules forment des boules sombres de 5 à 10 cm de diamètre contenant environ 40 % d'eau. Les métaux de base contenus dans les nodules sont le fer (7 à 23 %), le manganèse (7 à 26 %), le cuivre (0,29 à 1,02 %), le nickel (0,26 à 1,28 %), et le cobalt (0,24 à 0,8 %). Ce sont ces métaux qui ont été considérés dans les estimations économiques. En tant que ressources en cuivre, les nodules de la zone Clarion-Clipperton représentent environ 10 % des réserves continentales et ont fait l'objet de nombreuses investigations dans les années 1970 et 1980. Les nodules peuvent être enrichis en éléments rares comme le cérium (0,1 %). D'autres éléments tels que molybdène, tellure, vanadium, zirconium et thallium peuvent être concentrés à plusieurs centaines de grammes par tonne. Ces investigations n'ont pas abouti à leur exploitation pour diverses raisons : profondeur d'eau supérieure à 4 000 m, difficile estimation de la ressource, coût des traitements métallurgiques, problèmes politiques liés au droit de la mer et fluctuation du cours des métaux.

Les encroûtements hydrogénétiqes d'oxydes ferro-manganésifères ont été répertoriés dans tous les océans dans les environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant des millions d'années. En général, ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Ils varient de quelques centimètres à 25 centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs km². Ils se déposent généralement sur des substratums indurés (volcans, anciens atolls immergés) à des profondeurs allant de 400 à 4 000 m. Les premières investigations systématiques ont démarré en 1981 dans l'océan Pacifique central. De nombreux pays se sont intéressés depuis vingt ans à ces ressources potentielles : Japon, USA, Russie, Allemagne, France, Corée, Royaume-Uni, Brésil, Chine. Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont enrichis en cobalt et en platine. Ils sont tous situés dans le Pacifique et notamment dans la ZEE française. Ces derniers apparaissent sur les bords externes des plateaux sous-marins (ex : archipel des Tuamotu) et sur les volcans, à des profondeurs comprises entre 800 et 2 500 m. Ces encroûtements pourraient constituer le premier minerai de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations. Le platine pourrait s'avérer un intéressant sous-produit. Plusieurs éléments mineurs tels que terres rares (yttrium, lanthane, cérium), titane, thallium, zirconium, tellure et molybdène peuvent être trouvés à des concentrations intéressantes.

Les sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. On les trouve par conséquent sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique que constituent les 60 000 km de dorsales océaniques. Cette activité hydrothermale est un important mécanisme de concentration des métaux présents dans la croûte, dissous par la circulation des fluides et précipités lors du refroidissement rapide de ce fluide au contact de l'eau de mer, à sa résurgence dans l'océan. Selon leur localisation, ils présentent une grande diversité de caractéristiques physiques et

géologiques et de types de métaux valorisables. Ces différences sont contrôlées par des caractéristiques physiques (température, profondeur...) et par la nature des roches traversées par les circulations hydrothermales (roches volcaniques variées, roches du manteau, sédiments). Les sulfures hydrothermaux se caractérisent par de forts enrichissements en métaux de base par rapport aux encroûtements et aux nodules. Les minéralisations hydrothermales sous-marines ont été étudiées par submersible, dragage ou forage. Ces deux techniques ne permettent d'échantillonner que la surface. Les zonations chimiques et minérales selon la verticale doivent être étudiées par forage qui ont été réalisés sur quelques sites avec des objectifs scientifiques ou industriels. Les échantillons montrent que la surface de la plupart des dépôts est significativement enrichie en cuivre et zinc dont le total dépasse 10 % dans plus de 65 % des sites (valeurs basées sur l'étude de 75 sites et de 3 300 échantillons). Les premiers fumeurs noirs (350°C) ont été découverts sur la dorsale du Pacifique Est en 1978 à près de 3 000 m de profondeur. Après trente ans d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux démontre l'importance des processus d'extraction, de transport et de concentration des métaux associés au volcanisme sous-marin. Les ressources minérales de type sulfures massifs représentent les ressources les plus prometteuses en milieu marin. L'exploitation des sulfures hydrothermaux semble désormais possible considérant un certain nombre de critères tels que l'enrichissement en métaux précieux (or et argent) et métaux de base (cuivre, zinc, plomb), la localisation des gisements proche des côtes, en particulier dans les ZEE des états côtiers, la profondeur d'eau relativement faible, la présence sites inactifs pouvant être exploités dans une zone relativement restreinte.

L'acquisition des connaissances scientifiques dans ces environnements a été fortement liée aux progrès technologiques de prélèvement, d'observation et d'analyse qui n'ont cessé d'évoluer au cours de ces dernières années. Même s'il est encore nécessaire d'effectuer des opérations répétées dans le temps, il est aujourd'hui possible d'implémenter des systèmes d'observation continue permanents, que ce soit dans la colonne d'eau, sur le plancher océanique ou dans le compartiment de subsurface. Il est également possible, grâce à une approche géophysique 3D à haute résolution, de caractériser le compartiment de subsurface qui permettra à terme d'établir un lien fort entre contexte géologique, circulation de fluides et formation de dépôts métallifères. Les méthodes d'acquisition de bathymétrie fond de mer haute résolution permettent maintenant une cartographie des fonds marins à l'échelle de la faille et de la coulée de lave, équivalente à celle réalisée à terre ; l'imagerie haute résolution des structures en profondeur, nécessaire à l'étude de la circulation des fluides, en est encore à ses débuts avec des développements instrumentaux novateurs en cours. Ces outils, déployés de façon répétée ou continue sur des sites choisis, nous permettront d'aborder des questions encore ouvertes mais essentielles, comme la profondeur de pénétration des fluides dans la lithosphère océanique, les modes d'interaction entre fluides et types de substrat, la géométrie de la circulation, le lien entre circulation des fluides en profondeur et la biosphère cachée, les variations temporelles de la cyclicité magmato-tectonique, les relations entre développement de failles et magmatisme. Ces recherches sont fondamentales pour la compréhension des échanges entre l'écorce terrestre et l'océan, de l'origine de la biosphère dans ces milieux extrêmes, des sources d'énergie et des ressources minérales autour de ces sites d'interactions dans l'océan profond. Ce point sera abordé dans le chapitre 3.

Acronymes

AABW	Eau profonde de l'Antarctique
AFERNOD	Association Française pour l'Étude et la Recherche des NODules
AIFM	Autorité Internationale des Fonds Marins (équivalent à ISA et ISBA)
AMR	Arbeitsgemeinschaft Meerestechnisch Gewinnbare Rohstoffe (consortium allemand)
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ANZIC	Australian and New Zealand Integrated Ocean Drilling Program Consortium
AOT	Autorisation d'Occupation Temporaire
APP	Autorisation de Prospection Préalable
ATEN	Atelier Technique des Espaces Naturels
AusIMM	Australasian Institute of Mining and Metallurgy
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (service des géosciences allemand)
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CCAMLR	Convention sur la conservation de la faune et la flore marine de l'Antarctique
CCD	Carbonate Compensation Depth
CCFZ	Zone de fracture de Clarion et de Clipperton
CDB	Convention sur la Diversité Biologique
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CeDAMar	Census of the Diversity of Abyssal Marine Life
CFD	Chantiers de France Dunkerque
CIM	Canadian Institute of Mining
CLB	Continuous Line Bucket
CNEXO	Centre National pour l'EXploitation des Océans
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNUDM	Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer
COM	Collectivités d'Outre-Mer
COMRA	China Ocean Mineral Resources Research and Development Association
COP	Conference of the Parties
CRESCO	Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes
CRIRSCO	Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards
DOMCO	Deep Ocean Mining Co. (Japon)
DORD	Deep Ocean Research Development (Japon)
DSDP	Deep Sea Drilling Project
DZMB	Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung
EBSA	Ecologically or Biologically Significant Areas
ECORD	European Consortium for Ocean Research Driling
ED1	Engin double
EMB	East Manus Basin
EPOC	Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux

EPR	Est Pacific Rise (Dorsale Est Pacifique)
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
GEMONOD	Groupement pour la mise au point des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules polymétalliques
GIS	Geographical Information System
GSR	G-TEC Sea Minerals Resources NV (Belgique)
H.M.S.	Her Majesty's Ship
INCO	International Nickel Corporation
ISA	International Seabed Authority
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IMMS	International Marine Minerals Society
IODP	Integrated Ocean Drilling Program
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
JORC	Joint Ore Reserves Committee Code
KADOM	Korean Association of Deep-Ocean Mineral Development
KCON	Kennecott
KIGAM	Korea Institute of Geology, Mining and Material (Bureau des Recherches Géologiques coréen)
KMPL	Korea Mining Promotion Corp. Ltd
KORDI	Korean Ocean Research and Development Institute
LMC	Lockheed Martin Corporation
LMUK	Lockheed Martin UK Holdings Ltd.
MAR	Mid-Atlantic Ridge (Ride Médio-atlantique)
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie
MITI	Ministère de l'industrie et du commerce extérieur (Japon)
MNHN	Muséum National d'Histoire Naturelle
N.O.	Navire océanographique
NIXO	Nickel/CNEXO
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Agency
NORIA	Zone à nodules riches et abondants
OBIS	Ocean Biogeographic Information System
ODP	Ocean Drilling Project
OMA	Ocean Mining Associates (USA)
OMCO	Ocean Minerals Company (USA)
OMI	Ocean Management Inc. (USA)
OMZ	Oxygen Minimum Zone
ONU	Organisation des Nations Unies
OSPAR	Oslo-Paris (Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est)
PDW	Eau profonde du Pacifique
PGE	Platinum Group Elements
RAIE	Remorque Abyssal d'Instruments d'Exploration
ROV	Remote Operated Vehicule
SAMREC	South African Mineral Resource Committee
SAR	Sonar acoustique remorqué

SEG	Society of Economic Geologists
SLN	Société Le Nickel
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIC	Site d'Importance Communautaire
SMS	Seafloor Massive Sulfides
SOPAC	Secretariat Of the Pacific Community
SPREP	Convention pour la protection des ressources naturelles et de l'environnement dans la région du Pacifique Sud
TAG	Trans-Atlantic Geotraverse
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
USGS	US Geological Survey
VMEs	Vulnerable Marine Ecosystems
ZEE	Zone Economique Exclusive
ZPS	Zone de Protection Spéciale
ZSC	Zone Spéciale de Conservation

Bibliographie

- Abouchami, W., S. J. G. Galer and A. Koschinsky (1999). "Pb and Nd isotopes in NE Atlantic Fe-Mn crusts: Proxies for trace metal paleosources and paleocean circulation." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 63(10): 1489-1505.
- Adams, D. K., D. J. McGillicuddy, Jr., L. Zamudio, A. M. Thurnherr, X. Liang, O. Rouxel, C. R. German and L. S. Mullineaux (2011). "Surface-Generated Mesoscale Eddies Transport Deep-Sea Products from Hydrothermal Vents." *Science* 332(6029): 580-583.
- Alt, J. C. (1995). *Subseafloor Processes in Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Systems. Seafloor hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. S. E. Humphris, R. A. Zierenberg, L. S. Mullineaux and R. E. Thomson, American Geophysical Union. *Geophysical Monograph* 91: 85-114.
- Alt, J. C., P. Lonsdale, R. Haymon and K. Muehlenbachs (1987). "Hydrothermal sulfide and oxide deposits on seamounts near 21°N, East Pacific Rise." *Geological Society of America Bulletin* 98(2): 157-168.
- Alt, J. C., T. F. Anderson and L. Bonnell (1989). "The geochemistry of sulfur in a 1.3 km section of hydrothermally altered oceanic-crust, DSDP-Hole-504B." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 53(5): 1011-1023.
- Amosse, J. and R. Le Suave (1989). "Geochemical investigation of Pt, Pd, Rh, Ru and Au in cobaltiferous encrustations from the Tuamotu plateau (French Polynesia)." *Oceanologica Acta* 10: 261-268.
- Anbar, A. D. and O. Rouxel (2007). "Metal stable isotopes in paleoceanography." *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35: 717-746.
- Anderson, R. N. and E. E. Davis (1973). A topographic interpretation of the Mathematician Ridge, Clipperton Ridge and East Pacific Rise. *Nature*. 241: 191-193.
- Andrews, J., G. Friedrich, G. Pautot, W. Pluger, V. Renard, M. Melguen, D. Cronan, J. Craig, M. Hoffert, P. Stoffers, S. Shearme, T. Thijssen, G. Glasby, N. Lenotre and P. Saget (1983). "The Hawaii Tahiti Transect - The oceanographic environment of manganese-nodule deposits in the Central Pacific." *Marine Geology* 54(1-2): 109-130.
- Anschutz, P. and G. Blanc (1995a). "Chemical mass balances in metalliferous deposits from the Atlantis-II-Deep, Red-Sea." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 59(20): 4205-4218.
- Anschutz, P. and G. Blanc (1995b). "Diagenetic evolution of the dop facies from the Atlantis-II-Deep (Red-Sea) - Evidence of early hydrothermal activity." *Oceanologica Acta* 18(1): 105-112.
- Anschutz, P., G. Blanc and P. Stille (1995). "Origin of fluids and the evolution of the Atlantis-II Deep hydrothermal system, Red-Sea - Strontium isotope study." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 59(23): 4799-4808.
- Anufriev, G. S., Boltenko B.S., Volkov I.I. and Kapitonov I.N. (1996). "Growth rate estimates for oceanic ferromanganese nodules based on helium and neon stable isotopes." *Lithology And Mineral Resources* 31(1): 1-8.
- Arrhenius, G., Mero J.L. and Korkisch J. (1964). "Origin of oceanic manganese minerals." *Science* 144(3615): 170-172.
- Auzende, J.-M., J. Hashimoto, A. Fiala-Médioni, S. Ohta and B. l'équipe (1997). "Etude géologique et biologique in situ de deux zones hydrothermales du bassin de Manus

(Papouasie Nouvelle-Guinée)." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série II Fascicule A Sciences de la Terre et des Planètes* 325(8): 585-591.

Auzende, J.-M., J. Ishibashi, Y. Beaudoin, J.-L. Charlou, J. Delteil, J.-P. Donval, Y. Fouquet, J.-P. Gouillou, B. Ildefonse and H. Kimura (2000). "The eastern and western tips of Manus Basin (Papua, New Guinea) explored by submersible; MANAUTE cruise." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science* 331(2): 119-126.

Baker, E. T. and G. J. Massoth (1986). "Hydrothermal plume measurements - A regional perspective." *Science* 234(4779): 980-982.

Baker, E. T., G. J. Massoth, K.-i. Nakamura, R. W. Embley, C. E. J. de Ronde and R. J. Arculus (2005). "Hydrothermal activity on near-arc sections of back-arc ridges: Results from the Mariana Trough and Lau Basin." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6(9): Q09001.

Baker, E. T., G. J. Massoth, R. W. Collier, J. H. Trefry, D. Kadko, T. A. Nelsen, P. A. Rona and J. E. Lupton (1987). "Evidence for high-temperature hydrothermal venting on the Gorda Ridge, northeast Pacific Ocean." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 34(8): 1461-1476.

Baker, E. T., H. N. Edmonds, P. J. Michael, W. Bach, H. J. B. Dick, J. E. Snow, S. L. Walker, N. R. Banerjee and C. H. Langmuir (2004). "Hydrothermal venting in magma deserts: The ultraslow-spreading Gakkel and Southwest Indian Ridges." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5.

Baker, E. T., J. W. Lavelle and G. J. Massoth (1985). "Hydrothermal particle plumes over the southern Juan-De-Fuca Ridge." *Nature* 316(6026): 342-344.

Banerjee, R. and R. Mukhopadhyay (1991). "Nature and distribution of manganese nodules from three sediment domains of the Central Indian Basin, Indian Ocean." *Geo-Marine Letters* 11(1): 39-43.

Barbeau, K., E. Rue, K. Bruland and A. Butler (2001). "Photochemical cycling of iron in the surface ocean mediated by microbial iron (III)-binding ligands." *Nature* 413(6854): 409-413.

Barnes, S. S. (1967). "Minor element composition of ferromanganese nodules." *Science* 157(3784): 63-65.

Baross, J. A., M. D. Lilley and L. I. Gordon (1982). "Is the CH₄, H₂ and CO venting from submarine hydrothermal systems produced by thermophilic bacteria." *Nature* 298(5872): 366-368.

Bekker, A., B. Krapez, J. F. Slack, N. Planavsky, A. Hofmann, K. O. Konhauser and O. J. Rouxel (2012). "Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes-A reply." *Economic Geology* 107(2): 379-380.

Bemis, K. G., R. P. Von Herzen and M. J. Mottl (1993). "Geothermal heat-flux from hydrothermal plumes on the Juan-De-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 98(B4): 6351-6365.

Bendel, V., Y. Fouquet, J.-M. Auzende, Y. Lagabriele, D. Grimaud and T. Urabe (1993). "The White Lady hydrothermal field, North Fiji back-arc basin, southwest Pacific." *Economic Geology* 88(8): 2237-2245.

Bender, M. L., Ku T.L. and Broecker W.S. (1966). Manganese nodules: their evolution. *Science*. 151: 325-328.

- Bennett, S. A., E. P. Achterberg, D. P. Connelly, P. J. Statham, G. R. Fones and C. R. German (2008). "The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes." *Earth Planet. Sci. Lett.* 270: 157-167.
- Bennett, S. A., P. J. Statham, D. R. H. Green, N. Le Bris, J. M. McDermott, F. Prado, O. J. Rouxel, K. Von Damm and C. R. German (2011a). "Dissolved and particulate organic carbon in hydrothermal plumes from the East Pacific Rise, 9°50' N." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 58(9): 922-931.
- Bennett, S. A., R. L. Hansman, A. L. Sessions, K. Nakamura and K. J. Edwards (2011b). "Tracing iron-fueled microbial carbon production within the hydrothermal plume at the Loihi seamount." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 5526-5539.
- Bertram, C., A. Krätschell, K. O'Brien, W. Brückmann, A. Proelss and K. Rehdanz (2011). "Metalliferous sediments in the Atlantis II Deep—Assessing the geological and economic resource potential and legal constraints." *Resources Policy* 36(4): 315-329.
- Binns, R. A. and S. D. Scott (1993). "Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea." *Economic Geology* 88(8): 2226-2236.
- Binns, R., S. D. Scott, J. Gemmill, K. Crook and S. Party (1997). "The SuSu Knolls hydrothermal field, eastern Manus Basin, Papua New Guinea." *Eos Trans. AGU* 78: 46.
- Bischoff, J. L. (1980). "Geothermal System at 21°N, East Pacific Rise - Physical Limits on Geothermal Fluid and Role of Adiabatic Expansion." *Science* 207(4438): 1465-1469.
- Bischoff, J. L. and R. J. Rosenbauer (1977). "Recent metalliferous sediment in North Pacific manganese nodule area." *Earth and Planetary Science Letters* 33(3): 379-388.
- Blanc, G. and P. Anschutz (1995). "New stratification in the hydrothermal brine system of the Atlantis-II Deep, Red-Sea." *Geology* 23(6): 543-546.
- Blount, C.W. and F.W. Dickson. (1969). "The solubility of anhydrite (CaSO₄) in NaCl-H₂O from 100 to 450°C and 1 to 100 bars." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33: 227-245.
- Bollhofer, A., N. Frank, S. Rohloff, A. Mangini and J. C. Scholten (1999). "A record of changing redox conditions in the northern Manus Basin during the Late Quaternary deduced from Mn/Fe and growth rate variations in two diagenetic manganese nodules." *Earth and Planetary Science Letters* 170(4): 403-415.
- Bolton, B., R. Both, N. Exon, T. Hamilton, J. Ostwald and J. Smith (1988). "Geochemistry and mineralogy of seafloor hydrothermal and hydrogenetic Mn oxide deposits from the Manus Basin and Bismarck Archipelago region of the southwest Pacific Ocean." *Marine geology* 85(1): 65-87.
- Bonatti, E. (1968). "Fissure basalts and ocean-floor spreading on the East Pacific Rise." *Science* 161(3844): 886-888.
- Bonatti, E. and O. Joensuu (1966). "Deep-sea iron deposit from the South Pacific." *Science* 154(3749): 643-645.
- Bostrom, K. (1970a). "Deposition of Manganese Rich Sediments during Glacial Periods." *Nature* 226(5246): 629-630.
- Boström, K. (1970b). "Submarine volcanism as a source for iron." *Earth and planetary science letters* 9(4): 348-354.

- Bostrom, K. and M. Peterson (1966). "Precipitates from hydrothermal exhalations on the East Pacific Rise." *Economic Geology* 61(7): 1258-1265.
- Bougault, H., M. Aballea, J. Radford-Knoery, J. L. Charlou, P. J. Baptiste, P. Appriou, H. D. Needham, C. German and M. Miranda (1998). "FAMOUS and AMAR segments on the Mid-Atlantic Ridge: ubiquitous hydrothermal Mn, CH₄, delta He-3 signals along the rift valley walls and rift offsets." *Earth and Planetary Science Letters* 161(1-4): 1-17.
- Bruland, K.W., J.R. Donat and D.A. Hutchins. (1991). "Interactive influences of bioreactive trace metals on biological production in oceanic waters". *Limnol. Oceanogr.*, 36: 1555-1577.
- Burckle, L. H. and T. Saito (1966). "An eocene dredge haul from the Tuamotu Ridge." *Deep Sea Research* 13(6): 1207-1208.
- Burnett, W. (1990). "Phosphorite growth and sediment dynamics in the modern Peru shelf upwelling system." *Phosphate deposits of the world* 3: 62-72.
- Burnett, W. C. and D. Z. Piper (1977). "Rapidly-formed ferromanganese deposit from Eastern Pacific Hess Deep." *Nature* 265: 596-600.
- Burns, R. G. (1965). "Formation of Cobalt (III) in the Amorphous FeOOH.nH₂O Phase of Manganese Nodules." *Nature* 205(4975): 999-999.
- Burns, R. G. and V. Mee Burns (1975). "Mechanism for nucleation and growth of manganese nodules." *Nature* 255(5504): 130-131.
- Butler, I., A. Fallick and R. Nesbitt (1998). "Mineralogy, sulphur isotope geochemistry and the development of sulphide structures at the Broken Spur hydrothermal vent site, 29° 10'N, Mid-Atlantic Ridge." *Journal of the Geological Society* 155(5): 773-785.
- Campbell, A. C., M. R. Palmer, G. P. Klinkhammer, T. S. Bowers, J. M. Edmond, J. R. Lawrence, J. F. Casey, G. Thompson, S. Humphris, P. Rona and J. A. Karson (1988). "Chemistry of hot springs on the Mid-Atlantic Ridge." *Nature* 335(6190): 514-519.
- Cannat, M., C. Mevel, M. Maia, C. Deplus, C. Durand, P. Gente, P. Agrinier, A. Belarouchi, G. Dubuisson, E. Humler and J. Reynolds (1995). "Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22° -24°N)." *Geology* 23(1): 49-52.
- Cannat, M., P. Sarradin, J. Blandin, J. Escartin, A. Colaco, M.-D. S. Party, A. Michael, A. Virginie, B. Christian and B. Valérie (2011). MoMar-Demo at Lucky Strike. A near-real time multidisciplinary observatory of hydrothermal processes and ecosystems at the Mid-Atlantic Ridge. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Cathles, L. M. (2011). "What processes at mid-ocean ridges tell us about volcanogenic massive sulfide deposits." *Mineralium Deposita* 46(5-6): 639-657.
- Chabaux, F., A. S. Cohen, R. K. Onions and J. R. Hein (1995). "U-238 U-234-Th-230 chronometry of Fe-Mn crusts - Growth-processes and recovery of thorium isotopic-ratios of seawater." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 59(3): 633-638.
- Chakraborty, B. and Kodagali. V.N. (2004). "Characterizing Indian Ocean manganese nodule-bearing seafloor using multi-beam angular backscatter." *Geo-Marine Letters* 24(1): 8-13.
- Charlou, J. L., J. P. Donval, C. Konn, H. Ondréas, Y. Fouquet, P. Jean-Baptiste and E. Fourré (2010). "High production and fluxes of H₂ and CH₄ and evidence of a biotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge." *Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges*: 265-296.

- Charlou, J. L., J. P. Donval, E. Douville, P. Jean-Baptiste, J. Radford-Knoery, Y. Fouquet, A. Dapoigny and M. Stievenard (2000). "Compared geochemical signatures and the evolution of Menez Gwen (37°50'N) and Lucky Strike (37°17'N) hydrothermal fluids, south of the Azores Triple Junction on the Mid-Atlantic Ridge." *Chemical Geology* 171: 49-75.
- Charlou, J. L., J. P. Donval, Y. Fouquet, P. Jean-Baptiste and N. Holm (2002). "Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36° 14 ' N, MAR)." *Chemical Geology* 191(4): 345-359.
- Charlou, J. L., P. Rona and H. Bougault (1987). "Methane anomalies over TAG hydrothermal field on Mid-Atlantic ridge." *Journal of Marine Research* 45(2): 461-472.
- Charlou, J. L., Y. Fouquet, H. Bougault, J. P. Donval, J. Etoubleau, P. Jean-Baptiste, A. Dapoigny, P. Appriou and P. A. Rona (1998). "Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15° 20 ' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 62(13): 2323-2333.
- Charlou, J. L., Y. Fouquet, J. P. Donval, J. M. Auzende, P. JeanBaptiste, M. Stievenard and S. Michel (1996). "Mineral and gas chemistry of hydrothermal fluids on an ultrafast spreading ridge: East Pacific Rise, 17° to 19°S (Naudur cruise, 1993) phase separation processes controlled by volcanic and tectonic activity." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 101(B7): 15899-15919.
- Christensen, J. N., A. N. Halliday, L. V. Godfrey, J. R. Hein and D. K. Rea (1997). "Climate and ocean dynamics and the lead isotopic records in Pacific ferromanganese crusts." *Science* 277(5328): 913-918.
- Chu, N. C., C. M. Johnson, B. L. Beard, C. R. German, R. W. Nesbitt, M. Frank, M. Bohn, P. W. Kubik, A. Usui and I. Graham (2006). "Evidence for hydrothermal venting in Fe isotope compositions of the deep Pacific Ocean through time." *Earth and Planetary Science Letters* 245(1-2): 202-217.
- Clark, A. L., J. A. Lum, C. Li, W. Icaey, C. Morgan, Y. Igarashi and S. P. A. G. Commission (1995). "Economic and development potential of manganese nodules within the Cook Islands exclusive economic zone (EEZ)." Honolulu: East-West Center.
- Clauer, N., P. Stille, C. Bonnotcourtois and W. S. Moore (1984). "Nd-Sr isotopic and REE constraints on the genesis of hydrothermal manganese crusts in the Galápagos." *Nature* 311(5988): 743-745.
- Coale, K. H., K. S. Johnson, S. E. Fitzwater, R. M. Gordon and 15 others (1996). "A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean." *Nature* 383: 495-501.
- Cochonat, P., R. Lesuave, C. Charles, B. Greger, M. Hoffert, J. P. Lenoble, J. Meunier and G. Pautot (1992). "First in situ studies of nodule distribution and geotechnical measurements of associated deep-sea clay (Northeastern Pacific-Ocean)." *Marine Geology* 103(1-3): 373-380.
- Convention_on_Biological_Diversity (2009). "Azores scientific criteria and guidance for identifying ecologically or biologically significant marine areas and designing representative networks of marine protected areas in open ocean waters and deep sea habitats." Montréal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity: 12.
- Converse, D. R., H. D. Holland and J. M. Edmond (1984). "Flow-rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N) - Implications for the heat-budget and the formation of massive sulfide deposits." *Earth and Planetary Science Letters* 69(1): 159-175.

- Cook, H. E. (1975). "North American stratigraphic principles as applied to deep sea sediments." *AAPG Bulletin*: 817-837.
- Corliss, J. B., J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R. P. V. Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge, K. Crane and T. H. Vanandel (1979). "Submarine thermal springs on the Galápagos Rift." *Science* 203(4385): 1073-1083.
- Cowen, J. P. and M. W. Silver (1984). "The Association of Iron and Manganese with Bacteria on Marine Macroparticulate Material." *Science* 224(4655): 1340-1342.
- Cowen, J. P. and Y. H. Li (1991). "The influence of a changing bacterial community on trace-metal scavenging in a deep-sea particle plume." *Journal of Marine Research* 49(3): 517-542.
- Cowen, J. P., G. J. Massoth and E. T. Baker (1986). "Bacterial scavenging of Mn and Fe in a mid-field to far-field hydrothermal particle plume." *Nature* 322(6075): 169-171.
- Cowen, J. P., G. J. Massoth and R. A. Feely (1990). "Scavenging rates of dissolved manganese in a hydrothermal vent plume." *Deep-Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers* 37(10): 1619-1637.
- Cowen, J. P., R. Sackelford, D. McGee, P. Lam, E. T. Baker and E. Olson (1999). "Microbial biomass in the hydrothermal plumes associated with the 1998 axial volcano eruption." *Geophysical Research Letters* 26(24): 3637-3640.
- Cowen, J. P., X. Y. Wen and B. N. Popp (2002). "Methane in aging hydrothermal plumes." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 66(20): 3563-3571.
- Craddock, P. R. and W. Bach (2010). "Insights to magmatic-hydrothermal processes in the Manus back-arc basin as recorded by anhydrite." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 74(19): 5514-5536.
- Craddock, P. R., W. Bach, J. S. Seewald, O. J. Rouxel, E. Reeves and M. K. Tivey (2010). "Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(19): 5494-5513.
- Cronan, D. (1972). "Composition of Atlantic manganese nodules." *Nature* 235(61): 171-172.
- Cronan, D. (1985). "Marine mineral resources." *Geology Today* 1(1): 15-19.
- Cronan, D. and D. E. Garrett (1973). "Distribution of elements in metalliferous Pacific sediments collected during the Deep Sea Drilling Project." *Nature* 242(119): 88-89.
- Cronan, D. S. (1976). "Implications of metal dispersion from submarine hydrothermal systems for mineral exploration on mid-ocean ridges and in island arcs." *Nature* 262(5569): 567-569.
- Cronan, D. S. (1999). *Handbook of marine mineral deposits*, CRC press.
- Cronan, D. S. (2006). "Processes in the formation of central Pacific manganese nodule deposits". *Journal of marine science and environment*: 41-48.
- Cronan, D. S., T. H. Van Andel, G. R. Heath, M. G. Dinkelman, R. H. Bennett, D. Bukry, S. Charleston, A. Kaneps, K. S. Rodolfo and R. S. Yeats (1972). "Iron-rich Basal sediments from the eastern equatorial Pacific: leg 16, deep sea drilling project." *Science (New York, N.Y.)* 175(4017): 61-63.
- Cronan, D., G. Glasby, S. Moorby, J. Thomson, K. Knedler and J. McDougall (1982). "A submarine hydrothermal manganese deposit from the south-west Pacific island arc." *Nature* 298(5873): 456-458.

- Cruikshank, M. J. (1988). "Marine sand and gravel mining and processing technologies." *Marine Mining* 7: 149–163.
- Cruse, A. M. and J. S. Seewald (2006). "Geochemistry of low-molecular weight hydrocarbons in hydrothermal fluids from Middle Valley, northern Juan de Fuca Ridge." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 70(8): 2073-2092.
- Cullen, J. T., T. W. Lane, F. M. Morel and R. M. Sherrell (1999). "Modulation of cadmium uptake in phytoplankton by seawater CO₂ concentration." *Nature* 402(6758): 165-167.
- Davis, A. S. and D. A. Clague (1998). "Changes in the hydrothermal system at Loihi Seamount after the formation of Pele's Pit in 1996." *Geology* 26: 399-402.
- De Angelis, M. A., Lilley, M.D., Baross, J.A., (1993). "Methane oxidation in deep-sea hydrothermal plumes of the endeavour segment of the Juan de Fuca Ridge." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 40: 1169–1186.
- de Ronde, C. E., M. Hannington, P. Stoffers, I. Wright, R. Ditchburn, A. Reyes, E. Baker, G. Massoth, J. Lupton and S. Walker (2005). "Evolution of a submarine magmatic-hydrothermal system: Brothers volcano, southern Kermadec arc, New Zealand." *Economic Geology* 100(6): 1097-1133.
- de Villiers, S. and B. K. Nelson (1999). "Detection of low-temperature hydrothermal fluxes by seawater Mg and Ca anomalies." *Science* 285(5428): 721-723.
- Decarlo, E. H., G. M. McMurtry and H. W. Yeh (1983). "Geochemistry of hydrothermal deposits from Loihi submarine volcano, Hawaii." *Earth and Planetary Science Letters* 66(1-3): 438-449.
- Dekov, V. and O. Rouxel (2012). Cu- and Zn-isotope systematics of seafloor hydrothermal vent fluids from a back-arc setting (Manus Basin). EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Delaney, J. R., D. S. Kelley, M. D. Lilley, D. A. Butterfield, J. A. Baross, W. S. D. Wilcock, R. W. Embley and M. Summit (1998). "The quantum event of oceanic crustal accretion: Impacts of diking at mid-ocean ridges." *Science* 281(5374): 222-230.
- Detrick, R., J. Honnorez, A. Adamson, G. Brass, K. Gillis, S. Humphris, C. Mevel, P. Meyer, N. Petersen and M. Rautenschlein (1986). "Drilling the Snake Pit hydrothermal sulfide deposit on the Mid-Atlantic Ridge, lat 23/sup 0/22'N." *Geology*; (United States) 14(12).
- DFI, 2011. Updated NI 43-101 Resource Estimate for Atlantis II Deposit to Include Manganese Values. Disponible sur : <http://www.diamondfields.com/s/NewsReleases.asp>.
- Dick, G. J., B. G. Clement, S. M. Webb, F. J. Fodrie, J. R. Bargar and B. M. Tebo (2009). "Enzymatic microbial Mn(II) oxidation and Mn biooxide production in the Guaymas Basin deep-sea hydrothermal plume." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 73(21): 6517-6530.
- Dick, G. J., K. Anantharaman, B. J. Baker, M. Li, D. C. Reed and C. S. Sheik (2013). "The microbiology of deep-sea hydrothermal vent plumes: ecological and biogeographic linkages to seafloor and water column habitats." *Frontiers in Microbiology* 4.
- Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations (2013a). "Législation comparée. Note sur l'exploration et l'exploitation pétrolières en mer." LC 230: 83.
- Direction de l'Initiative Parlementaire et des Délégations (2013b). "Législation comparée. Note sur les ressources minérales marines profondes : nodules polymétalliques, encroûtements et sulfures hydrothermaux." LC 234: 45.

- Douville, E., J.-L. Charlou, J.-P. Donval, D. Hureau and P. Appriou (1999). "As and Sb behaviour in fluids from various deep-sea hydrothermal systems." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science* 328(2): 97-104.
- Du Castel, V. H. M. U. d. B. o. (1985). Etablissement d'une carte géologique au 1/20.000 d'un domaine océanique profond dans une zone riche en nodules polymétalliques du Pacifique Nord (zone Clarion-Clipperton), [s.n.].
- Duncan, R. A. and I. McDougall (1974). "Migration of volcanism with time in the Marquesas Islands, French Polynesia." *Earth and Planetary Science Letters* 21(4): 414-420.
- Duncan, R. A. and I. McDougall (1976). "Linear volcanism in French Polynesia." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1(3): 197-227.
- Dupont, C. L., K. N. Buck, B. Palenik and K. Barbeau (2010). "Nickel utilization in phytoplankton assemblages from contrasting oceanic regimes." *Deep-Sea Research I* 57: 553-566.
- Dymond, J. (1975). "K-Ar ages of Tahiti and Moorea, Society Islands, and implications for the hot-spot model." *Geology* 3(5): 236-240.
- Dymond, J. and S. Roth (1988). "Plume dispersed hydrothermal particles - A time-series record of settling flux from the Endeavour ridge using moored sensors." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 52(10): 2525-2536.
- Edmond, J. M. (1981). "Hydrothermal activity at mid-ocean ridge axes." *Nature* 290(5802): 87-88.
- Edmond, J. M., K. L. Von Damm, R. E. McDuff and C. I. Measures (1982). "Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal." *Nature* 297(5863): 187-191.
- Edmond, J. M., R. McDuff, L. Chan, R. Collier, B. Grant, L. Gordon and J. Corliss (1979). "Ridge crest hydrothermal activity and the balances of the major and minor elements in the ocean: The Galapagos data." *Earth and Planetary Science Letters* 46(1): 1-18.
- Edmond, J., A. Campbell, M. Palmer, G. Klinkhammer, C. German, H. Edmonds, H. Elderfield, G. Thompson and P. Rona (1995). "Time series studies of vent fluids from the TAG and MARK sites (1986, 1990) Mid-Atlantic Ridge: a new solution chemistry model and a mechanism for Cu/Zn zonation in massive sulphide orebodies." Geological Society, London, Special Publications 87(1): 77-86.
- Edmonds, H. N., P. J. Michael, E. T. Baker, D. P. Connelly, J. E. Snow, C. H. Langmuir, H. J. B. Dick, R. Muehe, C. R. German and D. W. Graham (2003). "Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading Gakkel ridge in the Arctic." *Nature* 421(6920): 252-256.
- Edwards, K. J., B. T. Glazer, O. J. Rouxel, W. Bach, D. Emerson, R. E. Davis, B. M. Toner, C. S. Chan, B. M. Tebo, H. Staudigel and C. L. Moyer (2011). "Ultra-diffuse hydrothermal venting supports Fe-oxidizing bacteria and massive uranium deposition at 5000 m off Hawaii." *Isme Journal* 5(11): 1748-1758.
- Eisenhauer, A., K. Gogen, E. Pernicka and A. Mangini (1992). "Climatic influences on the growth-rates of Mn crusts during the Late Quaternary." *Earth and Planetary Science Letters* 109(1-2): 25-36.
- Elderfield, H. (1972). "Compositional variations in the manganese oxide component of marine sediments." *Nature Physical Science* 237: 110-112.

- Elderfield, H. and A. Schultz (1996). "Mid-ocean ridge hydrothermal fluxes and the chemical composition of the ocean." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24: 191-224.
- Elderfield, H. and M. J. Greaves (1981). "Negative cerium anomalies in the rare-earth element patterns of oceanic ferromanganese nodules." *Earth and Planetary Science Letters* 55(1): 163-170.
- Elderfield, H., R. A. Mills and M. D. Rudnicki (1993). "Geochemical and thermal fluxes, high-temperature venting and diffuse flow from mid-ocean ridge hydrothermal systems; the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge 26° N." *Geological Society Special Publications* 76: 295-307.
- Embley, R. (1988). "Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos Ridge: Sulfide mounds, stockwork zone, and differentiated lavas." *Canadian Mineralogist* 26(3): 517-539.
- Embley, R. W., W. W. Chadwick, D. Clague and D. Stakes (1999). "1998 Eruption of Axial Volcano: Multibeam anomalies and sea-floor observations." *Geophysical Research Letters* 26(23): 3425-3428.
- Feely, R. A., G. J. Massoth, J. H. Trefry, E. T. Baker, A. J. Paulson and G. T. Lebon (1994). "Composition and sedimentation of hydrothermal plume particles from North Cleft Segment, Juan-De-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 99(B3): 4985-5006.
- Feely, R. A., M. Lewison, G. J. Massoth, G. Robertbaldo, J. W. Lavelle, R. H. Byrne, K. L. Von Damm, Vondamm and H. C. Curl (1987). "Composition and dissolution of black smoker particulates from active vents on the Juan-De-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 92(B11): 11347-11363.
- Feely, R. A., T. L. Geiselman, E. T. Baker, G. J. Massoth and S. R. Hammond (1990). "Distribution and composition of hydrothermal plume particles from the ashes vent field at Axial Volcano, Juan-De-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 95(B8): 12855-12873.
- Field, M. P. and R. M. Sherrell (2000). "Dissolved and particulate Fe in a hydrothermal plume at 9° 45' N, East Pacific Rise: slow Fe(II) oxidation kinetics in Pacific plumes." *Geochim. Cosmochim. Acta* 64: 619-628.
- Finkelman, R. B. (1970). "Magnetic Particles Extracted from Manganese Nodules: Suggested Origin from Stony and Iron Meteorites." *Science* 167(3920): 982-984.
- Finney, B., Heath G.R. and Lyle M. (1984). "Growth rates of manganese rich nodules at Manop Site H (Eastern North Pacific)." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 48(5): 911-919.
- Fischer, A. G., B. C. Heezen, R. E. Boyce, D. Bury, R. G. Douglas, R. E. Garrison, S. A. Kling, V. Krasheninnikov, A. P. Lisitzin and A. C. Pimm (1970). "Geological history of the Western north pacific." *Science (New York, N.Y.)* 168(3936): 1210-1214.
- Fouquet Y. (2013). "Les ressources minérales marines État des connaissances sur l'importance des dépôts." *Annales des Mines – Responsabilité et environnement* n°70 -
- Fouquet, Y. (1997). "Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans?" *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 355(1723): 427-440.
- Fouquet, Y. (2002). "Sulfures polymétalliques hydrothermaux océaniques." *Les Techniques de l'industrie minière*(15): 50-66.

- Fouquet, Y. and D. Lacroix (2012). Les ressources minérales marines profondes: étude prospective à l'horizon 2030, Editions Quae.
- Fouquet, Y., A. Wafik, P. Cambon, C. Mevel, G. Meyer and P. Gente (1993a). "Tectonic setting and Mineralogical and Geochemical Zonation in the Snake Pit Sulfide Deposit (Mid-Atlantic Ridge at 23°N)." *Economic Geology* 88: 2018-2036.
- Fouquet, Y., H. Ondreas, J. L. Charlou, J. P. Donval, J. Radfordknoery, I. Costa, N. Lourenco and M. K. Tivey (1995). "Atlantic lava lakes and hot vents." *Nature* 377(6546): 201-201.
- Fouquet, Y., J. M. Auzende, V. Ballu, R. Batiza, D. Bideau, M. H. Cormier, P. Geistdoerfer, Y. Lagabrielle, J. Sinton and P. Spadea (1994). "Variability of the present-day hydrothermal activity along an ultra-fast spreading ridge - East Pacific Rise between 17°C and 19°S (NAUDUR Cruise)." *Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences Serie Ii* 319(11): 1399-1406.
- Fouquet, Y., P. Cambon, J. Etoubleau, J. L. Charlou, H. Ondreas, F. Barriga, G. Cherkashev, T. A. Semkova, I. Poroshina, M. Bohn, J. P. Donval, K. Henry, P. Murphy and O. Rouxel (2010). "Geodiversity of Hydrothermal Processes Along the Mid-Atlantic Ridge and Ultramafic-Hosted Mineralization: A New Type of Oceanic Cu-Zn-Co-Au Volcanogenic Massive Sulfide Deposit." *Geophysical Monograph Series* 188: 321-368.
- Fouquet, Y., R. Knott, P. Cambon, A. Fallick, D. Rickard and D. Desbruyeres (1996). "Formation of large sulfide mineral deposits along fast spreading ridges. Example from off-axial deposits at 12 43' N on the East Pacific Rise." *Earth and planetary science letters* 144(1): 147-162.
- Fouquet, Y., U. Vonstackelberg, J. L. Charlou, J. Erzinger, P. M. Herzig, R. Muhe and M. Wiedicke (1993b). "Metallogenesis in back-arc environments - the Lau Basin example." *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 88(8): 2154-2181.
- Fouquet, Y., U. Vonstackelberg, J. L. Charlou, J. P. Donval, J. Erzinger, J. P. Foucher, P. Herzig, R. Muhe, S. Soakai, M. Wiedicke and H. Whitechurch (1991). "Hydrothermal activity and metallogenesis in the Lau back-arc basin." *Nature* 349(6312): 778-781.
- Fouquet, Y., U. Vonstackelberg, J. L. Charlou, J. P. Donval, J. P. Foucher, J. Erzinger, P. Herzig, R. Muhe, M. Wiedicke, S. Soakai and H. Whitechurch (1991). "Hydrothermal activity in the Lau back-arc basin - Sulfides and water chemistry." *Geology* 19(4): 303-306.
- Francheteau, J., D. Needham, P. Choukroune, T. Juteau, M. Seguret, R. D. Ballard, J. Fox, W. Normark, A. Carranza, D. Cordoba, J. Guerrero, C. Rangin, H. Bougault, P. Cambon and R. Hékinian (1978). "Massive deep-sea sulfide ore-deposits discovered by submersible on the East Pacific Rise - Project RITA, 21°N." *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances De L'Academie Des Sciences Serie D*, 287(16): 1365-&.
- Francheteau, J., H. D. Needham, P. Choukroune, T. Juteau, M. Seguret, R. D. Ballard, P. J. Fox, W. Normark, A. Carranza, D. Cordoba, J. Guerrero, C. Rangin, H. Bougault, P. Cambon and R. Hékinian (1979). "Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise." *Nature* 277(5697): 523-528.
- Frank, M. (2002). "Radiogenic isotopes: Tracers of past ocean circulation and erosional input." *Reviews of Geophysics* 40(1).
- Frank, M., H. Marbler, A. Koschinsky, T. van de Flieddt, V. Klemm, M. Gutjahr, A. Halliday, P. Kubik and P. Halbach (2006). "Submarine hydrothermal venting related to volcanism in the Lesser Antilles: Evidence from ferromanganese precipitates." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7(4).

- Franklin, J., H. Gibson, I. Jonasson and A. Galley (2005). "Volcanogenic massive sulfide deposits." *Economic Geology* 100th anniversary volume 98: 523-560.
- Fredericks-Jantzen, C. M., Herman H. and Herley P. (1975). Microorganisms on manganese nodules. *Nature*. 258: 270.
- Fruh-Green, G. L., D. S. Kelley, S. M. Bernasconi, J. A. Karson, K. A. Ludwig, D. A. Butterfield, C. Boschi and G. Proskurowski (2003). "30,000 years of hydrothermal activity at the Lost City vent field." *Science* 301(5632): 495-498.
- Gablina, I.F., Mozgova, N.N., Borodaev, Y.S., 2000. "Minerals of the Cu-S system from the Logatchev field (14°45'N Mid-Atlantic Ridge)." *Applied Mineralogy*, Vols 1 and 2: 297-299
- Gamo, T., K. Okamura, J.-L. Charlou, T. Urabe, J.-M. Auzende, J. Ishibashi, K. Shitashima and H. Chiba (1997). "Acidic and sulfate-rich hydrothermal fluids from the Manus back-arc basin, Papua New Guinea." *Geology* 25(2): 139-142.
- Ganapathy, R., Brownlee D.E. and Hodge P.W. (1978). Silicate spherules from deep sea sediments: confirmation of extraterrestrial origin. *Science*. 201: 1119-1121.
- Gaowen, H., Weilin M., Chengbing S., Shengxiong Y., Benduo Z., Huiqiang Y., Xunxiong J. and Yongshou C. (2011). "Distribution characteristics of seamount cobalt-rich ferromanganese crusts and the determination of the size of areas for exploration and exploitation." *Acta Oceanologica Sinica* 30(3): 63-75.
- Gena, K. R., H. Chiba, T. Mizuta and O. Matsubaya (2006). "Hydrogen, Oxygen and Sulfur Isotope Studies of Seafloor Hydrothermal System at the Desmos Caldera, Manus Back-arc Basin, Papua New Guinea: An Analogue of Terrestrial Acid Hot Crater-lake." *Resource Geology* 56(2): 183-190.
- Gena, K., T. Mizuta, D. Ishiyama and T. Urabe (2001). "Acid-sulphate type alteration and mineralization in the Desmos caldera, Manus back-arc basin, Papua New Guinea." *Resource Geology* 51(1): 31-44.
- German, C. R. and K. L. Von Damm (2003). *Hydrothermal Processes. Treatise on Geochemistry*. H. Elderfield, Elsevier. 6: 181-222.
- German, C. R., A. Bowen, M. L. Coleman, D. L. Honig, J. A. Huber, M. V. Jakuba, J. C. Kinsey, M. D. Kurz, S. Leroy, J. M. McDermott, B. Mercier de L'Epinau, K. Nakamura, J. S. Seewald, J. L. Smith, S. P. Sylva, C. L. Van Dover, L. L. Whitcomb and D. R. Yoerger (2010a). "Diverse styles of submarine venting on the ultraslow spreading Mid-Cayman Rise." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(32): 14020-14025.
- German, C. R., A. M. Thurnherr, J. Knoery, J. L. Charlou, P. Jean-Baptiste and H. N. Edmonds (2010b). "Heat, volume and chemical fluxes from submarine venting: A synthesis of results from the Rainbow hydrothermal field, 36° N MAR." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 57(4): 518-527.
- German, C. R., E. T. Baker, C. Mevel, K. Tamaki and F. S. Team (1998). "Hydrothermal activity along the southwest Indian ridge." *Nature* 395(6701): 490-493.
- German, C. R., G. P. Klinkhammer, J. M. Edmond, A. Mitra and H. Elderfield (1990). "Hydrothermal scavenging of rare-earth elements in the ocean." *Nature* 345(6275): 516-518.
- German, C. R., S. Colley, M. R. Palmer, A. Khripounoff and G. P. Klinkhammer (2002). "Hydrothermal plume-particle fluxes at 13°N on the East Pacific Rise." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 49(11): 1921-1940.

- German, C., G. P. Klinkhammer and M. Rudnicki (1996). "The Rainbow hydrothermal plume, 36 15' N, MAR." *Geophysical research letters* 23(21): 2979-2982.
- German, C., R. Livermore, E. Baker, N. Bruguier, D. Connelly, A. Cunningham, P. Morris, I. Rouse, P. Statham and P. Tyler (2000). "Hydrothermal plumes above the East Scotia Ridge: an isolated high-latitude back-arc spreading centre." *Earth and Planetary Science Letters* 184(1): 241-250.
- Germanovich, L. N. and R. P. Lowell (1992). "Percolation theory, thermoelasticity, and discrete hydrothermal venting in the earth's crust." *Science* 255(5051): 1564-1567.
- Gieskes, J., M. Kastner, G. Einsele, K. Kelts and J. Niemitz (1982). "Hydrothermal activity in the Guaymas Basin, Gulf of California: a synthesis." *Initial reports of the deep sea drilling project* 64(pt II): 1159-1168.
- Glasby, G., K. Iizasa, M. Yuasa and A. Usui (2000). "Submarine hydrothermal mineralization on the Izu-Bonin arc, south of Japan: an overview." *Marine georesources & geotechnology* 18(2): 141-176.
- Glazer, B. T. and O. J. Rouxel (2009). "Redox speciation and distribution within diverse iron-dominated microbial habitats at Loihi Seamount." *Geomicrobiology Journal* 26(8): 606-622.
- Goldberg, E. D. (1963). Rare earth distributions in the marine environment. *Journal of Geophysical Research*. 68: 4209-4217.
- Goldberg, E. D. and E. Picciotto (1955). Thorium determinations in manganese nodules. *Science*. 121: 613-614.
- Goldberg, E. D. and M. Koide (1958). Ionium-Thorium chronology in deep sea sediments of the Pacific. *Science*. 128: 1003.
- Goldfarb, M., D. Converse, H. Holland and J. Edmond (1983). "The genesis of hot spring deposits on the East Pacific Rise, 21 N." *Econ. Geol. Monogr* 5: 184-197.
- Goldstein, S. L. and R. K. O'Nions (1981). "Nd and Sr isotopic relationships in pelagic clays and ferromanganese deposits." *Nature* 292(5821): 324-327.
- Goodfellow, W. D. and J. M. Franklin (1993). "Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, northern Juan de Fuca Ridge." *Economic Geology (plus the Bulletin of the Society of Economic Geologists);(United States)* 88(8).
- Gracia, E., D. Bideau, R. Hekinian, Y. Lagabrielle and L. M. Parson (1997). "Along-axis magmatic oscillations and exposure of ultramafic rocks in a second-order segment of the Mid-Atlantic Ridge (33°43'N to 34°07'N)." *Geology* 25(12): 1059-1062.
- Graham, J. W. (1959). "Metabolically Induced Precipitation of Trace Elements from Sea Water." *Science* 129(3360): 1428-1429.
- Greenslate, J. (1974). "Manganese and Biotic Debris Associations in Some Deep-Sea Sediments." *Science* 186(4163): 529-531.
- Greenslate, J. (1974). "Microorganisms participate in the construction of manganese nodules." *Nature* 249(5453): 181-183.
- Grill, E. V., Murray J.W. and MC Donald R.D. (1968). Todorokite in manganese nodules from a British Columbia Fjord. *Nature*. 219: 358-359.
- Gross, T. F., A. J. Williams and A. R. M. Newell (1988). "A deep-sea sediment transport storm." *Nature* 331(6156): 518-521.

- Grupe, B., H. J. Becker and H. U. Oebius (2001). "Geotechnical and sedimentological investigations of deep-sea sediments from a manganese nodule field of the Peru Basin." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3593-3608.
- Gueguen, B., O. Rouxel, E. Ponzevera, A. Bekker and Y. Fouquet (2013). "Nickel Isotope Variations in Terrestrial Silicate Rocks and Geological Reference Materials Measured by MC-ICP-MS." *Geostandards and Geoanalytical Research* 37(3): 297-317.
- Guichard, F., J. L. Reyss and Y. Yokoyama (1978). "Growth rate of manganese nodule measured with ^{10}Be and ^{26}Al ." *Nature* 272(5649): 155-156.
- Guney, M., Z. Nawab and M. Marhoun (1984). Atlantis-II-Deep's metal reserves and their evaluation. Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference.
- Gurvich, E. G. (2010). *Metalliferous Sediments of the World Ocean*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- Halbach, P., G. Friedrich and U. von Stackelerg (1988). "The Manganese Nodule Belt of The Pacific Ocean: Geological Environment, Nodule Formation and Mining Aspects. F." Enke, Stuttgart.
- Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, L. Kaselitz, R. D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Czerwinski and N. Blum (1989). "Probable modern analog of Kuroko - type massive sulfure deposits in the Okinawa trough back-arc basin." *Nature* 338(6215): 496-499.
- Halbach, P., M. Segl, D. Puteanus and A. Mangini (1983). "Co-fluxes and growth-rates in ferromanganese deposits from Central Pacific seamount areas." *Nature* 304(5928): 716-719.
- Halfar, J. and R. M. Fujita (2007). "Danger of deep-sea mining." *Science* 316(5827): 987-987.
- Hammond, A. L. (1974a). "Manganese nodules (I): mineral resources on the deep seabed." *Science (New York, N.Y.)* 183(4124): 502-503.
- Hammond, A. L. (1974b). "Manganese Nodules (II): Prospects for Deep Sea Mining." *Science (New York, N.Y.)* 183(4125): 644-646.
- Han, X. Q., Jin X.L., Yang S.F., Fietzke J. and Eisenhauer A. (2003). "Rhythmic growth of Pacific ferromanganese nodules and their Milankovitch climatic origin." *Earth and Planetary Science Letters* 211(1-2): 143-157.
- Hannington, M. D., G. Thompson, P. A. Rona and S. D. Scott (1988). "Gold and native copper in supergene sulfides from the Mid-Atlantic Ridge." *Nature* 333(6168): 64-66.
- Hannington, M. D., I. R. Jonasson, P. M. Herzig and S. Petersen (1995). "Physical and Chemical Processes of Seafloor Mineralization at Mid-Ocean Ridges." *Seafloor hydrothermal systems: Physical, chemical, biological, and geological interactions*: 115-157.
- Hannington, M., J. Jamieson, T. Monecke, S. Petersen and S. Beaulieu (2011). "The abundance of seafloor massive sulfide deposits." *Geology* 39(12): 1155-1158.
- Harada, K. and Nishida, S., (1976). "Biostratigraphy of some marine manganese nodules." *Nature* 260: 770-771.
- Hariya, Y. and T. Kikuchi (1964). "Precipitation of manganese by bacteria in mineral springs." *Nature* 202: 416-417.
- Haymon, R. M. (1983). "Growth history of hydrothermal black smoker chimneys." *Nature* 301(5902): 695-698.

- Haymon, R. M. and M. Kastner (1981). "Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: preliminary description of mineralogy and genesis." *Earth and Planetary Science Letters* 53(3): 363-381.
- Haymon, R. M., R. A. Koski and C. Sinclair (1984). "Fossils of hydrothermal vent worms from Cretaceous sulfide ores of the Samail Ophiolite, Oman." *Science* 223(4643): 1407-1409.
- Haymon, R., D. Fornari, K. Von Damm, M. Lilley, M. Perfit, J. Edmond, W. Shanks III, R. Lutz, J. Grebmeier and S. Carbotte (1993). "Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45–52' N: Direct submersible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991." *Earth and Planetary Science Letters* 119(1): 85-101.
- Heath, G. R. (1979). "Burial Rates, Growth Rates, and Size Distributions of Deep-Sea Manganese Nodules." *Science* 205(4409): 903-904.
- Heggie, D. and T. Lewis (1984). "Cobalt in pore waters of marine sediments." *Nature* 311(5985): 453-455.
- Hein, J. R. (2000). Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin, and research activities. Workshop on mineral resources of the international seabed area, Kingston (Jamaïque).
- Hein, J. R. and A. Koschinsky (2000). Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific, CRC press.
- Hein, J. R., A. Koschinsky and A. N. Halliday (2003). "Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(6): 1117-1127.
- Hein, J. R., Conrad T.A. and Dunham R.E. (2009). "Seamount Characteristics and Mine-Site Model Applied to Exploration- and Mining-Lease-Block Selection for Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts." *Marine Georesources & Geotechnology* 27(2): 160 - 176.
- Hein, J. R., H. W. Yeh, S. H. Gunn, A. E. Gibbs and C. H. Wang (1994). "Composition and origin of hydrothermal ironstones from Central Pacific seamounts." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 58(1): 179-189.
- Hein, J. R., K. Mizell, A. Koschinsky and T. A. Conrad (2013). "Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources." *Ore Geology Reviews* 51: 1-14.
- Hein, J. R., Y. Hsueh-Wen, S. H. Gunn, A. E. Gibbs and W. Chung-ho (1994). "Composition and origin of hydrothermal ironstones from central Pacific seamounts." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(1): 179-189.
- Hekinian, R., M. Fevrier, F. Avedik, P. Cambon, J. L. Charlou, H. D. Needham, J. Raillard, J. Boulegue, L. Merlivat, A. Moinet, S. Manganini and J. Lange (1983). "East Pacific Rise near 13°N - Geology of new hydrothermal fields." *Science* 219(4590): 1321-1324.
- Hekinian, R., M. Fevrier, J. L. Bischoff, P. Picot and W. C. Shanks (1980). "Sulfide deposits from the East Pacific Rise near 21°N." *Science* 207(4438): 1433-1444.
- Helfrich, K. R. and K. G. Speer (1995). "Ocean hydrothermal circulation: mesoscale and basin-scale flow." *Geophys. Monogr. (AGU)* 91: 347–356.
- Herron, E. M. (1972). "Sea floor spreading and the Cenozoic history of the East Central Pacific." *Geological Society Of America Bulletin*: 1671-1692.

- Herzig, P. M. and M. D. Hannington (1995). "Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor - A review." *Ore Geology Reviews* 10(2): 95-115.
- Herzig, P. M., M. D. Hannington, Y. Fouquet, U. von Stackelberg and S. Petersen (1993). "Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific." *Economic Geology* 88(8): 2182-2209.
- Herzig, P. M., Petersen S. and Hannington M.D. (2002). "Polymetallic massive sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts: status and prospects." *ISA technical study*(2): 90-100.
- Herzig, P. M., U. Vonstackelberg and S. Petersen (1990). "Hydrothermal mineralization from the Valu-Fa-Ridge, Lau Back-Arc Basin (SW Pacific)." *Marine Mining* 9(2): 271-&.
- Hoagland, P., S. Beaulieu, M. A. Tivey, R. G. Eggert, C. German, L. Glowka and J. Lin (2010). "Deep-sea mining of seafloor massive sulfides." *Marine Policy* 34(3): 728-732.
- Hoffert, M. (1980). *Les Argiles rouges des grands fonds dans le Pacifique centre-est: authigenèse, transport, diagenèse*, Université Louis Pasteur, Institut de géologie.
- Hoffert, M. (2008). *Les nodules polymétalliques dans les grands fonds océaniques: une extraordinaire aventure minière et scientifique sous-marine*, Société géologique de France.
- Horner, T., M. Schönbächler, M. Rehkämper, S. Nielsen, H. Williams, A. Halliday, Z. Xue and J. Hein (2010). "Ferromanganese crusts as archives of deep water Cd isotope compositions." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11(4).
- Houghton, J. L., W. C. Shanks and W. E. Seyfried (2004). "Massive sulfide deposition and trace element remobilization in the Middle Valley sediment-hosted hydrothermal system, northern Juan de Fuca Ridge." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68(13): 2863-2873.
- Hrischeva, E., S. Scott and R. Weston (2007). "Metalliferous sediments associated with presently forming volcanogenic massive sulfides: the SuSu Knolls hydrothermal field, eastern Manus Basin, Papua New Guinea." *Economic geology* 102(1): 55-73.
- Humphris, S. E., P. M. Herzig, D. J. Miller, J. C. Alt, K. Becker, D. Brown, G. Brugmann, H. Chiba, Y. Fouquet, J. B. Gemmill, G. Guerin, M. D. Hannington, N. G. Holm, J. J. Honnorez, G. J. Iturrino, R. Knott, R. Ludwig, K. Nakamura, S. Petersen, A. L. Reysenbach, P. A. Rona, S. Smith, A. A. Sturz, M. K. Tivey and X. Zhao (1995). "The internal structure of an active sea-floor massive sulfide deposit." *Nature* 377(6551): 713-716.
- Hunt, J. M., E. E. Hays, E. T. Degens and D. A. Ross (1967). "Red sea: detailed survey of hot-brine areas." *Science (New York, N.Y.)* 156(3774): 514-516.
- Huston, D. L. and R. R. Large (1989). "A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulphide deposits." *Ore Geology Reviews* 4(3): 171-200.
- ISA (1998). *Projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques dans la zone*. Texte proposé par la Commission juridique et technique. ISBA/4/C/4 Rev.1 - 50 p.
- ISA (2002). *Exposés succincts sur les dépôts massifs de sulfures polymétalliques et les encroûtements de ferromanganèse riches en cobalt*. ISBA/8/A/1. Kingston (Jamaïque), Autorité internationale des fonds marins, 6p.
- ISA (2004). *Marine mineral resources, scientific advances and economic perspectives*. United Nations Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, Office of Legal Affairs, Kingston (Jamaïque), 1-126 pp.

ISA (2005). Décision du Conseil concernant une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration présentée par la République fédérale d'Allemagne, représentée par l'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles. ISBA/11/C/10. Kingston (Jamaïque), International Seabed Authority: 47-48.

ISA (2005). Etablissement d'un modèle géologique des nodules polymétalliques dans la zone de Clarion-Clipperton.

ISA (2006). Evaluation of the annual reports submitted by contractors: report and recommendations of the Legal and Technical Commission, Autorité internationale des fonds marins, Kingston (Jamaïque).

ISA (2007a). Projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des encroûtements de ferromanganèse cobaltifères dans la Zone, Autorité internationale des fonds marins, Kingston (Jamaïque).

ISA (2007b). Projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques dans la Zone, Autorité internationale des fonds marins, Kingston (Jamaïque).

ISA (2010). A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion-Clipperton fracture zone. Technical study. Kingston, ISA: 1-105.

ISA (2010). Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des nodules polymétalliques dans la Zone. ISBA/16/LTC/7. Kingston (Jamaïque), Autorité Internationale des Fonds Marins, 24 p.

ISA (2011a). Décision du Conseil concernant une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques présentée par Nauru Ocean Resources Inc. ISBA/17/C/14. Kingston (Jamaïque), Autorité internationale des fonds marins: 1-2.

ISA (2011b). Décision du Conseil concernant une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques présentée par Tonga Offshore Mining Limited. ISBA/17/C/15. Kingston (Jamaïque), Autorité internationale des fonds marins: 1-2.

ISA (2011c). Projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des encroûtements cobaltifères de ferromanganèse dans la Zone. ISBA/17/C/8. Kingston (Jamaïque), Autorité internationale des fonds marins, 11 p..

ISA (2011) Plan de gestion de l'environnement de la zone de Clarion-Clipperton. ISBA/17/LTC/7. Kingston (Jamaïque), Autorité Internationale des Fonds Marins, 19 p.

ISA (2011) Environmental Management Needs for Exploration and Exploitation of deep Sea Minerals. ISA technical Study n° 10. Report of a workshop held by The International Seabed Authority in collaboration with the Government of Fiji and the SOPAC Division of the Secretariat of the Pacific Community (SPC) in Nadi, Fiji, from 29 November to 2 December 2011. 52 p.

ISA (2012) Décision de l'Assemblée de l'Autorité internationale des fonds marins concernant le Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des encroûtements cobaltifères de ferromanganèse dans la Zone. ISBA/18/A/11. Kingston (Jamaïque), Autorité Internationale des Fonds Marins, 50 p.

ISA (2012a). Rapport de synthèse du Président de la Commission juridique et technique sur les travaux de la Commission durant la dix-huitième session de l'Autorité internationale des fonds marins. 12-43145, International Seabed Authority, Kingston (Jamaïque).

ISA (2012b). Rapport et recommandations de la Commission juridique et technique au Conseil de l'Autorité internationale des fonds marins concernant la demande d'approbation d'un plan de travail pour l'exploration de gisements de nodules polymétalliques dans la Zone, déposé par la société Marawa Research and Exploration Ltd. 12-42794, International Seabed Authority, Kingston (Jamaïque).

ISA (2012c). Rapport et recommandations de la Commission juridique et technique au Conseil de l'Autorité internationale des fonds marins concernant une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques présentée par G-TEC Sea Mineral Resources NV. ISBA/18/C/19. Kingston (Jamaïque), International Seabed Authority: 1-12.

ISA (2013) Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des minéraux marins dans la Zone. ISBA/19/LTC/8. Kingston (Jamaïque), Autorité Internationale des Fonds Marins, 35 p.

ISA (2013). Sélection de décisions et de documents de la dix-huitième session (16-27 juillet 2012). Kingston (Jamaïque), Autorité internationale des fonds marins: 1-273.

Jahnke, R. A., Emerson, S.R., Roe, K.K., Burnett, W.C., (1983). "The present day formation of apatite in Mexican continental margin sediments." *Geochimica Cosmochimica Acta* 47: 259–266.

Jahnke, R. A., Emerson, S.R., Roe, K.K., Burnett, W.C., (1983). "The present day formation of apatite in Mexican continental margin sediments." *Geochimica Cosmochimica Acta* 47: 259–266.

James, R., H. Elderfield and M. Palmer (1995). "The chemistry of hydrothermal fluids from the Broken Spur site, 29 N Mid-Atlantic Ridge." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(4): 651-659.

Janecky, D. and W. Seyfried (1984). "Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crests: Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and seawater." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48(12): 2723-2738.

Jarmache, E. (2012). "5-Droit international et son évolution." in Fouquet, Y. and D. Lacroix (2012). *Les ressources minérales marines profondes: étude prospective à l'horizon 2030*, Editions Quae : 112.

Jauhari, P. and J. N. Pattan (2000). *Ferromanganese nodules from the Central Indian Ocean Basin*. CRC press.

Jiang, X., X. Lin, D. Yao, S. Zhai and W. Guo (2007). "Geochemistry of lithium in marine ferromanganese oxide deposits." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 54(1): 85-98.

John, S. G., O. J. Rouxel, P. R. Craddock, A. M. Engwall and E. A. Boyle (2008). "Zinc stable isotopes in seafloor hydrothermal vent fluids and chimneys." *Earth and Planetary Science Letters* 269(1-2): 17-28.

Juniper, S. K., I. R. Jonasson, V. Tunnicliffe and A. J. Southward (1992). "Influence of a tube-building polychaete on hydrothermal chimney mineralization." *Geology* 20(10): 895-898.

Kadko, D. C., Rosenberg, N.D., Lupton, J.E., Collier, R.W., Lilley, M.D., (1990). "Chemical reaction rates and entrainment within the Endeavour Ridge hydrothermal plume." *Earth and Planetary Science Letters* 99: 315–335.

- Karl, D. M., G. M. McMurtry, A. Malahoff and M. O. Garcia (1988). "Loihi-Seamount, Hawaii - A mid-plate volcano with a distinctive hydrothermal system." *Nature* 335(6190): 532-535.
- Kasten, S., G. P. Glasby, H. D. Schulz, G. Friedrich and S. I. Andreev (1998). "Rare earth elements in manganese nodules from the South Atlantic Ocean as indicators of oceanic bottom water flow." *Marine Geology* 146(1-4): 33-52.
- Kato, Y., Fujinaga K., Nakamura K., Takaya Y., Kitamura K., Ohta J., Toda R., Nakashima T. and I. H. (2011). "Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements." *Nature Geosci* advance online publication.
- Keir, R. S. (2010). "A note on the fluxes of abiogenic methane and hydrogen from mid-ocean ridges." *Geophysical Research Letters* 37.
- Keir, R. S., Schmale, O., Walter, M., Sültenfuß, J., Seifert, R., Rhein, M., (2008). "Flux and dispersion of gases from the "Drachenschlund" hydrothermal vent at 8°18' S, 13°30' W on the Mid-Atlantic Ridge." *Earth and Planetary Science Letters* 270: 338–348.
- Kelley, D. S., J. A. Karson, G. L. Fruh-Green, D. R. Yoerger, T. M. Shank, D. A. Butterfield, J. M. Hayes, M. O. Schrenk, E. J. Olson, G. Proskurowski, M. Jakuba, A. Bradley, B. Larson, K. Ludwig, D. Glickson, K. Buckman, A. S. Bradley, W. J. Brazelton, K. Roe, M. J. Elend, A. Delacour, S. M. Bernasconi, M. D. Lilley, J. A. Baross, R. T. Summons and S. P. Sylva (2005). "A serpentinite-hosted ecosystem: The Lost City hydrothermal field." *Science* 307(5714): 1428-1434.
- Kennett, J. P. and N. D. Watkins (1975). "Deep-Sea Erosion and Manganese Nodule Development in the Southeast Indian Ocean." *Science* 188(4192): 1011-1013.
- Kerr, R. A. (1984a). "Manganese Nodules Grow by Rain from Above: The rain of plant and animal remains falling into the deep sea not only provides metals to nodules but also determines nodule growth rates and composition." *Science (New York, NY)* 223(4636): 576.
- Kerr, R. A. (1984b). "Why Are There Any Nodules at All?" *Science* 223(4636): 577.
- Khripounoff, A. and P. Alberic (1991). "Settling of particles in a hydrothermal vent field (East Pacific Rise 13°N) measured with sediment traps." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 38(6): 729-744.
- Kim, J., I. Lee and K. Y. Lee (2004). "S, Sr, and Pb isotopic systematics of hydrothermal chimney precipitates from the Eastern Manus Basin, western Pacific: Evaluation of magmatic contribution to hydrothermal system." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 109(B12).
- Kleinrock, M. C. and S. E. Humphris (1996). "Structural control on seafloor hydrothermal activity at the TAG active mound." *Nature* 382(6587): 149-153.
- Klemm, V., S. Levasseur, M. Frank, J. R. Hein and A. N. Halliday (2005). "Osmium isotope stratigraphy of a marine ferromanganese crust." *Earth and Planetary Science Letters* 238(1-2): 42-48.
- Klinkhammer, G. and A. Hudson (1986). "Dispersal patterns for hydrothermal plumes in the South-Pacific using manganese as a tracer." *Earth and Planetary Science Letters* 79(3-4): 241-249.
- Klinkhammer, G., Rona, P., Greaves, M., Elderfield, H., (1985). "Hydrothermal manganese plumes in the Mid-Atlantic Ridge rift valley." *Nature* 314: 727–731.

- Kosakevitch, A. (1988). Encroûtement polymétalliques de Tuamotu (Polynésie Française) et indices d'un hydrothermalisme sous-marin. BRGM. CONTRAT IFREMER N:87.2.410364 DERO-GM: 1-37.
- Koschinsky, A. and J. R. Hein (2003). "Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: solid-phase associations and seawater speciation." *Marine Geology* 198(3-4): 331-351.
- Koschinsky, A. and P. Halbach (1995). "Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 59(24): 5113-5132.
- Koschinsky, A., A. Stascheit, M. Bau and P. Halbach (1997). "Effects of phosphatization on the geochemical and mineralogical composition of marine ferromanganese crusts." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 61(19): 4079-4094.
- Koschinsky, A., D. Garbe-Schoenberg, S. Sander, K. Schmidt, H.-H. Gennerich and H. Strauss (2008). "Hydrothermal venting at pressure-temperature conditions above the critical point of seawater, 5 ° S on the Mid-Atlantic Ridge." *Geology* 36(8): 615-618.
- Koski, R. A., I. R. Jonasson, D. C. Kadko, V. K. Smith and F. L. Wong (1994). "Compositions, growth mechanisms, and temporal relations of hydrothermal sulfide-silica chimneys at northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research* 99: 4813-4832.
- Koski, R., W. S. III, W. Bohrsen and R. Oscarson (1988). "The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda Ridge: implications for depositional processes." *Canadian Mineralogist* 26: 655-673.
- Kotlinski, R. and V. Stoyanova, . (2007). "Identification of factors and conditions potentially responsible for the buried nodules occurrence in the eastern Clarion-Clipperton Zone (NE Pacific)." *Proceedings of the seven (2007) ISOPE Ocean Mining Symposium, Lisbon (Portugal):* 12-14.
- Ku, T. L., M. Kusakabe, D. E. Nelson, J. R. Southon, R. G. Korteling, J. Vogel and I. Nowikow (1982). "Constancy of oceanic deposition of Be-10 as recorded in manganese crusts." *Nature* 299(5880): 240-242.
- Kudrass, H. R. (1999). "Marine placer deposits and sea-level changes." *Handbook of marine mineral deposits* 18: 3.
- Kudrass, H. R. (2000). *Marine placer deposits and sea-level changes. Handbook of Marine Mineral Deposits.* D. S. Cronan. Boca Raton, FL, CRC Press: 3-26.
- Kuhn, T., C. Ruhlmann and M. H. Wiedicke (2011). "Development of methods and equipment for the exploration of manganese nodules in the German license area in the Central Equatorial Pacific." *Proceedings of the eight (2011) ISOPE Ocean Mining Symposium, Maui, Hawaii:* 174-177.
- Lakin, H. W., C. E. Thompson and D. F. Davidson (1963). "Tellurium Content of Marine Manganese Oxides and Other Manganese Oxides." *Science* 142(3599): 1568-1569.
- Lalou, C. and E. Brichet (1982). "Ages and implications of East Pacific Rise sulphide deposits at 21°N." *Nature* 300(5888): 169-171.
- Lalou, C., J. L. Reyss, E. Brichet, M. Arnold, G. Thompson, Y. Fouquet and P. A. Rona (1993). "New-age data for Mid-Atlantic Ridge hydrothermal sites - TAG and Snakepit chronology revisited." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 98(B6): 9705-9713.

- Lam, P., J. P. Cowen, B. N. Popp and R. D. Jones (2008). "Microbial ammonia oxidation and enhanced nitrogen cycling in the Endeavour hydrothermal plume." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 72(9): 2268-2286.
- Lampietti, F. J. and L. F. Marcus (1979). "Manganese Nodules on the Sea Floor: Are Economic Mining Operations Feasible?" *Science* 203(4380): 565.
- Langmuir, C., S. Humphris, D. Fornari, C. Van Dover, K. Von Damm, M. Tivey, D. Colodner, J.-L. Charlou, D. Desonie and C. Wilson (1997). "Hydrothermal vents near a mantle hot spot: the Lucky Strike vent field at 37 N on the Mid-Atlantic Ridge." *Earth and Planetary Science Letters* 148(1): 69-91.
- Le Suave, R., C. Pichocki, G. Pautot, M. Hoffert, Y. Morel, M. Voisset, S. Monti, J. Amosse and A. Kosakevitch (1989). "Geological and mineralogical study of Co-rich ferromanganese crusts from a submerged atoll in the Tuamotu archipelago (French-Polynesia)." *Marine Geology* 87(2-4): 227-247.
- Le Suavé, R., G. Pautot, M. Hoffert, S. Monti, Y. Morel and C. Pichocki (1986). "Cadre géologique de concrétions polymétalliques cobaltifères sous-marines dans l'Archipel des Tuamotu (Polynésie française)." *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 303(11): 1013-1018.
- Le Suave, R., Hoffert M. and Pautot G. (1990). "Variété des environnements géologiques et relation avec les dépôts ferromanganésifères de l'océan Pacifique." *Oceanologica Acta*. 10: 269-279.
- Le Suave, R., M. Voisset, J.-F. Bourillet, P. Cochonat, J. Guillaume, E. Le Drezen, Y. Morel, G. Ollier, S. Rey and S. Ricou (1987). "Mise en évidence de phénomènes tectoniques et érosifs récents en domaine intraplaque profond, à l'aide de SAR (système acoustique remorqué). Exemple du Pacifique nord équatorial." *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 305(14): 1211-1216.
- Lee, D. C., A. N. Halliday, J. R. Hein, K. W. Burton, J. N. Christensen and D. Gunther (1999). "Hafnium isotope stratigraphy of ferromanganese crusts." *Science* 285(5430): 1052-1054.
- Lenoble, J. P. (1996). "Les nodules polymétalliques: Bilan de 30 ans de travaux dans le monde." *Chronique de la Recherche Minière*(524): 15-39.
- Lenoble, J. P., C. Augris, R. Cambon and P. Saget (1995). *Marine Mineral Occurrences and Deposits of the Economic Exclusive Zones, MARMIN: A Data Base*, Editions IFREMER.
- Levasseur, S., Frank M., Hein J.R. and Halliday A.N. (2004). "The global variation in the iron isotope composition of marine hydrogenetic ferromanganese deposits: implications for seawater chemistry?" *Earth and Planetary Science Letters* 224(1-2): 91-105.
- Li, Y. H. (1982). "Inter-element relationship in abyssal Pacific ferromanganese nodules and associated pelagic sediments." *Geochim. Cosmochim. Acta* 46: 1053-1060.
- Li, Y.-H. and J. E. Schoonmaker (2003). *Chemical Composition and Mineralogy of Marine Sediments. Treatise on Geochemistry, Volume 7*. F. T. Mackenzie, Elsevier: 1-35.
- Lilley, M. D., Butterfield, D.A., Lupton, J.E., Olson, E.J., (2003). "Magmatic events can produce rapid changes in hydrothermal vent chemistry." *Nature* 422: 878-881.

- Lilley, M. D., D. A. Butterfield, E. J. Olson, J. E. Lupton, S. A. Macko and R. E. McDuff (1993). "Anomalous CH₄ and NH₄⁺ concentrations at an unsedimented mid-ocean-ridge hydrothermal system." *Nature* 364(6432): 45-47.
- Lilley, M. D., M. A. Deangelis and L. I. Gordon (1982). "CH₄, H₂, CO and N₂O in submarine hydrothermal vent waters." *Nature* 300(5887): 48-50.
- Ling, H. F., K. W. Burton, R. K. Onions, B. S. Kamber, F. von Blanckenburg, A. J. Gibb and J. R. Hein (1997). "Evolution of Nd and Pb isotopes in Central Pacific seawater from ferromanganese crusts." *Earth and Planetary Science Letters* 146(1-2): 1-12.
- Lipton, I. (2008). "Mineral Resource Estimate Solwara 1 Project Bismarck Sea Papua New Guinea." Technical Report NI-43-101 -Prepared by Golder Associates for Nautilus Minerals Inc 227p.
- Lipton, I. (2012). "Mineral Resource Estimate, Solwara Project, Bismarck Sea, PNG." Technical Report NI-43-101, SL01-NSG-RPT-7020-001 Rev 1 – Golder Resource Report: 240 p.
- Lisitsyn, A., K. Crook, Y. A. Bogdanov, L. Zonenshayn, K. Murav'yev, W. Tufar, Y. G. Gurvich, V. Gordeyev and G. Ivanov (1993). "A hydrothermal field in the rift zone of the Manus Basin, Bismarck Sea." *International Geology Review* 35(2): 105-126.
- Little, S. A., K. D. Stolzenbach and R. P. Vonherzen (1987). "Measurements of plume flow from a hydrothermal vent field." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 92(B3): 2587-2596.
- Lowell, R. P., P. Vancappellen and L. N. Germanovich (1993). "Silica precipitation in fractures and the evolution of permeability in hydrothermal upflow zones." *Science* 260(5105): 192-194.
- Luck, J. M. and K. K. Turekian (1983). "Osmium-187/Osmium-186 in Manganese Nodules and the Cretaceous-Tertiary Boundary." *Science* 222(4624): 613-615.
- Lukashin, V. N., D. L. Alelinik, A. B. Isaeva, A. Y. Lein and G. M. Vinogradov (2004). "Geochemistry of a neutrally buoyant plume above the rainbow hydrothermal field and related fluxes of sedimentary material." *Geochemistry International* 42(5): 414-427.
- Lukashin, V. N., L. L. Demina, V. V. Gordeev and V. Y. Gordeev (2012). "The geochemistry of deepwater particulate matter over the hydrothermal field at 9A ° d50' N (the East Pacific Rise)." *Oceanology* 52(2): 271-283.
- Lupton, J. (1998). "Hydrothermal helium plumes in the Pacific Ocean." *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 103(C8): 15853-15868.
- Lupton, J. E. (1995). "Hydrothermal plumes: near and far-field." *Geophys. Monogr. (AGU)* 91: 317-346.
- Lupton, J. E. (1996). "A far-field hydrothermal plume from Loihi Seamount." *Science* 272(5264): 976-979.
- Lupton, J. E. and H. Craig (1981). "A major He-3 source at 15°S on the East Pacific Rise." *Science* 214(4516): 13-18.
- Lupton, J. E., E. T. Baker and G. J. Massoth (1989). "Variable He-3 heat ratios in submarine hydrothermal systems - evidence from 2 plumes over the Juan-De-Fuca Ridge." *Nature* 337(6203): 161-164.

- Lupton, J. E., E. T. Baker, N. Garfield, G. J. Massoth, R. A. Feely, J. P. Cowen, R. R. Greene and T. A. Rago (1998). "Tracking the evolution of a hydrothermal event plume with a RAFOS neutrally buoyant drifter." *Science* 280(5366): 1052-1055.
- Lupton, J. E., J. R. Delaney, H. P. Johnson and M. K. Tivey (1985). "Entrainment and vertical transport of deep-ocean water by buoyant hydrothermal plumes." *Nature* 316(6029): 621-623.
- Lupton, J. E., R. F. Weiss and H. Craig (1977). "Mantle helium in hydrothermal plumes in Galápagos Rift." *Nature* 267(5612): 603-604.
- Lupton, J., Butterfield, D., Lilley, M., Evans, L., Nakamura, K., Chadwick, W., Resing, J., Embley, R., Olson, E., Proskurowski, G., Baker, E., de Ronde, C., Roe, K., Greene, R., Lebon, G., Young, C., (2006). "Submarine venting of liquid carbon dioxide on a Mariana Arc volcano." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7.
- Lutz, R. A., D. Jablonski and R. D. Turner (1984). "Larval development and dispersal at deep-sea hydrothermal vents." *Science* 226(4681): 1451-1454.
- Mammerickx, J. (1981). "Depth anomalies in the Pacific: Active, fossil and precursor." *Earth and Planetary Science Letters* 53(2): 147-157.
- Mammerickx, J., R. N. Anderson, H. W. Menard and S. M. Smith (1975). "Morphology and tectonic evolution of the east-central Pacific." *Geological Society of America Bulletin* 86(1): 111-118.
- Manheim, F. T. (1986). "Marine Cobalt Resources." *Science* 232(4750): 600-608.
- Manheim, F. T. and C. M. Lane-Bostwick (1988). "Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydrothermal discharge on the Pacific sea floor." *Nature* 335(6185): 59-62.
- Manheim, F., R. Pratt and P. McFarlin (1980). "Composition and origin of phosphorite deposits of the Blake Plateau. In: YK Bendor (Editor), *Marine Phosphorites*." *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ* 29: 117-138.
- Mann, E. L., N. Ahlgren, J. W. Moffett and S. W. Chisholm (2002). "Copper toxicity and cyanobacteria ecology in the Sargasso Sea." *Limnology and Oceanography* 47(4): 976-988.
- Martin, J. H. (1990). "Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis." *Paleoceanography* 5(1): 1-13.
- Martinez, F. and B. Taylor (1996). "Backarc spreading, rifting, and microplate rotation, between transform faults in the Manus Basin." *Marine Geophysical Researches* 18(2-4): 203-224.
- Massoth, G. J., D. A. Butterfield, J. E. Lupton, R. E. McDuff, M. D. Lilley and I. R. Jonasson (1989). "Submarine venting of phase-separated hydrothermal fluids at Axial Volcano, Juan-De-Fuca Ridge." *Nature* 340(6236): 702-705.
- McGarry, L. and J.G. Langlands. (2011). Updated Technical Report. Review of historic resource estimates and CIM compliant resource estimate for the Atlantis II Deep copper, zinc, silver and manganese deposit, Red Sea. For Diamond Field International Limited by ACA Howe International Limited. ACA Howe International Ltd NI 43-101 Technical Report, Berkhamsted Herts, UK. 60 p.
- McKelvey, V. E. (1980). "Seabed minerals and the law of the sea." *Science* 209(4455): 464-472.
- Menard, H. W. (1967). "Extension of Northeastern-Pacific Fracture Zones." *Science* 155(3758): 72-74.

- Menard, H. W. and C. J. Shipek (1958). "Surface concentrations of manganese nodules." *Nature* 182(4643): 1156-1158.
- Menard, H. W. and J. Z. Frazer (1978). "Manganese Nodules on the Sea Floor: Inverse Correlation Between Grade and Abundance." *Science* 199(4332): 969-971.
- Mével, C., M. Cannat, P. Gente, E. Marion, J. Auzende and J. Karson (1991). "Emplacement of deep crustal and mantle rocks on the west median valley wall of the MARK area (MAR, 23 N)." *Tectonophysics* 190(1): 31-53.
- Michael, P. J., C. H. Langmuir, H. J. B. Dick, J. E. Snow, S. L. Goldstein, D. W. Graham, K. Lehnert, G. Kurras, W. Jokat, R. M. uhe and H. N. Edmonds (2003). "Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean." *Nature* 423(6943): 956-U951.
- Mills, R. A., D. M. Wells and S. Roberts (2001). "Genesis of ferromanganese crusts from the TAG hydrothermal field." *Chemical Geology* 176(1-4): 283-293.
- Minter, W. and D. Craw (1999). "A special issue on placer deposits. Preface." *Economic Geology* 94(5): 603-604.
- Moffett, J. W. (1990). "Microbially mediated Cerium oxidation in sea-water." *Nature* 345(6274): 421-423.
- Monti, S., and G. Pautot (1974). *Cartes bathymétriques au 1/1 000 000 de la Polynésie française (Tahiti, Taroa, Marquises, Hao, Mururoa)*.
- Moore, W. S. (1981). "Iron-manganese banding in Oneida Lake ferromanganese nodules." *Nature* 292(5820): 233-235.
- Morel, F. and R. Reinfelder (1994). "Zinc and carbon co-limitation of marine phytoplankton." *Nature* 369: 740-742.
- Morel, F. M. M. and N. M. Price (2003). "The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans." *science* 300(5621): 944-947.
- Morel, F. M., A. J. Milligan and M. A. Saito (2004). *Marine Bioinorganic Chemistry: The Role of Trace Metals in the Oceanic Cycles of Major Nutrients. Treatise on Geochemistry*. H. D. Holland and K. K. Turekian, Elsevier.
- Morel, Y. and R. Le Suave (1986). "Variabilité de l'environnement morphologique et sédimentaire dans un secteur intraplaque du Pacifique Nord (zone Clarion-Clipperton)." *Bulletin de la Société Géologique de France* 2(3): 361-372.
- Morgan, C. L. (2000). *Resource estimates of the Clarion-Clipperton manganese nodule deposits*, CRC press.
- Mortlock, R. A. and P. N. Froelich (1986). "Hydrothermal germanium over the southern East Pacific Rise." *Science* 231(4733): 43-45.
- Moss, R. and S. D. Scott (1996). "Silver in sulfide chimneys and mounds from 13° N and 21° N, East Pacific Rise." *Canadian Mineralogist* 34: 697-716.
- Moss, R. and S. D. Scott (2001). "Geochemistry and mineralogy of gold-rich hydrothermal precipitates from the eastern Manus Basin, Papua New Guinea." *The Canadian Mineralogist* 39(4): 957-978.
- Mottl, M. J. and C. G. Wheat (1994). "Hydrothermal circulation through midocean ridge flanks - Fluxes of heat and magnesium." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 58(10): 2225-2237.

- Mottl, M. J. and T. F. McConachy (1990). "Chemical processes in buoyant hydrothermal plumes on the East Pacific Rise near 21°N." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 54(7): 1911-1927.
- Mozgova, N. N., S. G. Krasnov, B. N. Batuyev, Y. S. Borodaev, A. V. Efimov, V. F. Markov and T. V. Stepanova (1996). "The first report of cobalt pentlandite from a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal deposit." *The Canadian Mineralogist* 34(1): 23-28.
- Muinos, S. B., J. R. Hein, M. Frank, J. H. Monteiro, L. Gaspar, T. Conrad, H. G. Pereira and F. Abrantes (2013). "Deep-sea Fe-Mn Crusts from the Northeast Atlantic Ocean: Composition and Resource Considerations." *Marine Georesources & Geotechnology* 31(1): 40-70.
- Mullineaux, L. S., D. K. Adams, S. W. Mills and S. E. Beaulieu (2010). "Larvae from afar colonize deep-sea hydrothermal vents after a catastrophic eruption." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(17): 7829-7834.
- Murphy, K. and J. Dymond (1984). "Rare earth element fluxes and geochemical budget in the eastern equatorial Pacific." *Nature* 307(5950): 444-447.
- Murray, J. W. and J. G. Dillard (1979). "The oxidation of cobalt (II) adsorbed on manganese dioxide." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43(5): 781-787.
- Nath, B. N., N. H. Khadge, S. Nabar, C. Raghukumar, B. S. Ingole, A. B. Valsangkar, R. Sharma and K. Srinivas (2012). "Monitoring the sedimentary carbon in an artificially disturbed deep-sea sedimentary environment." *Environmental Monitoring and Assessment* 184(5): 2829-2844.
- Nations Unies (1983). "Convention des Nations Unies sur le droit de la mer." 176p.
- Nations Unies (1992). "Convention sur la Diversité Biologique." 32p.
- Nielsen, S. G., A. Gannoun, C. Marnham, K. W. Burton, A. N. Halliday and J. R. Hein (2011). "New age for ferromanganese crust 109D-C and implications for isotopic records of lead, neodymium, hafnium, and thallium in the Pliocene Indian Ocean." *Paleoceanography* 26(2).
- Nielsen, S. G., M. Rehkämper, D. A. H. Teagle, D. A. Butterfield, J. C. Alt and A. N. Halliday (2006). "Hydrothermal fluid fluxes calculated from the isotopic mass balance of thallium in the ocean crust." *Earth and Planetary Science Letters* 251: 120-133.
- Normark, W. R., J. L. Morton, R. A. Koski, D. A. Clague and J. R. Delaney (1983). "Active hydrothermal vents and sulfide deposits on the southern Juan de Fuca Ridge." *Geology* 11(3): 158-163.
- O'Nions, R. K., S. R. Carter, R. S. Cohen, N. M. Evensen and P. J. Hamilton (1978). "Pb, Nd and Sr isotopes in oceanic ferromanganese deposits and ocean-floor basalts." *Nature* 273(5662): 435-438.
- Ondréas, H., M. Cannat, Y. Fouquet and A. Normand (2012). "Geological context and vents morphology of the ultramafic-hosted Ashadze hydrothermal areas (Mid-Atlantic Ridge 13° N)." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 13(11).
- Ondréas, H., M. Cannat, Y. Fouquet, A. Normand, P.-M. Sarradin and J. Sarrazin (2009). "Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10(2).
- Ono, S., W. C. Shanks, III, O. J. Rouxel and D. Rumble (2007). "S-33 constraints on the seawater sulfate contribution in modern seafloor hydrothermal vent sulfides." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 71(5): 1170-1182.

- Orowan, E., Ewing M., Le Pichon X. and Langseth M.G. (1966). Age of the ocean floor. *Science*. 154: 413-416.
- OSPAR (2010). "Background document for oceanic ridges with hydrothermal vents/fields." Biodiversity Series 490: 1-17.
- Oudin, E. and G. Constantinou (1984). "Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits." *Nature* 308(5957): 349-353.
- Ozima, M., M. Takayanagi, S. Zashu and S. Amari (1984). "High He-3-He-4 ratio in ocean sediments." *Nature* 311(5985): 448-450.
- Pašava, J., A. Vymazalová, S. Petersen and P. Herzig (2004). "PGE distribution in massive sulfides from the PACMANUS hydrothermal field, eastern Manus basin, Papua New Guinea: implications for PGE enrichment in some ancient volcanogenic massive sulfide deposits." *Mineralium Deposita* 39(7): 784-792.
- Paul, A. Z. (1976). "Deep-sea bottom photographs show that benthic organisms remove sediment cover from manganese nodules." *Nature* 263(5572): 50-51.
- Pautot, G. and M. Hoffert (1975). *Pacifique Sud Est = Cadre structural, morphologique et sédimentaire - Relations avec les nodules polymétalliques*. CNEXO/COB/DS, Contribution: 1-12.
- Peter, J. M. and S. D. Scott (1988). "Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of sea-floor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California." *The Canadian Mineralogist* 26(3): 567-587.
- Petersen, J. M., F. U. Zielinski, T. Pape, R. Seifert, C. Moraru, R. Amann, S. Hourdez, P. R. Girguis, S. D. Wankel, V. Barbe, E. Pelletier, D. Fink, C. Borowski, W. Bach and N. Dubilier (2011). "Hydrogen is an energy source for hydrothermal vent symbioses." *Nature* 476(7359): 176-180.
- Petersen, S., K. Kuhn, T. Kuhn, N. Augustin, R. Hékinian, L. Franz and C. Borowski (2009). "The geological setting of the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field (14 45' N, Mid-Atlantic Ridge) and its influence on massive sulfide formation." *Lithos* 112(1): 40-56.
- Petersen, S., P. Herzig, M. Hannington and J. Gemmel (2003). "Gold-rich massive sulfides from the interior of the felsic-hosted PACMANUS massive sulfide deposit, Eastern Manus Basin (PNG)." *Mineral exploration and sustainable development*. Millpress, Rotterdam: 171-174.
- Peterson, M. N. A. (1966). "Calcite: Rates of Dissolution in a Vertical Profile in the Central Pacific." *Science* 154(3756): 1542-1544.
- Pichocki, C. (1987). *Les encroûtements ferromanganésifères enrichis en cobalt : Caractérisation, genèse et signification géodynamique*. Thèse - Université de Bretagne Occidentale.
- Pichocki, C. and M. Hoffert (1987). "Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts sampled in French Polynesia." *Marine geology* 77(1): 109-119.
- Piepgas, D. J. and G. Wasserl (1982). "Isotopic Composition of Neodymium in Waters from the Drake Passage." *Science*. 217 (4556): 207-214
- Piper, D. Z. and B. Fowler (1980). "New constraint on the maintenance of Mn nodules at the sediment surface." *Nature* 286(5776): 880-883.

- Pratt, R. M. and P. F. McFarlin (1966). "Manganese pavements on the Blake plateau." *Science* 151(3714): 1080-1082.
- Presley, B. J., R. R. Brooks and I. R. Kaplan (1967). "Manganese and Related Elements in the Interstitial Water of Marine Sediments." *Science* 158(3803): 906-910.
- Price, J. (2010). "The world is changing." *Soc. Econ. Geol. Newsl* 82: 12-14.
- Proskurowski, G., M. D. Lilley, J. S. Seewald, G. L. Fruh-Green, E. J. Olson, J. E. Lupton, S. P. Sylva and D. S. Kelley (2008). "Abiogenic hydrocarbon production at Lost City hydrothermal field." *Science* 319(5863): 604-607.
- Puteanus, D., G. P. Glasby, P. Stoffers and H. Kunzendorf (1991). "Hydrothermal iron-rich deposits from the Teahitia-Mehitia and Macdonald hot-spot areas, Southwest Pacific." *Marine Geology* 98(2-4): 389-409.
- Rea, D. K. and M. Leinen (1985). Neogene history of the calcite compensation depth and lysocline in the South Pacific Ocean. *Nature*. 316: 805-807.
- Reeves, E. P., J. S. Seewald, P. Saccocia, W. Bach, P. R. Craddock, W. C. Shanks, S. P. Sylva, E. Walsh, T. Pichler and M. Rosner (2011). "Geochemistry of hydrothermal fluids from the PACMANUS, Northeast Pual and Vienna Woods hydrothermal fields, Manus Basin, Papua New Guinea." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75(4): 1088-1123.
- Rehkamper, M., Frank M., Hein J.R. and Halliday A. (2004). "Cenozoic marine geochemistry of thallium deduced from isotopic studies of ferromanganese crusts and pelagic sediments." *Earth and Planetary Science Letters* 219(1-2): 77-91.
- Reyss, J. L., Marchig V. and Ku T.L. (1982). Rapid growth of a deep sea manganese nodule. *Nature*. 295: 401-403.
- Rona, P. A. (1983). "Exploration for hydrothermal mineral-deposits at seafloor spreading centers." *Marine Mining* 4(1): 7-38.
- Rona, P. A. (1984). "Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centres." *Earth Science Reviews* 20: 1-104.
- Rona, P. A. (2003). "Resources of the sea floor." *Science* 299(5607): 673-674.
- Rona, P. A. (2008). "The changing vision of marine minerals." *Ore Geology Reviews* 33(3-4): 618-666.
- Rona, P. A., G. Klinkhammer, T. A. Nelsen, J. H. Trefry and H. Elderfield (1986). "Black smokers, massive sulfides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge." *Nature* 321(6065): 33-37.
- Rona, P. A., H. Bougault, J. L. Charlou, P. Appriou, T. A. Nelsen, J. H. Trefry, G. L. Eberhart, A. Barone and H. D. Needham (1992). "Hydrothermal circulation, serpentinization and degassing at a rift-valley fracture zone intersection - Mid-Atlantic Ridge near 15°N, 45°W." *Geology* 20(9): 783-786.
- Rona, P. A., M. D. Hannington, C. Raman, G. Thompson, M. K. Tivey, S. E. Humphris, C. Lalou and S. Petersen (1993). "Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge." *Economic Geology (plus the Bulletin of the Society of Economic Geologists);(United States)* 88(8).
- Rosenberg, N. D., J. E. Lupton, D. Kadko, R. Collier, M. D. Lilley and H. Pak (1988). "Estimation of heat and chemical fluxes from a seafloor hydrothermal vent field using radon measurements." *Nature* 334(6183): 604-607.

- Rossmann, R. and E. Callender (1968). "Manganese Nodules in Lake Michigan." *Science* 162(3858): 1123-1124.
- Roth, S. E. and J. Dymond (1989). "Transport and settling of organic material in a deep-sea hydrothermal plume - Evidence from particle-flux measurements." *Deep-Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers* 36(8): 1237-1254.
- Rouxel, O., N. Dobbek, J. Ludden and Y. Fouquet (2003). "Iron isotope fractionation during oceanic crust alteration." *Chemical Geology* 202(1-2): 155-182.
- Rouxel, O., W. C. Shanks Iii, W. Bach and K. J. Edwards (2008). "Integrated Fe- and S-isotope study of seafloor hydrothermal vents at East Pacific Rise 9-10°N." *Chemical Geology* 252(3-4): 214-227.
- Rouxel, O., Y. Fouquet and J. N. Ludden (2004a). "Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow, and Logatchev sea-floor hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge." *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 99(3): 585-600.
- Rouxel, O., Y. Fouquet and J. N. Ludden (2004b). "Subsurface processes at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: Evidence from sulfur, selenium, and iron isotopes." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 68(10): 2295-2311.
- Rudnicki, M. D. and H. Elderfield (1993). "A chemical model of the buoyant and neutrally buoyant plume above the TAG vent field, 26°N, Mid-Atlantic Ridge." *Geochim. Cosmochim. Acta* 57: 2939-2957.
- Saito, M. A., A. E. Noble, A. Tagliabue, T. J. Goepfert, C. H. Lamborg and W. J. Jenkins (2013). "Slow-spreading submarine ridges in the South Atlantic as a significant oceanic iron source." *Nature Geoscience* 6(9): 775-779.
- Sakai, H., H. Tsubota, T. Nakai, J. Ishibashi, T. Akagi, T. Gamo, B. Tilbrook, G. Igarashi, M. Kodera, K. Shitashima, S. Nakamura, K. Fujioka, M. Watanabe, G. McMurtry, A. Malahoff and M. Ozima (1987). "Hydrothermal activity on the summit of Loihi Seamount, Hawaii." *Geochemical Journal* 21: 11-21.
- Sander, S. G. and A. Koschinsky (2011). "Metal flux from hydrothermal vents increased by organic complexation." *Nature Geoscience* 4(3): 145-150.
- Sano, Y., K. Toyoda and H. Wakita (1985). "³He/⁴He ratios of marine ferromanganese nodules." *Nature* 317(6037): 518-520.
- Schlanger, S. O. (1974). "Hesting a hot-spot theory (Leg 33, Deep Sea Drilling Project)." *Geotimes* 19(3): 16-20.
- Schmale, O., M. Walter, J. Schneider von Deimling, J. Sültenfuß, S. Walker, G. Rehder and R. Keir (2012). "Fluid and gas fluxes from the Logatchev hydrothermal vent area." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 13(7).
- Schmidt, K., A. Koschinsky, D. Garbe-Schönberg, L. M. de Carvalho and R. Seifert (2007). "Geochemistry of hydrothermal fluids from the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field, 15 N on the Mid-Atlantic Ridge: Temporal and spatial investigation." *Chemical geology* 242(1): 1-21.
- Schmidt, K., A. Koschinsky-Fritsche and D. Garbe-Schönberg (2006). "Detailed geochemical investigation of hydrothermal fluids from the Logatchev field, 15°N, MAR." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70(18): A563.

- Schmitt, A.-D., S. J. Galer and W. Abouchami (2009). "Mass-dependent cadmium isotopic variations in nature with emphasis on the marine environment." *Earth and Planetary Science Letters* 277(1): 262-272.
- Schneider, G. I. C. and R. M. Miller (1992). *Diamonds. The Mineral Resources of Namibia*, 1st edition. Windhoek, Namibia, Ministry of Mines and Energy: 5.1-1–5.2-32.
- Schoell, M. and E. Faber (1978). "New isotopic evidence for the origin of Red Sea brines." *Nature* 275(5679): 436-438.
- Scholten, J., P. Stoffers, D. Garbe-Schönberg and M. Moammar (2000). "Hydrothermal mineralization in the Red Sea." *Handbook of marine mineral deposits*: 369-395.
- Scott, R. B., P. A. Rona, L. W. Butler, A. J. Nalwalk and M. R. Scott (1972). "Manganese crusts of the Atlantis fracture zone." *Nature* 239(92): 77-79.
- Segl, M., A. Mangini, G. Bonani, H. J. Hofmann, M. Nessi, M. Suter, W. Wolfli, G. Friedrich, W. L. Pluger, A. Wiechowski and J. Beer (1984). "Be-10-dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean palaeocirculation." *Nature* 309(5968): 540-543.
- Shapley, D. (1975). "Now, a draft sea law treaty-but what comes after?" *Science* 188: 918.
- Sharma, R. (2001). "Indian Deep-sea Environment Experiment (INDEX): An appraisal." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3295-3307.
- Sharma, R., B. N. Nath and S. J. Sankar (2005). "Monitoring the impact of simulated deep-sea mining in Central Indian Basin." *Marine Georesources & Geotechnology* 23(4): 339-356.
- Sharma, R., B. Nagendernath, A. B. Valsangkar, G. Parthiban, K. M. Sivakolundu and G. Walker (2000). "Benthic disturbance and impact experiments in the Central Indian Ocean Basin." *Marine Georesources & Geotechnology* 18(3): 209-221.
- Siebert, C., T. F. Nagler, F. vonBlanckenburg and J. D. Kramers (2003). "Molybdenum isotope records as a potential new proxy for paleoceanography." *Earth Planet. Sci. Lett.* 211: 159-171.
- Siegel, M. D. and S. Turner (1983). "Crystalline Todorokite Associated with Biogenic Debris in Manganese Nodules." *Science* 219(4581): 172-174.
- Sinton, J. (1997). "The Manus Spreading Center near 3°22' S and the Worm Garden hydrothermal site: results of Mir2 submersible dive 15." *Marine geology* 142(1): 207-209.
- Skirrow, R. and M. L. Coleman (1982). "Origin of sulphur and geothermometry of hydrothermal sulphides from the Galapagos Rift, 86°W." *Nature* 299(5879): 142-144.
- Smith, P. J. (1977). "Ferromanganese deposits: fast, fast, slow." *Nature* 265(5595): 582-583.
- Smith, R. E., J. D. Gassaway and H. N. Giles (1968). "Iron-Manganese Nodules from Nares Abyssal Plain: Geochemistry and Mineralogy." *Science* 161(3843): 780-781.
- Somayajulu, B. L. K. (1967). "Beryllium-10 in a Manganese Nodule." *Science* 156(3779): 1219-1220.
- Soule, S. A., V. L. Ferrini, J. C. Kinsey, D. J. Fornari, C. Sellers, S. M. White, K. Von Damm and S. M. Carbotte (2008). "Navigational infrastructure at the East Pacific Rise 9° 50' N area following the 2005–2006 eruption: Seafloor benchmarks and near-bottom multibeam surveys." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(11).

- Spaggiari, R. I., Bluck, B.J., Ward, J.D., (2006). "Characteristics of diamondiferous Plio-Pleistocene littoral deposits within the palaeo-Orange River mouth, Namibia." *Ore Geology Reviews* 28: 475–492.
- Spiess, F. N., K. C. Macdonald, T. Atwater, R. Ballard, A. Carranza, D. Cordoba, C. Cox, V. M. Diazgarcia, J. Francheteau, J. Guerrero, J. Hawkins, R. Haymon, R. Hessler, T. Juteau, M. Kastner, R. Larson, B. Luyendyk, J. D. Macdougall, S. Miller, W. Normark, J. Orcutt and C. Rangin (1980). "East Pacific Rise - hot springs and geophysical experiments." *Science* 207(4438): 1421-1433.
- Spivack, A. J. and H. Staudigel (1994). "Low-temperature alteration of the upper oceanic-crust and the alkalinity budget of seawater." *Chemical Geology* 115(3-4): 239-247.
- Stackelberg, U. V. (1997). Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru basin. Geological Society (London). Special Publication: 153-176.
- Statham, P. J., C. R. German and D. P. Connelly (2005). "Iron(II) distribution and oxidation kinetics in hydrothermal plumes at the Kairei and Edmond vent sites, Indian Ocean." *Earth and Planetary Science Letters* 236(3-4): 588-596.
- Staudigel, H., S. R. Hart, A. Pile, B. E. Bailey, E. T. Baker, S. Brooke, D. P. Connelly, L. Haucke, C. R. German, I. Hudson, D. Jones, A. A. P. Koppers, J. Konter, R. Lee, T. W. Pietsch, B. M. Tebo, A. S. Templeton, R. Zierenberg and C. M. Young (2006). "Vailulu'u seamount, Samoa: Life and death on an active submarine volcano." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(17): 6448-6453.
- Stein, C. A. and S. Stein (1994). "Constraints on hydrothermal heat flux through the oceanic lithosphere from global heat flow." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 99(B2): 3081-3095.
- Stein, J. S. and A. T. Fisher (2003). "Observations and models of lateral hydrothermal circulation on a young ridge flank: Numerical evaluation of thermal and chemical constraints." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4.
- Stuben, D., P. Stoffers, J. L. Cheminee, M. Hartmann, G. M. McMurtry, H. H. Richnow, A. Jenisch and W. Michaelis (1992). "Manganese, methane, iron, zinc, and nickel anomalies in hydrothermal plumes from Teahitia and Macdonald volcanos." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 56(10): 3693-3704.
- Styrt, M., A. Brackmann, H. Holland, B. Clark, V. Pisutha-Arnond, C. Eldridge and H. Ohmoto (1981). "The mineralogy and the isotopic composition of sulfur in hydrothermal sulfide/sulfate deposits on the East Pacific Rise, 21°N latitude." *Earth and Planetary Science Letters* 53(3): 382-390.
- Sunamura, M., Y. Higashi, C. Miyako, J. Ishibashi and A. Maruyama (2004). "Two bacterial phylotypes are predominant in the Suiyo Seamount hydrothermal plume." *Applied and Environmental Microbiology* 70(2): 1190-1198.
- Sunda, W. G. and S. A. Huntsman (1996). "Antagonisms between cadmium and zinc toxicity and manganese limitation in a coastal diatom." *Oceanography* 41(3) : 373-387.
- Sylvan, J. B., B. C. Pyenson, O. Rouxel, C. R. German and K. J. Edwards (2012). "Time-series analysis of two hydrothermal plumes at 9 ° 50'N East Pacific Rise reveals distinct, heterogeneous bacterial populations." *Geobiology* 10(2): 178-192.
- Takahashi, Y., H. Shimizu, A. Usui, H. Kagi and M. Nomura (2000). "Direct observation of tetravalent cerium in ferromanganese nodules and crusts by X-ray-absorption near-edge structure (XANES)." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 64(17): 2929-2935.

- Tao, C., J. Lin, S. Guo, Y. J. Chen, G. Wu, X. Han, C. R. German, D. R. Yoerger, N. Zhou, H. Li, X. Su, J. Zhu and D. Y. L.-D.-. Legs (2012). "First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge." *Geology* 40(1): 47-50.
- Thijssen, T. (1981). Reconnaissance survey of manganese nodules from the northern sector of the Peru basin. *Marine Mining*. 2: 385-428.
- Thomson, G., S. E. Humphris, B. Schroeder, M. Sulanowska and P. A. Rona (1988). "Active vents and massive sulfides at 26°N (TAG) and 23°N (Snakepit) on the Mid-Atlantic Ridge." *Canad. Miner* 26: 697-711.
- Thomson, W. (1873). Notes from the "Challenger". *Nature*: 51-53.
- Thys, A. (2003). "Sustainability and impact aspects of exploitation of marine salt, magnesium and bromine." *Journal of coastal research*: 912-918.
- Tivey, M. A., L. Levin, F. J. A. S. Barriga, R. Mills, G. Cherkashov, K. A. K. Raju, Y. Fouquet, X. Shi, M. D. Hannington, I. Thorseth, J. Kim and C. Van Dover (2011). InterRidge and international scientific research activities into Seafloor Mineralization at hydrothermal vent systems. OCEANS 2011.
- Tivey, M. K. (1995). "The influence of hydrothermal fluid composition and advection rates on black smoker chimney mineralogy: Insights from modeling transport and reaction." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(10): 1933-1949.
- Tivey, M. K. (2007). "Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits." *Oceanography* 20(1): 50-65.
- Tivey, M. K. and J. R. Delaney (1986). "Growth of large sulfide structures on the endeavour segment of the Juan de Fuca ridge." *Earth And Planetary Science Letters* 77(3-4): 303-317.
- Tolstoy, M., F. Waldhauser, D. R. Bohnenstiehl, R. T. Weekly and W. Y. Kim (2008). "Seismic identification of along-axis hydrothermal flow on the East Pacific Rise." *Nature* 451(7175): 181-U187.
- Toner, B. M., S. C. Fakra, S. J. Manganini, C. M. Santelli, M. A. Marcus, J. Moffett, O. Rouxel, C. R. German and K. J. Edwards (2009). "Preservation of iron(II) by carbon-rich matrices in a hydrothermal plume." *Nature Geoscience* 2(3): 197-201.
- Trefry, J. H. and S. Metz (1989). "Role of hydrothermal precipitates in the geochemical cycling of vanadium." *Nature* 342(6249): 531-533.
- Trefry, J. H., R. P. Trocine, G. P. Klinkhammer and P. A. Rona (1985). "Iron and copper enrichment of suspended particles in dispersed hydrothermal plumes along the Mid-Atlantic Ridge." *Geophysical Research Letters* 12(8): 506-509.
- Trocine, R. P. and J. H. Trefry (1988). "Distribution and chemistry of suspended particles from an active hydrothermal vent site on the Mid-Atlantic Ridge at 26°N." *Earth and Planetary Science Letters* 88(1-2): 1-15.
- Tufar, W. (1990). "Modern hydrothermal activity, formation of complex massive sulfide deposits and associated vent communities in the Manus back-arc basin (Bismarck Sea, Papua New Guinea)." *Mitt. Osterr. Geol. Ges* 82: 183-210.
- Turner, D. L. and R. D. Jarrard (1982). "K-Ar dating of the Cook-Austral island chain: A test of the hot-spot hypothesis." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 12(3-4): 187-220.

- Turner, S., M. D. Siegel and P. R. Buseck (1982). "Structural features of the odorokite intergrowths in manganese nodules." *Nature* 296(5860): 841-842.
- UNESCO (2006). "Water: A Shared Responsibility, United Nations World Water Development Report 2, World Water Assessment Programme. 550 pp."
- Urabe, T. and M. Kusakabe (1990). "Barite silica chimneys from the Sumisu Rift, Izu-Bonin Arc: possible analog to hematitic chert associated with Kuroko deposits." *Earth and Planetary Science Letters* 100(1): 283-290.
- Urabe, T., E. T. Baker, J. Ishibashi, R. A. Feely, K. Marumo, G. J. Massoth, A. Maruyama, K. Shitashima, K. Okamura, J. E. Lupton, A. Sonoda, T. Yamazaki, M. Aoki, J. Gendron, R. Greene, Y. Kaiho, K. Kisimoto, G. Lebon, T. Matsumoto, K. Nakamura, A. Nishizawa, O. Okano, G. Paradis, K. Roe, T. Shibata, D. Tennant, T. Vance, S. L. Walker, T. Yabuki and N. Ytrow (1995). "The effect of magmatic activity on hydrothermal venting along the superfast-spreading East Pacific Rise." *Science* 269(5227): 1092-1095.
- Usui, A. (1979). "Nickel and copper accumulation as essential elements in 10-A manganite of deep-sea manganese nodules." *Nature* 279(5712): 411-413.
- van de Fliedert, T., M. Frank, A. N. Halliday, J. R. Hein, B. Hattendorf, D. Gunther and P. W. Kubik (2004). "Tracing the history of submarine hydrothermal inputs and the significance of hydrothermal hafnium for the seawater budget—a combined Pb-Hf-Nd isotope approach." *Earth and Planetary Science Letters* 222(1): 259-273.
- Van Dover, C. L., C. R. Smith, J. Ardron, D. Dunn, K. Gjerde, L. Levin, S. Smith and C. Dinard Workshop (2012). "Designating networks of chemosynthetic ecosystem reserves in the deep sea." *Marine Policy* 36(2): 378-381.
- Verlaan, P. A., D. S. Cronan and C. L. Morgan (2004). "A comparative analysis of compositional variations in and between marine ferromanganese nodules and crusts in the South Pacific and their environmental controls." *Progress in Oceanography* 63(3): 125-158.
- Von Damm, K. L., H. S. John, K. T. Karl and A. T. Steve (2001). *Chemistry of Hydrothermal Vent Fluids*. Encyclopedia of Ocean Sciences. Oxford, Academic Press: 1246–1253.
- Von Damm, K. L., J. M. Edmond, C. I. Measures and B. Grant (1985b). "Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 49(11): 2221-2237.
- Von Damm, K. L., S. E. Oosting, R. Kozlowski, L. G. Buttermore, D. C. Colodner, H. N. Edmonds, J. M. Edmond and J. M. Grebmeier (1995). "Evolution of East Pacific Rise hydrothermal vent fluids following a volcanic-eruption." *Nature* 375(6526): 47-50.
- Von Damm, K. v., J. Edmond, B. Grant, B. Walden and R. Weiss (1985a). "Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21 N, East Pacific Rise." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49(11): 2197-2220.
- Walker, S. L. and E. T. Baker (1988). "Particle-size distributions within hydrothermal plumes over the Juan de Fuca Ridge." *Marine geology* 78(3): 217-226.
- Walter, M., Mertens, C., Stöber, U., German, C.R., Yoerger, D.R., Sültenfuß, J., Rhein, M., Melchert, B., Baker, E.T., (2010). "Rapid dispersal of a hydrothermal plume by turbulent mixing." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 57: 931–945.
- Wang, X. and W. E. G. Muller (2009). "Marine biominerals: perspectives and challenges for polymetallic nodules and crusts." *Trends in Biotechnology* 27(6): 375-383.

- Wang, X. H., Schlossmacher U., Wiens M., Schroder H.C. and Muller W.E.G. (2009). "Biogenic Origin of Polymetallic Nodules from the Clarion-Clipperton Zone in the Eastern Pacific Ocean: Electron Microscopic and EDX Evidence." *Marine Biotechnology* 11(1): 99-108.
- Weiss, R. F., P. Lonsdale, J. E. Lupton, A. E. Bainbridge and H. Craig (1977). "Hydrothermal plumes in Galápagos Rift." *Nature* 267(5612): 600-603.
- Wells, M. L., N. M. Price and K. W. Bruland (1995). "Iron chemistry in seawater and its relationship to phytoplankton: a workshop report." *Marine Chemistry* 48(2): 157-182.
- Wheat, C. G., R. A. Feely and M. J. Mottl (1996). "Phosphate removal by oceanic hydrothermal processes: An update of the phosphorus budget in the oceans." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 60(19): 3593-3608.
- Williams, D. L., K. Becker, L. A. Lawver and R. P. Vonherzen (1979). "Heat-flow at the spreading centers of the Guaymas Basin, Gulf of California." *Journal of Geophysical Research* 84(NB12): 6757-6769.
- Wilson, C., J. L. Charlou, E. Ludford, G. Klinkhammer, C. Chin, H. Bougault, C. German, K. Speer and M. Palmer (1996). "Hydrothermal anomalies in the Lucky Strike segment on the Mid-Atlantic Ridge (37 ° 17'N)." *Earth and Planetary Science Letters* 142(3-4): 467-477.
- Wolery, T. J. and N. H. Sleep (1976). "Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges." *The Journal of Geology*: 249-275.
- Wu, J., M. L. Wells and R. Rember (2011). "Dissolved iron anomaly in the deep tropical-subtropical
- Yang, R. J. and C. M. G. van den Berg (2009). "Metal Complexation by Humic Substances in Seawater." *Environmental Science & Technology* 43(19): 7192-7197.
- Zhu, X. K., R. K. O'Nions, Y. Guo and B. C. Reynolds (2000). "Secular Variation of Iron Isotopes in North Atlantic Deep Water." *Science* 287: 2000-2002.
- Zierenberg, R. A. and W. C. Shanks (1983). "Mineralogy and geochemistry of epigenetic features in metalliferous sediment, Atlantis-II Deep, Red-Sea." *Economic Geology* 78(1): 57-72.
- Zierenberg, R. A. and W. C. Shanks (1986). "Isotopic constraints on the origin of the Atlantis-II, Suakin and Valdivia Brines, Red-Sea." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 50(10): 2205-2214.
- Zierenberg, R. A., R. A. Koski, J. L. Morton and R. M. Bouse (1993). "Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge." *Economic Geology* 88(8): 2069-2098.
- Zierenberg, R. A., R. A. Koski, J. L. Morton and R. M. Bouse (1993). "Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge." *Economic geology* 88(8): 2069-2098.
- Zierenberg, R. A., Y. Fouquet, D. J. Miller, J. M. Bahr, P. A. Baker, T. Bjerkgaard, C. A. Brunner, R. C. Duckworth, R. Gable, J. Gieskes, W. D. Goodfellow, H. M. Groschel-Becker, G. Guerin, J. Ishibashi, G. Iturrino, R. H. James, K. S. Lackschewitz, L. L. Marquez, P. Nehlig, J. M. Peter, C. A. Rigsby, P. Schultheiss, W. C. Shanks, B. R. T. Simoneit, M. Summit, D. A. H. Teagle, M. Urbat and G. G. Zuffa (1998). "The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit." *Nature* 392(6675): 485-488.

Zierenberg, R. A., Y. Fouquet, D. Miller, J. Bahr, P. Baker, T. Bjerkgård, C. Brunner, R. Duckworth, R. Gable and J. Gieskes (1998). "The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit." *Nature* 392(6675): 485-488.

Chapitre 3

Techniques d'exploration et d'exploitation

Pilote scientifique :

Jérôme Dymont

Contributeurs :

Florian Besson

Coralie Coumert

Stéphanie Dupré

Jérôme Dymont

Yves Fouquet

Arnaud Gaillot

Cécile Konn

Nadine Le Bris

Marjolaine Matabos

Marie Morineaux

Hélène Ondréas

Ewan Pelleter

Olivier Rouxel

Carla Scalabrin

Philippe Saget

Pierre-Marie Sarradin

Jozée Sarrazin

Table des matières du chapitre 3

Chapitre 3. Techniques d'exploration et d'exploitation	247
3.1. Introduction	247
3.2. Techniques d'exploration scientifique	247
3.2.1. Principales flottes océanographiques	248
3.2.1.1. Flotte océanographique française	248
3.2.1.2. Flottes océanographiques européennes	251
3.2.1.3. Flotte océanographique américaine	254
3.2.1.4. Flotte océanographique canadienne	257
3.2.1.5. Flotte océanographique japonaise	258
3.2.1.6. Flotte océanographique indienne	260
3.2.1.7. Flotte océanographique russe	261
3.2.1.8. Flotte océanographique coréenne	263
3.2.1.9. Flotte océanographique chinoise	264
3.2.1.10. Flotte océanographique australienne	267
3.2.1.11. Flotte océanographique néo-zélandaise	268
3.2.2. Cartographie et prélèvements depuis la surface	269
3.2.2.1. Principaux instruments de prélèvements de surface	269
3.2.2.2. Cartographie de surface	270
Bathymétrie et imagerie acoustique	270
Sismique	275
Magnétisme, gravimétrie	276
3.2.3. Anomalies de la colonne d'eau	278
3.2.3.1. Détection par traceurs physique et chimique des panaches hydrothermaux	278
3.2.3.2. Détection physique des sorties de fluides dans la colonne d'eau à partir du navire	279
3.2.4. Prélèvements de surface : dragage, carottages	282
3.2.5. Etudes <i>in situ</i>	283
3.2.5.1. Les engins sous-marins	283
Les engins remorqués	283
Les engins télé-opérés (ROV)	284
Les submersibles habités	285
3.2.5.2. Les données acquises	293
Bathymétrie	293
Imagerie acoustique	294
Données acoustiques de la colonne d'eau	294
Observations <i>in situ</i>	295
Sismique	296
Gravimétrie, magnétisme	296
3.2.5.3. Forages d'exploration	297
Technique	298
Avantages et inconvénients	299
Analyse à bord	300
Les forages de sulfures hydrothermaux réalisés	300
3.3. Techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds	303
3.3.1. Techniques de surveillance ponctuelle à intervalle de temps régulier	303

3.3.1.1.	Observations (vidéo et photos)	303
3.3.1.2.	Cartographie optique OTUS	305
3.3.1.3.	Echantillonnage de la faune	305
	Substrats meubles	305
	Substrats durs	306
	Micro-organismes	306
3.3.1.4.	Collecte et analyse des fluides hydrothermaux	307
3.3.1.5.	Caractérisation physico chimique des habitats	307
3.3.2.	Techniques de surveillance en continu	309
3.3.2.1.	Surveillance acoustique : le module BOB	309
3.3.2.2.	Les mouillages long terme : courantomètres et pièges à particules	311
	Matériel utilisé	311
	Analyses	312
3.3.2.3.	Les observatoires de fond de mer	312
	Observatoires câblés	313
	Observatoires non câblés	317
3.4.	Techniques d'exploitation utilisées ou en cours de développement par les entreprises et organismes de recherche.	320
3.4.1.	Nodules	320
3.4.1.1.	Spécificités d'une exploitation minière des nodules	320
	Impératifs techniques	320
	Impératifs économiques	321
3.4.1.2.	Trois grandes filières de ramassage	321
	Système de ramassage par bennes ou « procédé CLB » (Continuous Line Bucket)	321
	Systèmes de ramassage hydrauliques (hydraulic – lift et air – lift)	323
	Systèmes de navettes autonomes (système PLA) et le chantier sous-marin français	324
3.4.1.3.	Chantier de ramassage hydraulique français (Herrouin et al, 1989)	326
3.4.1.4.	Quelques travaux plus récents	331
	Concepts développés par Aker Solutions Drilling Technologies (Allemagne)	331
	Concepts développés par Korea Institute of Ocean Science and Technology (Corée du Sud)	332
3.4.2.	Encroûtements hydrogénétiques (ou cobaltifères)	332
3.4.3.	Sulfures hydrothermaux	335
3.4.3.1.	Techniques d'exploitation envisagées par Nautilus Minerals pour Solwara 1	335
3.4.3.2.	Techniques d'exploitation envisagées par Neptune Minerals	337
3.4.4.	Autres ressources liées à l'hydrothermalisme océaniques	337
3.4.4.1.	Techniques d'exploitation des boues minéralisées de mer Rouge envisagées par Diamond Fields International	337
3.4.4.2.	Techniques d'exploitation de l'énergie thermique des sites hydrothermaux envisagées par Marshall Hydrothermal	338
3.5.	Entreprises, acteurs, états impliqués (opérateurs et fournisseurs)	339
3.5.1.	Organisations impliquées dans l'exploration et ayant vocation à exploiter les ressources minérales marines	339

3.5.1.1.	Nodules	339
3.5.1.2.	Encroûtements	340
3.5.1.3.	Sulfures	340
3.5.2.	Organisations fournissant des services technologiques aux précédentes	341
3.5.2.1.	Exploration	341
3.5.2.2.	Exploitation	342
3.5.3.	Instituts de recherche poursuivant des travaux dans le domaine des ressources minérales marines	343
3.6.	Conclusion sur les points de vigilance	345
3.6.1.	Exploration, connaissance et suivi	345
3.6.2.	Exploitation	345
	Acronymes	349
	Bibliographie	352

Liste des figures du chapitre 3

Figure 3-1	Submersible Jialong.	265
Figure 3-2	Principe de fonctionnement des sondeurs multifaisceaux, technique des faisceaux croisés © Ifremer.	271
Figure 3-3	Représentation en perspective 3D de la bathymétrie et de la réflectivité d'une même zone, sondeur EM122 (12kHz) N/O L'Atalante © Ifremer.	271
Figure 3-4	Exemple de données de réflectivité enregistrée dans la colonne d'eau; on distingue nettement deux panaches de gaz (en rouge la navigation suivie par le navire) © Ifremer.	272
Figure 3-5	Structure cartographiée avec l'EMI22 (12kHz) depuis l'Atalante en surface © Ifremer.	275
Figure 3-6	Même structure cartographiée avec l'EM2000 (200 k Hz) sur l'AUV AsterX à 60m de fond : le gain en résolution est évident © Ifremer.	275
Figure 3-7	Interface du sondeur EM302 avec à gauche la représentation de la bathymétrie et de la réflectivité et à droite la visualisation des échos de panaches de gaz dans la colonne d'eau (N.O. Le Suroît, campagne Marmesonet, Central High, sonde 333 m).	279
Figure 3-8	Cartographie des anomalies acoustiques observées dans la colonne d'eau pendant la campagne Marmesonet et attribuées de manière préliminaire aux sources de gaz (N.O. Le Suroît, © Ifremer).	280
Figure 3-9	Panache générée par des bulles d'une source froide détectée dans le golfe de Californie avec le sondeur EM122 de L'Atalante (sonde 1700 m).	280
Figure 3-10	Découverte d'un site hydrothermal à 1600 m de profondeur à partir de l'identification visuelle des échos observés dans les données de colonne d'eau acquises par un sondeur multifaisceaux installé sous la coque du navire © Ifremer.	281
Figure 3-11	Echogramme polaire obtenu avec le sondeur de coque EM302 montrant l'écho du carottier à 300 m de la surface (cercle rouge) et les échos d'une source de gaz à 600 m de profondeur (ellipse jaune). Ce suivi, effectué en temps réel, permet d'orienter les opérations de prélèvement afin d'être au plus proche de la cible à échantillonner (source hydrothermale ou de gaz, pockmark, etc.), © Ifremer.	281
Figure 3-12	Echogramme polaire obtenu avec le sondeur de coque EM122 (à gauche) avec le point d'arrivée au fond de la bathysonde rosette (4000 m, cercle rouge) et le positionnement de l'opération (à droite) sur la cartographie de la zone (© Ifremer, logiciel SSC/GLOBE/3DV).	281
Figure 3-13	Vue du ROV Victor 6000 © Ifremer.	285
Figure 2-14	A gauche : mise à l'eau du submersible Nautila à partir du N/O L'Atalante. A droite : les AUV AsterX et IdéfiX © Ifremer.	286
Figure 3-15	Principe d'acquisition des données de bathymétrie HR et mosaïque OTUS par le ROV Victor © Ifremer.	293
Figure 3-16	Carte haute résolution de la zone Lucky Strike (Atlantique Nord; Ondréas et al, 2009) acquise par le sondeur du ROV Victor6000.	294
Figure 3-17	Sources de gaz (à gauche) et hydrothermale (à droite) détectées avec le sondeur monofaisceau 200 kHz installé sur le ROV VICTOR.	295
Figure 3-18	Exemple d'une cheminée hydrothermale active (à gauche) et d'une cheminée non-active (à droite) détectées, identifiées et localisées à partir des données acoustiques de colonne d'eau acquises avec le sondeur	

	EM2040 installé sur un AUV (© Ifremer, logiciel SSC/GLOBE/3DV).	295
Figure 3-19	Schéma des différents types de forages et de leur fonctionnement utilisés pour l'exploration des sulfures hydrothermaux, illustré des têtes ou outils de forage respectifs.	299
Figure 3-20	Les deux premières campagnes du module BOB (Bubble OBservation) ont été effectuées en mer de Marmara afin d'étudier la variabilité du débit d'émissions de gaz identifiées par 1200 m et 350 m.	310
Figure 3-21	Schéma du module actuel BOB (à gauche) et visualisation des mesures acoustiques acquises par BOB pendant 4 j ours en mer de Marmara (Marmesonet 2009) représentant la position et l'intensité des sources de gaz détectées au fond (Cinarcik Basin, 1200 m de profondeur).	310
Figure 3-22	Représentation 3D de la vitesse du courant mesurée avec un ADCP 75 kHz et 300 kHz à différentes altitudes par rapport au sédiment dans le canyon sous-marin du Var par 1200m de profondeur au moment du passage d'un courant de turbidité.	311
Figure 3-23	Piège à particules posé sur le sédiment d'une zone de fluide froid riche en bivalves et polychètes.	312
Figure 3-24	Schéma décrivant la structure d'un observatoire câblé sur l'exemple de VENUS (ONC, UVic, C.-B., Canada).	315
Figure 3-25	Carte de localisation des 12 sites observatoires du réseau EMSO.	318
Figure 3-26	Schéma décrivant l'infrastructure de l'observatoire non-câblé MoMAR, déployé sur le champ hydrothermal Lucky Strike. © Ifremer	318
Figure 3-27	Les différents éléments de l'observatoire MOMAR.	320
Figure 3-28	Différentes versions du CLB.	322
Figure 3-29	Descente d'une drague sur le câble du CLB.	323
Figure 3-30	Vue d'artiste du chantier sous-marin à navettes autonomes.	325
Figure 3-31	Maquette du PLA 2.	326
Figure 3-32	Vue d'artiste et principe du chantier de ramassage par air-lift.	327
Figure 3-33	Systèmes de remontée hydraulique.	328
Figure 3-34	Concept développé par Aker Solutions Drilling Technologies (Knodt, 2013).	331
Figure 3-35	Concept développé par Kiost (Hong et al, 2013).	332
Figure 3-36	Modèle de collecteur (Halkyard, 1985).	333
Figure 3-37	Système minier japonais (Chung, 1996).	334
Figure 3-39	Vue d'artiste du système d'exploitation imaginé par Nautilus pour le site de Solwara 1	336
Figure 3-40	Engins miniers sur le fond utilisés pour fragmenter et ramasser le minerai	336
Figure 3-41	Exemple de carottes de boues métallifères de mer Rouge (Diamond Fields International).	337
Figure 3-42	Concept d'exploitation de l'énergie thermique des sites hydrothermaux actifs (Marshall Hydrothermal).	338
Figure 3-43	Points de vigilance relevés sur un système idéalisé d'exploitation des nodules polymétalliques (haut; source: AIFM) et des sulfures hydrothermaux (bas; Collins et al, 2013).	348

Liste des tableaux du chapitre 3

Tableau 3-1 Principaux navires de recherche océanographique (N/O) français.	249
Tableau 3-2 Principaux navires de recherche océanographique européens (hors Allemagne).	251
Tableau 3-3 Principaux navires de recherche océanographique allemands	253
Tableau 3-4 Principaux navires de recherche océanographique américains rattachés à l'UNOLS	254
Tableau 3-5 Principaux navires de recherche océanographique américains non rattachés à l'UNOLS.	256
Tableau 3-6 Principaux navires de recherche océanographique canadiens (CCGS : Canadian Coast Guard Ship).	257
Tableau 3-7 Principaux navires de recherche océanographique japonais.	258
Tableau 3-8 Principaux navires de recherche océanographique indiens.	260
Tableau 3-9 Principaux navires de recherche océanographique russes.	261
Tableau 3-10 Engins submersibles de recherche océanographique russes.	262
Tableau 3-11 Principaux navires de recherche océanographique coréens.	263
Tableau 3-12 Principaux navires de recherche océanographique chinois.	264
Tableau 3-13 Principaux navires de recherche océanographique australiens.	267
Tableau 3-14 Principaux navires de recherche océanographique néo-zélandais.	268
Tableau 3-15 Instruments de prélèvements de surface ou dédiés à d'autres fonctions connexes utilisés pour l'exploration des nodules (N), encroûtements (E) et sulfures (S).	269
Tableau 3-16 Les différentes portées des sondeurs, caractéristiques et applications.	272
Tableau 3-17 Récapitulatif des caractéristiques de sondeurs utilisés par l'Ifremer.	274
Tableau 3-18 Principaux ROV utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 3000 m de profondeur.	287
Tableau 3-19 Principaux submersibles habités utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 3 000 m de profondeur.	288
Tableau 3-20 Quelques AUVs utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 1000m de profondeur.	290
Tableau 3-21 Principaux HROVs utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 1000m de profondeur.	291
Tableau 3-22 Quelques exemples d'acquisitions possibles en fonction du mode de déploiement des engins inhabités.	293
Tableau 3-23 Résumé des campagnes de forage sur le projet Solwara (Lipton 2012).	301
Tableau 3-24 Caractéristiques principales des différents rigs de forage robotisés existants (non-exhaustif).	302
Tableau 3-25 Liste non-exhaustive des observatoires/réseaux câblés profonds et côtiers pour l'étude multidisciplinaire des écosystèmes (adapté de Matabos et al, sous presse).	313
Tableau 3-26 Liste des instruments déployés sur le site d'Endeavour de NEPTUNE Canada (source : www.neptunecanada.ca , photos : ONC/CSSF).	316

Chapitre 3. Techniques d'exploration et d'exploitation

3.1. Introduction

Ce chapitre décrit les principales techniques d'exploration des fonds océaniques (partie 3.2), puis les techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds (partie 3.3), avant d'aborder les techniques d'exploitation envisagées pour les ressources minérales profondes (partie 3.4). Cette troisième partie est divisée suivant le type de ressources considérées. Une liste non exhaustive des principaux acteurs impliqués est ensuite présentée (partie 3.5), avant quelques remarques sur les points de vigilance à garder en mémoire (partie 3.6).

3.2. Techniques d'exploration scientifique

L'exploration et l'étude des grands fonds océaniques impliquent des stratégies multi-échelles mettant en œuvre des technologies spécifiques (directes et indirectes) pour comprendre les processus géologiques et chimiques à l'œuvre, évaluer qualitativement et quantitativement les minéralisations et caractériser les environnements et la biodiversité. Aucune étude *in situ* ne peut être entreprise sans disposer d'une connaissance générale approfondie de la zone potentiellement intéressante, connaissance qui passe par des levés de surface à grande échelle réalisés à l'aide de méthodes indirectes telles que les méthodes acoustiques (bathymétrie, réflectivité), potentielles (gravimétrie et magnétisme) ou sismiques. L'étude scientifique de ces premiers levés (morphologie, tectonique, nature du substrat...) permet de mieux comprendre le contexte géologique général (présence et, le cas échéant, épaisseur de sédiments, environnement basaltique ou ultramafique), les relations entre les structures tectoniques (failles, fissures) et les sorties de fluides. Durant cette première phase de reconnaissance générale, la réalisation de prélèvements d'eau permet d'évaluer les anomalies physiques et chimiques (salinité, néphélométrie, méthane, hydrogène...) de la colonne d'eau et de cerner la localisation possible de sites hydrothermaux actifs. Pour les zones inactives qui ne peuvent être repérées par un panache hydrothermal, une méthodologie basée sur les techniques géophysiques doit être mise en œuvre.

La suite de l'exploration voit la mise en œuvre d'engins *in situ* (AUV, ROV, submersibles) à une toute autre échelle. Portés par les engins sous-marins déployés près du fond, les outils de levés cartographiques (bathymétrie, imagerie) permettent la réalisation de cartes à haute résolution indispensables pour connaître précisément la morphologie des fonds et leur structuration. Durant de récentes campagnes océanographiques, ces nouvelles données ont permis d'orienter les plongées futures de la campagne sur des cibles identifiées et de trouver des sites actifs et fossiles rapidement. Les observations visuelles du ROV ou des submersibles permettent ensuite une description détaillée de ces sites. Des prélèvements de roches, de faune, de fluide, des mesures et analyses sur les objets précédemment identifiés complètent l'étude de détail. Enfin des forages plus ou moins profonds permettent d'affiner la connaissance de la distribution spatio-temporelle des minéralisations.

Les stratégies de recherche mises en œuvre voient se dérouler une succession de techniques emboîtées à différentes échelles, dans une approche pluridisciplinaire impliquant géologie, colonne d'eau, et finalement biologie. La plupart de ces techniques sont communes aux opérateurs académiques et industriels, voire militaires. Les investissements réalisés, lorsqu'ils sont publics, conduisent à l'archivage des données et échantillons collectés au sein de bases de données, et leur mutualisation au sein de la communauté scientifique nationale et internationale.

3.2.1. Principales flottes océanographiques

Les navires hauturiers sont le support essentiel des recherches scientifiques en domaine océanique profond. Outre les premières études effectuées depuis la surface, ils permettent le déploiement des engins submersibles qui, seuls, offrent un accès direct aux grands fonds. Les sections ci-dessous présentent les principales flottes hauturières mondiales (France, Europe, Etats-Unis d'Amérique, Canada, Japon, Inde, Russie, Corée, Chine, Australie et Nouvelle Zélande) qui peuvent mettre en œuvre un sous-marin habité et/ou téléguidé, ainsi que les navires présentant des caractéristiques océanographiques pertinentes pour l'étude des grands fonds. Seules les flottes académiques sont décrites, hors opérateurs privés. Cette description n'est pas exhaustive. Les flottes et équipements des différents pays ont évolué de manière variée. Les flottes européennes (et donc française), américaine, japonaise et russe se sont constituées dans les années 1960 et 70 et se sont depuis renouvelées progressivement, alors que les flottes chinoise, indienne et coréenne sont plus récente et se développent rapidement.

3.2.1.1. Flotte océanographique française

Cinq navires océanographiques composent la flotte française hauturière.






Le *Pourquoi Pas ?* est le plus récent. Sa taille, sa surface de laboratoire, ses équipements, ses capacités à accueillir une importante équipe de scientifiques, ainsi que sa capacité de mise en œuvre alternative possible de deux équipements lourds, de type *Nautile*, *Victor 6000* ou autres engins, remorqués ou non remorqués, lors d'une même mission (alternativement), en fait un bateau très prisé pour l'exploration des grands fonds (Tableau 3-1).

L'*Atalante*, plus ancien mais rénové en 2009, permet également de mettre en œuvre de manière efficace un engin sous-marin lourd, de type *Nautile* ou *Victor*, éventuellement accompagné d'un engin plus léger tel un drone sous-marin ou AUV.

La *Thalassa* est un navire moderne plus petit, qui peut mettre en œuvre *Victor* pour des missions de durée limitée. Le *Suroît*, navire ancien modernisé en 1999, permet par sa faible hauteur sur l'eau de déployer un drone sous-marin.

Enfin, le *Marion Dufresne*, navire de recherche ayant également la fonction de ravitailleur des Terres Australes et Antarctiques Françaises, est par conséquent très haut sur l'eau et n'est actuellement pas utilisé avec les engins sous-marins; cette situation pourrait changer après la refonte de ce navire, prévue en 2015, avec la possible mise en œuvre d'engins téléguidés de type *Victor*.

Tableau 3-1 Principaux navires de recherche océanographique (N/O) français.

Nom	Suroît	Thalassa	Atalante	Pourquoi Pas ?	Marion Dufresne
Photo					
Descriptif	Navire océanographique pluridisciplinaire, (géosciences marines, océanographie physique, biologie marine)	Navire océanographique pluridisciplinaire (halieutique, géosciences marines, océanographie physique, biologie marine)	Navire océanographique pluridisciplinaire, (géosciences marines, océanographie physique, biologie marine)	Navire océanographique pluridisciplinaire, (géosciences marines, océanographie physique, biologie marine)	Navire océanographique et de logistique des îles subantarctiques françaises
Année de construction	1975, modernisé en 1999	1996	1989, modernisé en 2009	2005	1995
Propriétaire	Ifremer	Ifremer	Ifremer	Ifremer	IPEV et TAAF
Longueur hors-tout (m)	56	74	85	108	120,5
Largeur hors-tout (m)	11	15	16	20	20,6
Zone d'intervention	Tous océans hors zones polaires	Tous océans hors zones polaires	Tous océans hors zones polaires	Tous océans hors zones polaires	Tous océans
Longueur de câble (m)	4 500	-	8 000	8 000	-
Equipage (nombre)	16 à 23	16 à 25	17 à 30	18 à 33	30 à 50
Scientifiques embarqués incluant les équipes techniques engins et équipements (nombre)	14	25	30	40	110 passagers
Surface de locaux scientifiques (m²)	32	84 (4 laboratoires)	130 (8 laboratoires)	180	650
Emplacement conteneurs laboratoires et techniques (nombre)	4 emplacements conteneurs 20 pieds	4 emplacements conteneurs 20 pieds	7 emplacements conteneurs 20 pieds	20 emplacements conteneurs 20 pieds	Possibilité de nombreux conteneurs sur les ponts et plate-forme hélicoptère








ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

<p>Mise en œuvre de ROV et sous-marin habité</p>	<p>NON</p>	<p>Robot télé-opéré <i>Victor 6000</i> (mise en œuvre occasionnelle)</p>	<p>Submersible habité du type Nautille et robot télé-opéré Victor 6000.</p>	<p>Mise en œuvre alternative possible de deux équipements lourds, type Nautille, Victor 6000 ou engin remorqué ou non remorqué type Penfeld (même mission, alternativement)</p>	<p>NON</p>
<p>Adresse internet</p>	<p>http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Le-Suroit</p> <p>http://flotte.ifremer.fr/Prese-ntation-de-la-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Le-Suroit</p> <p>Consultées le 3 mai 2013.</p>	<p>http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Thalassa</p> <p>http://flotte.ifremer.fr/Prese-ntation-de-la-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Thalassa</p> <p>Consultées le 3 mai 2013.</p>	<p>http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/L-Atalante</p> <p>http://flotte.ifremer.fr/Prese-ntation-de-la-flotte/Navires/Navires-hauturiers/L-Atalante</p> <p>Consultées le 3 mai 2013.</p>	<p>http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Pourquoi-pas</p> <p>http://flotte.ifremer.fr/Prese-ntation-de-la-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Pourquoi-pas</p> <p>Consultées le 3 mai 2013.</p>	<p>http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Marion-Dufresne</p> <p>Consultée le 3 mai 2013.</p>

3.2.1.2. Flottes océanographiques européennes

Quatorze navires océanographiques sont présentés pour les flottes européennes, dont six pour la flotte allemande (Tableaux 3-2et 3-3). La plupart de ces navires hauturiers sont capables de porter des véhicules sous-marins, plus ou moins lourds suivant les cas.






Tableau 3-2 Principaux navires de recherche océanographique européens (hors Allemagne).

Nom	James Cook	J.C. Ross	Sarmiento de Gamboa	Pelagia	G.O. Sars	H. Mosby	Don Carlos I
Photo							
Descriptif	Royal Research Ship (RRS)	Royal Research Ship (RRS)	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche
Pays	Royaume-Uni	Royaume-Uni	Espagne	Pays-Bas	Norvège	Norvège	Portugal
Port d'attache	-	Stanley, Falkland Islands	-	-	-	-	-
Année de construction	2006	1991	2006	1991	2003	1980	1989 (rénové en 2002)
Opérateur	Natural Environment Research Council (NERC)	British Antarctic Survey	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)	Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ)	Institute of Marine Research	Geophysical Institute of the University of Bergen and Institute of Marine Research (IMR)	Instituto Hidrográfico
Propriétaire	NERC Research Ship Unit	-	Unidad de Tecnología Marina	Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ)	Institute of Marine Research	University of Bergen	Marinha de Guerra Portuguesa - Instituto Hidrográfico
Longueur (m)	89	99	70	66	77	47	68
Largeur (m)	18,6	18,8	15	13	16	10	13
Zone d'intervention	Tous océans, zones polaires incluses	Zones polaires	Tous océans,	Tous océans	Mer de Brent, mer de Norvège, mer	Zone Economique exclusive	Côtes portugaises,

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

					du Nord, Atlantique Nord Est	(incluant les mers côtières du Spitzberg)	Madère et Açores, Atlantique Nord
Equipage (nb)	22	26	16	10	15	13	34
Scientifiques embarqués (nb)	32	50	25	15	30	16	15
Surface de locaux scientifiques (m²)	-	-	55 (laboratoire humide)	45	26	50	38
Mise en œuvre de ROV et submersibles	-	ISIS	Victor 6000	Quest	ROV	ROV	Petit ROV
Adresse internet	http://noc.ac.uk/research-at-sea/ships/rrs-james-cook Consultée le 3 mai 2013.	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=37 Consultée le 17 juillet 2013	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=979 Consultée le 17 juillet 2013	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=100#Top Consultée le 17 juillet 2013	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=109 Consultée le 17 juillet 2013	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=108 Consultée le 17 juillet 2013	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=527 Consultée le 17 juillet 2013








Tableau 3-3 Principaux navires de recherche océanographique allemands

Nom	Maria S. Merian	Sonne	Meteor	Polarstern	Poseidon
Photo					
Descriptif	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche	Navire de recherche
Pays	Allemagne	Allemagne	Allemagne	Allemagne	Allemagne
Port d'attache	Rostock, Allemagne	Bremen, Allemagne	Hamburg, Allemagne	-	-
Année de construction	2006	1968	1986	1982	1976
Opérateur	German Research Foundation	RF Forschungsschiffahrt GmbH	German Research Foundation	Reederei F. Laeisz (Bremerhaven) GmbH	IFM-GEOMAR, Kiel, Germany
Propriétaire	State of Mecklenburg Vorpommern, Baltic Sea Research Institute Warnemünde	RF Forschungsschiffahrt GmbH	République fédérale d'Allemagne	Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research	Leibniz-Institute for Marine-Science at the University of Kiel (IFM-GEOMAR)
Longueur (m)	94,8	97,61	97,5	118	61
Largeur (m)	19,2	14,20	16,5	25	11
Zone d'intervention	Atlantique Nord	Océans Pacifique et Indien	Tous océans	Tous océans, zones polaires incluses	Tous océans
Equipage (nb)	23	25	34	44	15
Scientifiques embarqués (nb)	23	25	30	50	11
Surface de locaux scientifiques (m ²)	390	26	400	-	87
Mise en œuvre de ROV et submersibles	Quest	Quest	Quest	Victor	Cherokee
Adresse internet	http://www.io-warnemuende.de/fs-maria-s-merian.html Consultée le 3 mai 2013.	http://www.rf-bremen.de/flotte.html Consultée le 3 mai 2013.	http://cdiac.ornl.gov/oceans/met.html Consultée le 3 mai 2013.	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=260 Consultée le 17 juillet 2013.	http://www.researchvessels.org/ship_info_display.asp?shipID=261 Consultée le 17 juillet 2013.

3.2.1.3. Flotte océanographique américaine

L'UNOLS, University National Oceanographic Laboratory System, est un consortium regroupant 62 instituts et laboratoires américains de recherche océanographique. Il programme des campagnes scientifiques sur 21 navires de recherches (<http://www.unols.org/>). Sept de ces navires sont destinés à l'exploration des grands fonds (plus de 1000 m de profondeur). L'Atlantis est le navire spécifiquement dédié à l'utilisation du sous-marin habité américain Alvin. Le Thomson est un navire fréquemment utilisé pour le déploiement du sous-marin téléguidé canadien ROPOS au large des côtes ouest canadienne et américaine (Tableau 3-4).


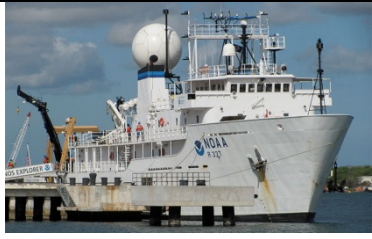
Tableau 3-4 Principaux navires de recherche océanographique américains rattachés à l'UNOLS

Nom	MELVILLE	KNORR	THOMPSON	ROGER REVELLE	ATLANTIS	MARCUS LANGSETH	AGOR 28
Photo							
Opérateur	Scripps Institution of Oceanography	Woods Hole Oceanographic Institution	University of Washington	Scripps Institution of Oceanography	Woods Hole Oceanographic Institution	Lamont-Doherty Earth Observatory	Scripps Institution of Oceanography
Propriétaire	Marine Nationale	Marine Nationale	Marine Nationale	Marine Nationale	Marine Nationale	Marine Nationale	Marine Nationale
Longueur (m)	85	85	83	83	83	71	72
Zone d'intervention	Tous océans	Tous océans	Tous océans	Tous océans	Tous océans	Tous océans	Tous océans
Port d'attache	San diego, CA, USA	Woods Hole, MA, USA	Seattle, WA, USA	San Diego, CA, USA	Woods Hole, MA, USA	Palisades, NY, USA	-
Année de construction	1969	1969	1988	1996	1997	1991	En construction - lancement en 2015
Equipage (nombre)	23	22	22	22	24	20	20
Scientifiques embarqués (nombre)	38	32	36	37	36	35	24
Surface de locaux scientifiques	245	256	261	372	327	382	186

(m²)							
Surface de pont disponible (m ²)	376	-	251	378	-	-	416
Mise en œuvre de ROV et submersibles	Jason II	NON	Jason II ROPOS	Jason II	Alvin Jason II	Jason II	-
Adresse internet	http://shipsked.ucsd.edu/ships/melville/ Consultée le 3 mai 2013.	http://www.whoi.edu/page.do?pid=8157 Consultée le 3 mai 2013.	http://www.ocean.washington.edu/story/RV+Thomas+G+Thompson Consultée le 3 mai 2013.	http://shipsked.ucsd.edu/Ships/Roger_Revelle/ Consultée le 3 mai 2013.	http://www.whoi.edu/page.do?pid=8143 Consultée le 3 mai 2013.	http://www.ldeo.columbia.edu/research/office-of-marine-operations/rv-langseth/rv-langseth-specs Consultée le 3 mai 2013.	http://shipsked.ucsd.edu/Ships/AGOR28/ Consultée le 3 mai 2013.

Deux autres navires, non rattachés à l'UNOLS, sont également utilisés dans l'exploration des grands fonds : le Falkor, navire océanographique appartenant à la Fondation Schmidt et l'Okeanos Explorer de la NOAA. L'Okeanos permet une exploration des écosystèmes profonds par télésience et permet ainsi à une soixantaine de scientifiques de participer à la campagne tout en restant à terre. Des vidéos et des photos de très haute définition sont acquises au cours des missions d'exploration. A ce jour, aucun prélèvement « physique » n'est effectué lors de ces campagnes (Tableau3-5).



Tableau 3-5 Principaux navires de recherche océanographique américains non rattachés à l'UNOLS.

Nom	Falkor	Okeanos Explorer
Photo		
Descriptif	Bateau de pêche reconverti en navire océanographique	Navire océanographique destiné à la cartographie, la caractérisation et la reconnaissance des sites, la vulgarisation scientifique
Pays	Iles Cayman	USA
Port d'attache	Georgetown, îles Cayman	-
Année de construction	1981, rénové de 2009 à 2012	-
Opérateur	Schmidt Ocean Institute	NOAA
Propriétaire	Schmidt Ocean Institute	-
Longueur (m)	82,9	68,3
Largeur (m)	13,0	13,0
Equipage (nb)	19	27
Scientifiques embarqués (nb)	18	19 et de nombreux scientifiques par télésience
Surface de locaux scientifiques (m ²)	32 (laboratoire humide) 51 (laboratoire sec)	-
Mise en œuvre de ROV et submersibles	Cherokee	2 sous-marins avec possibilité d'atteindre 4000 m.
Adresse internet	http://www.schmidtocean.org/story/show/47 Consultée le 3 mai 2013.	http://oceanexplorer.noaa.gov/okeanos/about.html Consultée le 3 mai 2013.

3.2.1.4. Flotte océanographique canadienne

Deux navires océanographiques composent principalement la flotte scientifique canadienne. Tous deux appartiennent à la garde côtière canadienne. Le John P. Tully, de par son positionnement sur la côte ouest du Canada, est utilisé pour le déploiement du sous-marin téléguidé canadien ROPOS pour l'exploration scientifique des sources hydrothermales au large du Canada et des Etats-Unis (Tableau 3-6).







Tableau 3-6 Principaux navires de recherche océanographique canadiens (CCGS : Canadian Coast Guard Ship).

Nom	CCGS John P. Tully	CCGS Hudson
Photo		
Propriétaire	Garde côtière canadienne	Garde côtière canadienne
Type d'intervention	Recherche océanographique hauturière	Recherche océanographique hauturière
Longueur (m)	65,7	90,4
Largeur (m)	14,5	15,4
Port d'attache	Patricia Bay, Colombie Britannique, Canada	Dartmouth, Nouvelle-Ecosse, Canada
Année de construction	1984	1963, rénové en 1990
Equipage (nombre)	21	20
Scientifiques embarqués (nombre)	20	23
Surface de locaux scientifiques (m3)	56	98
Mise en œuvre de ROV et submersibles	ROPOS	ROPOS
Adresse internet	http://www.ccg-gcc.gc.ca/Fleet/Vessel?vessel_id=74 Consultée le 3 mai 2013.	http://www.ccg-gcc.gc.ca/Fleet/Vessel?vessel_id=71 Consultée le 3 mai 2013.

3.2.1.5. Flotte océanographique japonaise

La flotte océanographique japonaise utilisée pour l'exploration des grands fonds est principalement mise en œuvre par le *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (Jamstec). Le Chikyu est le navire le plus grand avec 210 mètres de long. Il est utilisé pour le forage des grands fonds et est l'un des navires du programme IODP (Integrated Ocean Drilling Program, devenu International Discovery Program au début de 2014). Le sous-marin habité japonais, le Shinkai, est principalement utilisé sur le navire Yokosuka alors que le sous-marin téléguidé Kaiko est mis en œuvre depuis le Kairei (Tableau 3-7).

Tableau 3-7 Principaux navires de recherche océanographique japonais.







Nom	Natsushima	Yokosuka	Kairei	Kaiyo	Hakuho Maru	Mirai	Chikyu
Photo							
Opérateur	Jamstec	Jamstec	Jamstec	Jamstec	Jamstec	Jamstec	Jamstec
Longueur (m)	67,3	105,2	106,0	61,5	100,0	128,5	210
Largeur (m)	13,0	16,0	16,0	28,0	16,2	19,0	38
Année de construction	1981	-	-	1985	-	-	-
Equipage (nombre)	37	45	38	29	54	46	200
Personnel scientifique (nombre)	18	15	22	31	35	34	
Mise en œuvre de ROV et submersibles	<ul style="list-style-type: none"> • ROV Hyper-Dolphin (3000 m) • Deep Tow (-4000 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Submersible habité Shinkai 6500 (6500m) • Deep Tow (-4000 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • ROV Kaiko 7000 (7000m) • Deep Tow (-4000 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Deep Tow (-4000 m) 	NON	NON	NON
Adresse internet	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/natsushima.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/yokosuka.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/hakuho-maru.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/kaiyo.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/hakuho-maru.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/mirai.html	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/chikyu.html
						Consultées le 3 mai	Consultées le 3 mai

	http://www.researchvessels.org/country/Japan/Natsushima/natsushima.html Consultées le 3 mai 2013.	Consultée le 3 mai 2013.	http://www.researchvessels.org/country/Japan/Hakuho_Maru/hakuho_maru.html Consultées le 3 mai 2013.	http://www.researchvessels.org/country/Japan/Kaiyo_JAMSTEC/index.html Consultées le 3 mai 2013.	http://www.researchvessels.org/country/Japan/Hakuho_Maru/hakuho_maru.html Consultées le 3 mai 2013.	2013.	2013.
--	--	--------------------------	--	--	--	-------	-------

3.2.1.6. Flotte océanographique indienne

La flotte océanographique indienne utilisée pour l'exploration des fonds océaniques est partagée entre différentes agences (NIO, NCAOR, NIOT) sans qu'une structure de coordination n'ait été mise en place. L'Inde ne dispose pas de moyen d'exploration profonde *in situ* (Tableau 3-8).







Tableau 3-8 Principaux navires de recherche océanographique indiens.

Nom	RV <i>Sindhu Sankalp</i>	RV <i>Sindhu Sadhana</i>	INS <i>Sagardhwani</i>	RV <i>Sagar Nidhi</i>	BTV <i>Sagar Manjusha</i>	RV <i>Sagar Kanya</i>
Photo						
Pays	Inde	Inde	Inde	Inde	Inde	Inde
Utilisateur	National Institute of Oceanography	National Institute of Oceanography	Naval Physical and Oceanographic Laboratory	National Institute of Ocean Technology	National Institute of Ocean Technology	National Centre for Antarctic & Ocean Research
Longueur (m)	56,3	80,00	85,1	104,00	60,00	100,34
Largeur (m)	9,1	18,00	12,8	18,00		16
Autonomie (jours)	30	40		45	20	45
Port d'attache	-	-	Kochi	Chennai	Chennai	Chennai
Année de construction	1989	2012	1991			1983
Equipage (nb)	16	21	80	30	18	
Scientifiques embarqués (nb)	14	35	16	25	11	
Surface de locaux scientifiques (m ²)	-	250	-			
Adresse internet	http://www.nio.org/index?option=com_subcategory/task/show/tid/1/sid/12/thid/33 Consultée le 06 août 2013.	http://www.nio.org/index?option=com_nomenclature/task/show/tid/1/sid/12/id/123 Consultée le 06 août 2013.	http://en.wikipedia.org/wiki/INS_Sagardhwani Consultée le 06 août 2013.	http://www.niot.res.in/op/vms/vesselmanagement_facilities.php Consultée le 06 août 2013.	http://www.niot.res.in/op/vms/vesselmanagement_facilities.php Consultée le 06 août 2013.	http://www.marinetrafic.com/fr/ais/details/ships/419320000 Consultée le 06 août 2013.

3.2.1.7. Flotte océanographique russe

La flotte océanographique russe mise en œuvre pour l’exploration des fonds océaniques dépend pour l’essentiel de l’Académie des Sciences. La Russie dispose des submersibles MIR pour l’exploration profonde *in situ* (Tableau 3-9).

Tableau 3-9 Principaux navires de recherche océanographique russes.





Nom	RV Yuzhmorgeologiya	RV Akademik Mstislav Keldysh	RV Rift	RV Professor Shtockman	RV Akademik Ioffe	RV Akademik Sergey Vavilov
Photo						
Pays	Russie	Russie	Russie	Russie	Russie	Russie
Utilisateur	CGGE International	Russian Academy of Sciences	Russian Academy of Sciences	Russian Academy of Sciences	Russian Academy of Sciences	Russian Academy of Sciences
Longueur (m)	101	122,2	53,71	68,77	117,10	117,10
Largeur (m)	16	17,82	10	12	18	18
Autonomie (jours)	90	33	30	30	60	60
Port d’attache		Kaliningrad		Kaliningrad		Kaliningrad
Année de construction	1985	1980	1981	1979	1988	1988
Equipage (nb)		64	27	34		75
Scientifiques embarqués (nb)		65	11	25	55	51
Surface de locaux scientifiques (m²)		-				
Mise en œuvre de ROV et submersibles		Mir I et Mir II				
Adresse internet	http://www.cggeinternational.com/ships_yuz.htm Consultée le 6 août 2013.	http://www.ocean.ru/eng/content/view/25/45/ Consultée le 23 mai 2013.	http://www.ocean.ru/eng/content/view/29/45/ Consultée le 6 août 2013.	http://www.ocean.ru/eng/content/view/28/45/ Consultée le 6 août 2013.	http://www.ocean.ru/eng/content/view/27/45/ Consultée le 6 août 2013.	http://www.ocean.ru/eng/content/view/26/45/ Consultée le 6 août 2013.

Remarques : Les navires Akademik Ioffe et Sergey Vavilov sont devenus des navires de croisière en Antarctique ou Arctique (<http://travelwild.com/cruises/ships/>).

Le navire Yuzmorgeologiya est géré par CGGE qui loue les bateaux (et les scientifiques) pour de s campagnes océanographiques (<http://www.cggeinternational.com/about.htm>).

La Russie dispose de submersibles habités et de ROV (Tableau 3-10; <http://www.edboe.ru/>)



Tableau 3-10 Engins submersibles de recherche océanographique russes.

Nom	Mir	Pisces	Rift 1 et 2	ROV Rosub 6000
Photo				
Nombre	2	2	2	1
Equipage	3	3	3	
Profondeur d'investigation maximale (m)	6000	2000	4000	6000

3.2.1.8. Flotte océanographique coréenne

La flotte océanographique coréenne, encore réduite, se développe progressivement, avec un navire (non listé ci-dessous) utilisé par le KIGAM (Bureau des Recherches Géologiques coréen) armé pour la sismique, le brise-glace Araon, les navires Eardo et Onuri opérés par le KIOST (ex. KORDI) et un nouveau navire à venir qui sera accessible aux chercheurs académiques (Tableau 3-11). La Corée ne dispose pas à ce jour de moyen d'exploration profonde *in situ*.

Tableau 3-11 Principaux navires de recherche océanographique coréens.

Nom	RV Araon	RV Eardo	RV Onnuri
Photo			
Pays	Corée du Sud	Corée du Sud	Corée du Sud
Utilisateur	Korea Polar Research Institute	KORDI	KORDI
Longueur (m)	110	48,95	63,8
Largeur (m)	19	8,60	12
Autonomie (jours)	70	20	40
Port d'attache	Incheon	Ansan	Ansan
Année de construction	2009	1992	1991
Equipage (nb)	23	14	15
Scientifiques embarqués (nb)	60	17	25
Surface de locaux scientifiques (m ²)			105
Adresse internet	http://en.wikipedia.org/wiki/RV_Araon Consultée le 7 août 2013.	http://www.researchvessels.org/country/Korea/Eardo/eardo.html Consultée le 7 août 2013.	http://www.researchvessels.org/country/Korea/Onnuri/onnuri.html Consultée le 7 août 2013.

3.2.1.9. Flotte océanographique chinoise

La flotte océanographique chinoise se développe également rapidement. Les moyens à la mer sont gérés soit par le COMRA, structure dédiée à la recherche de ressources minérales marines, soit par les instituts océanographiques d'Etat et à l'Académie des Sciences. La Chine dispose depuis peu de ROVs et d'un sous-marin profond habité qualifié pour 7000 m (Tableau 3-12).

Tableau 3-12 Principaux navires de recherche océanographique chinois.

Nom	RV Dayang Yihao (RV Ocean-1)	RV Dong Fang Hong 2	RV Haiyang-6 (RV Ocean-6)	RV Xiang Yang Hong -9	RV Ke Xue (RV Science-1)
Photo	A white research vessel with a red hull, viewed from the side.	A white research vessel with a red hull, viewed from the side.	A blue and white research vessel, viewed from the side.	A white research vessel with a red hull and a large red crane-like structure on deck, viewed from the side.	A red research vessel with a white superstructure, viewed from the side.
Pays	Chine	Chine	Chine	Chine	Chine
Utilisateur	COMRA	Ocean University of China	COMRA	State Oceanic Administration	Chinese Academy of Sciences
Longueur (m)	104	96		112	99,6
Largeur (m)	16	14		15	17,8
Autonomie (jours)				60	60
Port d'attache	Qingdao	Qingdao	Qingdao	Qingdao	Qingdao
Année de construction	1984	1995		1978	2012
Equipage (nb)		196	-		80
Scientifiques embarqués (nb)			96		
Surface de locaux scientifiques (m²)		105			
Mise en œuvre de ROV et submersibles				Jiaolong	
Adresse internet	http://www.unols.org/meetings/2004/200412des/200412desap09b.PDF Consultée le 7 août 2013.	http://www2.ouc.edu.cn/cbc/english.htm Consultée le 7 août 2013.	http://maritime-connector.com/ship/haiyang-liu-hao-9549126/ Consultée le 7 août 2013.	http://www.researchvessels.org/country/China/Xiang_9/xiang_yang_hong_09.html Consultée le 7 août 2013.	http://subseaworldnews.com/2011/12/08/china-launches-new-scientific-research-vessel-kexue/ Consultée le 7 août 2013.

ROV Sea Dragon-1 + Sea Dragon-2 (http://en.wikipedia.org/wiki/Sea_Dragon_class_ROV) - COMRA

Dimensions : 3 m x 1.8 m x 1.8 m

Poids : 3,25 t

Vitesse : 3,5 nd

Profondeur : 3500 m

Submersible habité: Jiaolong (Liu, Cui et Li, 2010; Cui et al, 2013))

Dimensions : 8.9 m x 3.0 m x 3.2 m

Poids : 22 t

Vitesse : 1 nd

Profondeur maximale : 7000 m

Occupants : 2 pilotes, 1 scientifique





Figure 3-1 Submersible Jialong.

3.2.1.10. Flotte océanographique australienne

La flotte océanographique académique australienne est essentiellement composée du R/V Southern Surveyor, qui sera remplacé en 2014 par le R/V Investigator. Cette flotte est mise en œuvre par l'Australian Marine National Facility, installée à Hobart (Tasmanie) dans les locaux du CSIRO (Tableau 3-13).


Tableau 3-13 Principaux navires de recherche océanographique australiens.

Nom	RV Southern Surveyor	RV Investigator
Photo		
Pays	Australie	Australie
Utilisateur	MNF	MNF
Longueur (m)	66	94
Autonomie (jours)	26	60
Port d'attache	Hobart	
Année de construction	1984	2014
Scientifiques embarqués (nb)	15	40
Mise en œuvre de ROV et submersibles	NON	ROV
Adresse internet	http://www.marine.csiro.au/nationalfacility/research-vessel/index.htm Consultée le 22 décembre 2013.	

3.2.1.11. Flotte océanographique néo-zélandaise

La flotte océanographique néo-zélandaise est mise en œuvre par la National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), un Institut de la Couronne fonctionnant comme une compagnie privée. Le principal navire néo-zélandais est le R/V Tangaroa (Tableau 3-14).

Tableau 3-14 Principaux navires de recherche océanographique néo-zélandais.





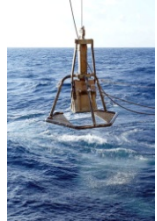



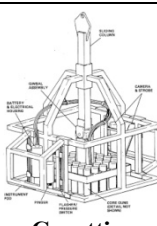










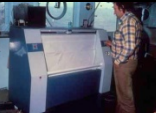
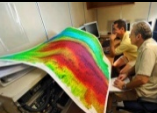


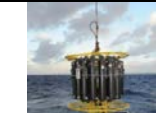
Nom	RV Tangaroa
Photo	
Pays	Nouvelle Zélande
Utilisateur	NIWA
Longueur (m)	70
Largeur (m)	14
Autonomie (jours)	60
Port d'attache	Wellington
Année de construction	1991, refonte 2010
Scientifiques embarqués (nb)	31
Mise en œuvre de ROV et submersibles	Engins sous-marins légers
Adresse internet	http://www.niwa.co.nz/our-science/vessels/tangaroa Consultée le 22 décembre 2013

3.2.2. Cartographie et prélèvements depuis la surface

3.2.2.1 Principaux instruments de prélèvements de surface

Le tableau 3-15 présente les principaux instruments utilisés pour prélever les nodules, les encroûtements et les sulfures depuis la surface.

Tableau 3-15 Instruments de prélèvements de surface ou dédiés à d'autres fonctions connexes utilisés pour l'exploration des nodules (N), encroûtements (E) et sulfures (S).

 ED1 <i>Engin libre pour échantillonner les nodules (N)</i>	 Carottier Kullenberg <i>Carottier à câble - tube (N - S)</i>	 Carottier TAAF <i>Carottier à câble - boîte (N)</i>	 Carottier Benthos <i>Carottier libre - tube (N)</i>	 Carottier USNEL <i>Carottier à câble - boîte (N)</i>	 Carottier multi-tubes <i>Multi-carottier à câble - tube (N - S)</i>
 Carottier Tube <i>Petit carottier tube sur Nautilie</i>	 Carottier lame <i>Petit carottier boîte sur Nautilie (N - S)</i>	 Carottier pyrotechnique <i>Carottier pour prélever des roches (N - E)</i>	 Module géotechnique <i>Instrument géotechnique in-situ (N)</i>	 Drague <i>Drague à nodules (N - E)</i>	 Troika <i>Instrument tracté pour photographies du fond (N)</i>
 RAIE <i>Instrument tracté pour photographies du fond (N)</i>	 Epaulard <i>ROV pour photographies du fond (N - E)</i>	 SAR <i>Sonar latéral (N - E)</i>	 Module autonome de colonisation (MAC) <i>Instrument de biologie utilisé sur Nautilie (N)</i>	 Respiromètre <i>Instrument de biologie utilisé sur Nautilie (N)</i>	 Chalut à perche <i>Chalut de fond (N)</i>
 Sismique <i>Etude géophysique (N - E - S)</i>	 Bathy Imagerie <i>Multifaisceaux (N - E - D)</i>	 Anomalie physique <i>colonne d'eau Multifaisceaux (S)</i>	 Courantomètre <i>Courantomètre Aanderaa (N)</i>	 Bouée météo <i>Bouée météo (N)</i>	 Bathysonde <i>Etude géochimique colonne d'eau (S)</i>

3.2.2.2. *Cartographie de surface*

La cartographie de surface est réalisée par des équipements fixes réalisant des mesures depuis le navire et permettant des investigations à l'échelle régionale (sondeurs multifaisceaux, sismique, gravimètre, magnétomètre, ...). Les techniques de cartographie bathymétrique et d'imagerie acoustique (réflectivité) permettent de réaliser des cartes de quelques dizaines de mètres de résolution, fondamentales pour aider à la localisation et à la définition – parfois à l'aide des traceurs de la colonne d'eau - des objets géologiques liés à la formation des minéralisations. Les images acoustiques sont un élément essentiel pour déterminer les différents types de fonds (substrats sédimentaires, roches volcaniques, etc.). L'ensemble de ces techniques permet d'explorer des domaines de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres, mais ne permet pas d'étudier précisément les processus ni de localiser les sites hydrothermaux ou de faire le lien avec les écosystèmes, d'où le besoin subséquent d'études in situ beaucoup plus détaillées.

Bathymétrie et imagerie acoustique

La cartographie des fonds marins est réalisée à l'aide de sondeurs acoustiques, selon un principe similaire au RADAR : le SONAR (« **s**ound **n**avigation and **r**anging »). Les ondes électromagnétiques étant très rapidement atténuées par l'eau, le fonctionnement de ces outils repose sur l'émission d'une onde acoustique, puis la réception et l'enregistrement de l'onde réfléchi par le fond.

Contrairement aux premiers appareils qui émettaient un large faisceau d'émission indifférencié à la verticale du navire, les sondeurs cartographiques utilisés de nos jours sont des sondeurs multifaisceaux.

Un sondeur multifaisceaux mesure simultanément la profondeur selon plusieurs directions, déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. On explore ainsi le fond sur une large bande (de l'ordre de 5 à 7 fois la profondeur) avec une grande résolution.

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des faisceaux croisés. Une impulsion sonore est émise au travers d'un faisceau d'émission étroit dans la direction longitudinale (de l'ordre de 1 à 5 degrés) et large transversalement (typiquement 150 degrés). La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits dans le plan transversal (de l'ordre de 1 à 5 degrés). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée est l'intersection entre le faisceau d'émission et le faisceau de réception.

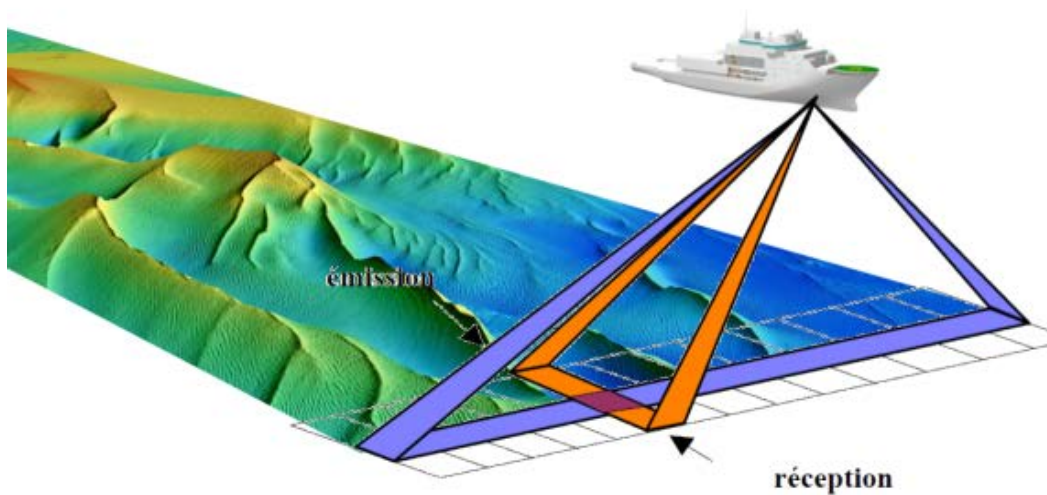


Figure 3-2 Principe de fonctionnement des sondeurs multifaisceaux, technique des faisceaux croisés © Ifremer.

Les sondeurs multifaisceaux permettent de mesurer précisément :

- la topographie du relief sous-marin (**bathymétrie**), en déduisant la profondeur du temps de parcours de l'onde acoustique entre l'instant de son émission et de sa réception (ce qui nécessite une connaissance fine de la célérité des ondes acoustiques sur zone),
- la **réflectivité**, c'est à dire la quantité d'énergie acoustique rétrodiffusée par le fond, ce qui caractérise sa nature : plus cette grandeur est élevée, plus le fond est dur; plus elle est faible, plus il est meuble.

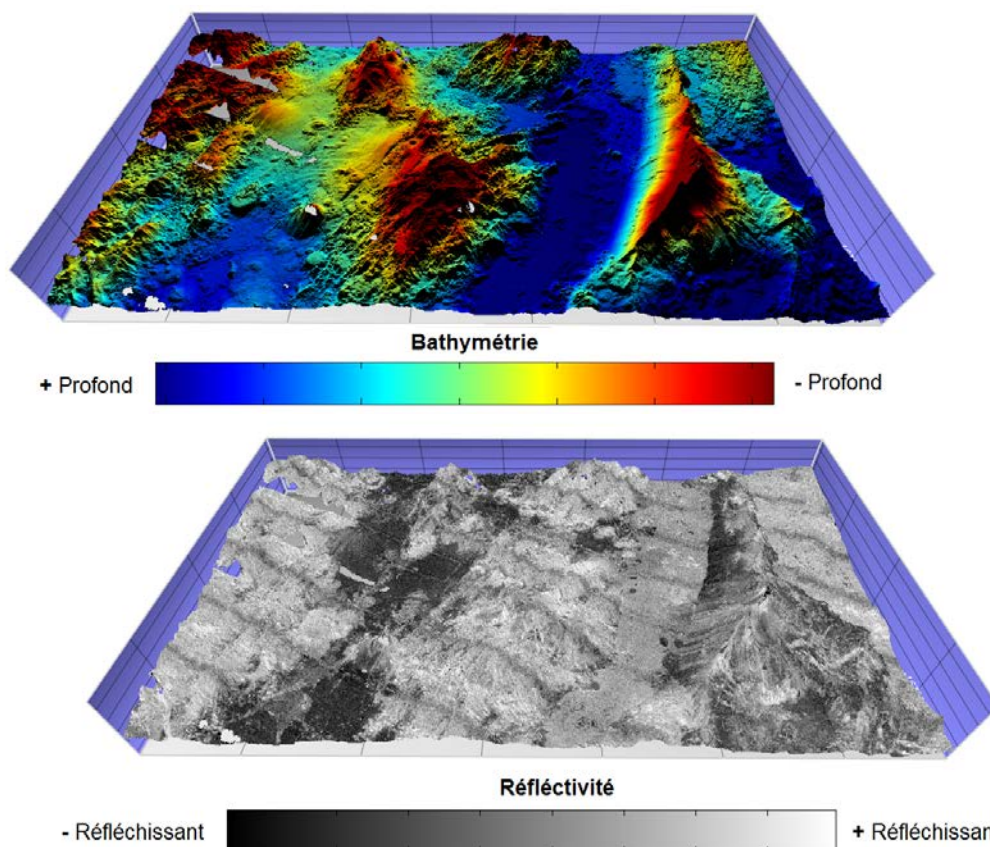


Figure 3-3 Représentation en perspective 3D de la bathymétrie et de la réflectivité d'une même zone, sondeur EM122 (12kHz) N/O L'Atalante © Ifremer.

Les sondeurs multifaisceaux de dernière génération permettent également l'enregistrement de la réflectivité dans la colonne d'eau, tout au long de la propagation de l'onde acoustique. Cette dernière information est très utile pour détecter des panaches de gaz ou de fluide, dont la réflectivité est nettement inférieure à celle du fond.

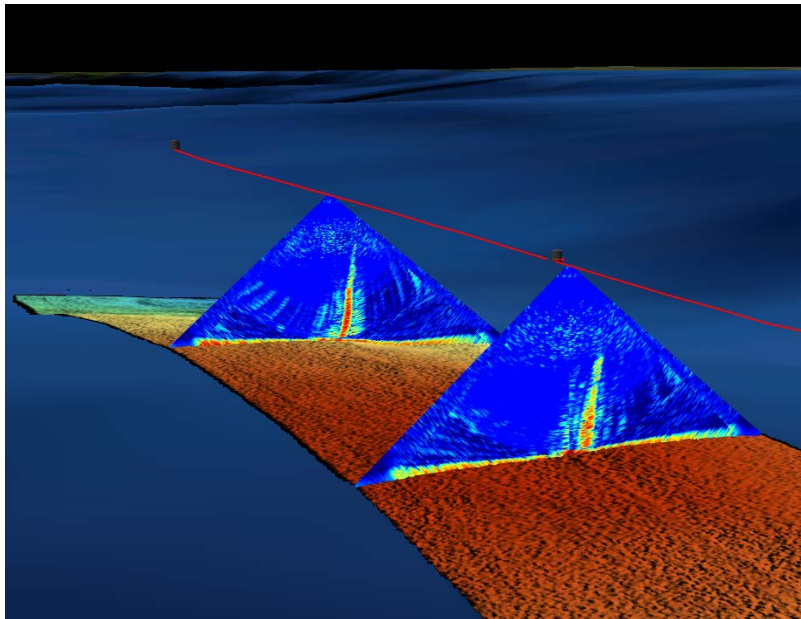


Figure 3-4 Exemple de données de réflectivité enregistrée dans la colonne d'eau; on distingue nettement deux panaches de gaz (en rouge la navigation suivie par le navire) © Ifremer.

Un sondeur multifaisceaux est caractérisé par :

- **sa fréquence acoustique** : c'est la fréquence de l'impulsion sonore émise. La fréquence est un élément important dans la définition d'un échosondeur. Elle détermine :
 - la portée du sondeur : l'amortissement du son dans l'eau augmente très vite avec la fréquence. On distingue généralement 4 classes d'équipements (tableau 3-16).

Tableau 3-16 Les différentes portées des sondeurs, caractéristiques et applications.

Sondeurs	Plage de profondeur	Fréquence	Types de levé
<i>Grands fonds</i>	100 à 12 000 m	10 – 15 kHz	Talus, dorsales et plaines abyssales
<i>Moyens fonds</i>	30 à 3000 m	30 – 50 kHz	Talus, plateau continental
<i>Petits fonds</i>	5 à 500 m	80 – 120 kHz	Plateau continental
<i>Très petits fonds</i>	0 à 100 m	200 à 400 kHz	Zones littorales

- la pénétration : plus la fréquence est basse, plus l'onde acoustique pénètre les matériaux mous tels que les sédiments.
- la taille des antennes : la génération de signaux basse fréquence nécessite des antennes de grande dimension, et inversement.
- la résolution spatiale (liée à la finesse des faisceaux), d'autant meilleure que la fréquence est élevée et les antennes grandes.

- **le nombre de faisceaux** : il varie, selon les équipements, d'une dizaine à plusieurs centaines.
- **l'ouverture angulaire** : elle représente la largeur angulaire de la fauchée. C'est l'angle entre les faisceaux extrêmes. Elle varie en général de 90° à 150°.
- **la largeur angulaire des faisceaux** :
 - On distingue :
 - la largeur longitudinale (dans l'axe du navire)
 - la largeur transversale (perpendiculaire à l'axe du navire)
 - Ces largeurs varient typiquement de 0,5 à 5 degrés. Elles influent largement sur la résolution du sondeur et sa capacité à détecter des objets de petite taille.
- **le type de signaux émis** :
 - On distingue :
 - **les signaux CW, ou pings** - Les signaux les plus couramment utilisés sont des "pings" : portions de signaux sinusoïdaux mono-fréquentiels limités à une durée t . Une durée d'émission longue augmente la portée mais réduit la résolution. Elle varie couramment de 1 ms à 10 ms.
 - **les signaux FM, ou chirps** - Il s'agit de signaux sinusoïdaux modulés linéairement en fréquence. Ces signaux sont utilisés dans le cas de grande profondeur car ils permettent d'augmenter la portée du sondeur sans en dégrader la résolution : plus grande est la bande de fréquence de modulation, meilleure est la résolution, indépendamment de la durée d'impulsion.

Le tableau 3.17 présente les caractéristiques de trois sondeurs multifaisceaux mis en œuvre par l'Ifremer.

Tableau 3-17 Récapitulatif des caractéristiques de sondeurs utilisés par l'Ifremer.

	EM 122 N/O L'Atalante	EM 710 N/O L'Atalante	EM 2040 AUV AsterX/Idex
Plage de fonctionnement	100 m → 10000 m	0 m → 1500 m	0 m → 250m
Mesures	Bathymétrie / imagerie / colonne d'eau	Bathymétrie / imagerie / colonne d'eau	Bathymétrie / imagerie / colonne d'eau
Fréquences	12 kHz (10.5 à 13 kHz)	80 kHz (73 à 97 kHz)	200 / 300 / 400 kHz (choix opérateur)
Dimension des antennes	Émission : 8 m Réception : 4 m	Émission : 2 m Réception : 1 m	Émission : 40 cm Réception : 40 cm
Signaux	CW / FM	CW / FM	CW / FM
Niveau d'émission max	241 dB (ref 1 mPa @1 m)	229 dB (ref 1 mPa @1 m)	208 dB (ref 1 mPa @1 m)
Durée d'impulsion	2/ 3/ 5/ 8/ 15 ms (CW) 25/ 40/ 60/ 100 ms (FM)	0.2/ 0.5/ 2 ms (CW) 20 / 40 / 60 / 120 ms (FM)	25 à 600 ms (CW) 1.5 à 12 ms (FM)
Faisceau d'émission	1° x 150°	0.5° x 150°	0.75°x 150° @ 400 kHz 1° x 150° @ 300 kHz 1.5° x 150° @ 200 kHz
Mode dual swath*	Oui	Oui	Non
Compensation à l'émission	Tangage / lacet (8 secteurs transversaux)	Tangage / lacet (3 secteurs transversaux)	Tangage / lacet (3 secteurs transversaux)
Cadence d'émission max	5 Hz	30 Hz	50 Hz
Faisceau de réception	2° x 32°	1° x 26°	0.75° @ 400 kHz 1° @ 300 kHz 1.5° @ 200 kHz
Compensation à la réception	roulis	roulis	roulis
Nombre de faisceaux	288	200	256
Répartition	Équidistante ou équiangle	Équidistante ou équiangle	Équidistante ou équiangle
Bathymétrie	288 sondes ou 432 en mode high density	200 sondes ou 400 en mode high density	256 sondes ou 400 en mode high density
Réfectivité	1 valeur de BS pour chaque échantillon du signal, à l'intérieur de chaque faisceau	1 valeur de BS pour chaque échantillon du signal, à l'intérieur de chaque faisceau	Pour chaque faisceau : 1 série de valeurs de BS sur la largeur de l'empreinte du faisceau (Échantillonnage : entre 2.5 et 10 cm)
Colonne d'eau	Pour chaque faisceau : 1 valeur d'amplitude pour chaque échantillon du signal entre 0 et range max (Échantillonnage CW : entre 1.5 et 11 m)	Pour chaque faisceau : 1 valeur d'amplitude pour chaque échantillon du signal entre 0 et range max (Échantillonnage CW : entre 10 cm et 1,5 m)	Pour chaque faisceau : 1 valeur d'amplitude pour chaque échantillon du signal entre 0 et range max (Échantillonnage : entre 4 et 20 cm)
Portée / Fauchée	5 x P , P < 4000m → 20km	5 x P , P < 800m → 4km	5 x P , P < 100m → 500m
Résolution	3% à 4% de P	2% de P	2% de P

* Mode Dual swath : Possibilité d'émission simultanée de deux pings dépointés vers l'avant et l'arrière, pour augmenter la couverture par grand fond.

Les deux images suivantes illustrent le saut de résolution apporté par des sondeurs haute fréquence embarqués sur des engins sous-marins pour l'exploration par grande profondeur :

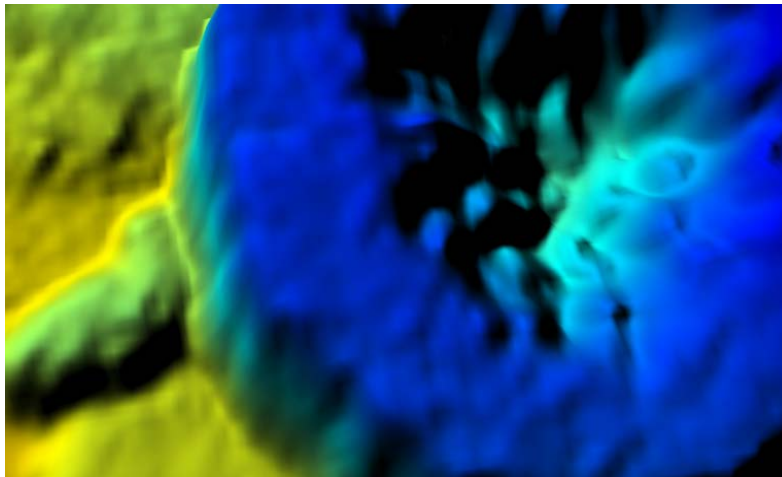


Figure 3-5 Structure cartographiée avec l'EMI22 (12kHz) depuis l'Atalante en surface © Ifremer.

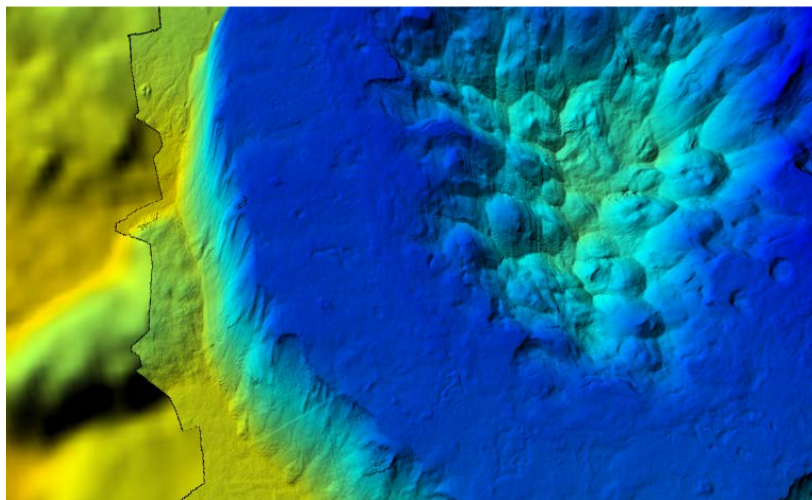


Figure 3-6 Même structure cartographiée avec l'EM2000 (200 kHz) sur l'AUV AsterX à 60m de fond : le gain en résolution est évident © Ifremer.

Sismique

La reconnaissance sismique est basée sur la mesure des temps de propagation dans les couches du sous-sol d'ondes acoustiques générées artificiellement par une source (canons à air ou à eau...). Ces ondes sont captées sur différents types de récepteurs regroupés dans une flûte trainée derrière le navire et qui permettent l'acquisition de la donnée.

Les temps de propagation permettent de déterminer la géométrie, la structure et la configuration des couches géologiques. Cette donnée est fondamentale pour la connaissance de la troisième dimension des systèmes.

Il existe une relation étroite entre la fréquence des ondes émises, la résolution verticale du profil sismique résultant et la pénétration du système. Il existe donc différentes sortes de sismique :

- La sismique basse fréquence, dans la gamme de fréquence de 5 à 80Hz, pour des pénétrations de quelques kilomètres (jusqu'à 30km) et une résolution de l'ordre de la centaine de mètres.

- La sismique HR ou «Haute Résolution», dans la gamme de fréquence de 50 à 400 Hz, pour une pénétration jusqu'à 1 km et une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres.
- La sismique THR ou «Très Haute Résolution», dans la gamme de fréquence de 300 à 1000 Hz et plus, pour une pénétration jusqu'à 100m et une résolution de l'ordre du mètre.

La sismique haute résolution ne permet pas de cartographier des zones aussi étendues que la sismique basse fréquence mais cette meilleure résolution permet, par exemple, de préciser l'extension horizontale et verticale des zones affectées par les circulations hydrothermales et les zones minéralisées. Elle peut également permettre de détecter d'anciennes zones d'altération et les minéralisations fossiles associées.

Aujourd'hui, il est devenu usuel de contrôler l'impact environnemental de l'utilisation de tels systèmes géophysiques, qui ont des effets non négligeables sur les organismes vivants, en particulier les mammifères marins.

Magnétisme, gravimétrie

Les données de champs potentiels (gravimétrie et magnétisme) font partie, comme la bathymétrie, des données géophysiques de base acquises lors des premières étapes de la cartographie d'une région à explorer.

Les variations du champ de pesanteur sont mesurées par un gravimètre, appareil de précision généralement placé au centre de gravité du navire, sur une plateforme stabilisée, et dont le principe physique repose généralement sur la mesure de la plus ou moins grande extension d'un ressort sous l'effet de ces variations. Celles-ci reflètent, entre autres, les variations de densité des roches dans la Terre. Elles permettent, une fois corrigées des mouvements du navire, de la dérive instrumentale, des effets de marée et d'Eötvös (lié à la rotation de la Terre) et de la correction de latitude (formule gravimétrique internationale, IGF), d'accéder à l'anomalie gravimétrique à l'air libre, souvent corrélée au premier ordre à la topographie des fonds, interface qui matérialise le plus fort contraste de densité entre l'eau de mer et les roches du fond océanique. L'anomalie de Bouguer correspond au signal résiduel une fois corrigé l'effet de cette topographie sous des hypothèses de densité réalistes. Cette anomalie permet de mettre en évidence d'éventuelles zones de plus forte ou plus faible densité, par exemple associées à des zones minéralisées ou à des intrusions magmatiques. La distance entre mesures gravimétriques (en surface) et sources des variations (dans la croûte) ne permet cependant que de mettre en évidence les plus grandes longueurs d'onde du signal, associées à la présence d'une anomalie thermique à l'axe des dorsales ou dans d'autres zones volcaniques, ou des variations d'épaisseur de la croûte. Afin de détecter celles-ci, on calcule souvent une anomalie de Bouguer réduite au manteau (MBA pour M antle Bouguer Anomaly), qui corrige l'effet d'une croûte supposée d'épaisseur constante. Le résidu de cette anomalie, une fois ôté l'effet d'un modèle thermique de grande longueur d'onde, peut être inversé en variations d'épaisseur crustale. Les variations de MBA le long de l'axe des dorsales lentes a permis de mettre en évidence des variations systématiques de thermicité entre différents segments de ces dorsales et d'en déduire des cycles d'évolution, dans lesquels s'inscrivent l'histoire locale des sites hydrothermaux.

Si les données de bathymétrie, de sismique et de gravimétrie donnent accès à la structure de la croûte océanique, les données magnétiques permettent d'obtenir un autre paramètre essentiel à l'étude de cette croûte: son âge. Ces données sont collectées le plus souvent à l'aide d'un

magnétomètre tracté plusieurs centaines de mètres derrière les navires océanographiques afin de ne pas être affecté par leur masse métallique. Il s'agit dans la quasi-totalité des cas de mesurer l'intensité du champ magnétique terrestre, qui voit se superposer le champ géomagnétique, de grande longueur d'onde (> 1000 km) et de plus forte amplitude (> 10000 nT), généré par la convection du noyau externe liquide autour de la graine solide; le champ crustal, de courte longueur d'onde (< 100 km) et plus faible amplitude (< 1000 nT), recherché; et les variations temporelles diurnes calmes (quelques dizaines de nT) ou plus complexes (orages magnétiques, perturbations de haute fréquence et d'amplitude comparable à celle du signal recherché). Les profils acquis durant les orages magnétiques sont généralement inexploitable, sauf si un observatoire est proche ou si une station de référence a été installée à proximité. Les données acquises, une fois éliminées les mesures aberrantes, se voient corrigées d'un modèle de champ géomagnétique (généralement l'IGRF, pour International Geomagnetic Reference Field, mis à jour tous les 5 ans par l'Association Internationale de Géomagnétisme et Aéronomie - IAGA) pour donner l'anomalie magnétique.

Les anomalies magnétiques océaniques présentent une succession organisée d'anomalies positives et négatives symétriques par rapport aux dorsales océaniques. La séquence des anomalies observées se corrèle à celle des inversions du champ géomagnétique également mise en évidence dans les roches volcaniques et sédimentaires terrestres. Le scénario qui en ressort est le suivant: lors de la mise en place de nouvelle croûte océanique à l'axe des dorsales, les laves se refroidissent et, passant en dessous de leur température de Curie, enregistrent le champ magnétique ambiant avant de se voir progressivement poussées de part et d'autre de la dorsale par la mise en place de nouvelles laves (Vine and Matthews, 1963). Les séquences d'anomalies magnétiques océaniques permettent donc, lorsqu'elles sont reconnaissables, de dater la croûte océanique, de retracer des isochrones marquant la position passée de la dorsale, et de reconstruire l'évolution passée de cette dorsale.

Des effets de second ordre se superposent à ce modèle très simple: variations de forme et d'amplitude de ces anomalies laissant supposer la présence d'une aimantation plus faible dans des niveaux plus profonds constitués de roches plutoniques ou mantelliques; superposition d'anomalies de faible amplitude et courte longueur d'onde correspondant à des variations reconnues d'intensité (et non plus de polarité) du champ géomagnétique; et enfin, présence à l'axe de certains segments de dorsale, d'une anomalie négative de courte longueur d'onde qui pourrait être causée par la présence de grands ensembles hydrothermaux (sites TAG et Lucky Strike sur la dorsale médio-atlantique; Rona, 1978; Miranda et al, 2005; Tivey and Dymant, 2010). La distance entre mesures magnétiques (en surface) et sources aimantées (au fond), et la taille de ces dernières, laisse cependant peu d'espoir de pouvoir les détecter de la sorte. Il convient pour cela d'acquérir des données magnétiques en profondeur, plus près de ces sources, pour disposer de la résolution suffisante.

3.2.3. Anomalies de la colonne d'eau

3.2.3.1. *Détection par traceurs physique et chimique des panaches hydrothermaux*

Les panaches hydrothermaux sont le résultat du mélange avec l'eau de mer de fluides hydrothermaux générés par la circulation de cette même eau de mer dans la croûte océanique. La source de chaleur profonde et la structure perméable de la croûte océanique contrôlent cette circulation qui se manifeste, sur le plancher océanique, par la genèse de monts et cheminées issus de la précipitation de métaux, sulfates (anhydrite, barytine) et/ou sulfures (pyrite, chalcopryrite), et par la formation dans la colonne d'eau de panaches hydrothermaux le plus souvent enrichis en He, CH₄, Mn et H₂S.

Ces panaches dépendent étroitement de la nature des fluides rejetés, "noirs" ou "blancs" du fait de la présence de particules minérales précipitées lors du mélange entre les fluides de haute température (350°C) et l'eau de mer froide (autour de 2°C). Certains fluides de basse température sont pratiquement dépourvus de particules, d'autres de haute température sont translucides ou plus généralement noirs car chargés en métaux. Les cheminées qui y sont associées sont appelées couramment "fumeurs noirs". Les fluides peuvent également être fortement salés, ou *a contrario*, appauvris en sel par rapport à l'eau de mer.

Il est possible de détecter les panaches hydrothermaux dans la colonne d'eau à l'aplomb des champs hydrothermaux actifs et bien au-delà (de 10 à 100 kilomètres) car ils présentent des caractéristiques physiques et géochimiques très différentes de celles de l'eau de mer environnante.

De nombreux traceurs physiques et géochimiques sont utilisables pour l'exploration, et de nombreuses méthodes et stratégies ont été mises au point pour cartographier les panaches hydrothermaux, toutes basées sur la détection d'anomalies physiques (conductivité, température, néphélométrie, densité) et géochimiques (concentrations en hélium, CH₄, Mn, H₂S,...). Ces paramètres sont donc d'excellents traceurs de la présence d'une activité hydrothermale potentielle. Les mesures physiques (température, présence de particules, conductivité) et prélèvements d'eau s'effectuent à l'aide d'une bathysonde-rosette associant divers capteurs (température, conductivité, néphélométrie) et des prélèvements d'eau qui sont analysés à bord (méthane, manganèse).

Les équipements analytiques sont installés dans un container laboratoire embarqué à bord des navires océanographiques. Le traitement des données physiques et l'analyse à bord permet de détecter en temps réel les anomalies physiques (ex : température, conductivité, néphélométrie) et géochimiques (ex : méthane, manganèse) dans la colonne d'eau. Ces informations permettent de guider la campagne océanographique, de repérer les zones actives, de les délimiter et préparer ainsi les campagnes de plongée en submersible à venir et généralement programmées les années suivantes sur les chantiers découverts.

3.2.3.2. Détection physique des sorties de fluides dans la colonne d'eau à partir du navire

Une autre approche, plus récente et complémentaire, consiste à détecter les sorties de fluides par des équipements utilisant l'acoustique active. Les sondeurs multifaisceaux bathymétriques étaient employés jusqu'à présent pour la cartographie des fonds marins. Les mesures effectuées se limitaient à la distance entre le capteur et l'écho du fond et à la réflectivité de la couche superficielle. Des évolutions récentes en électronique et en informatique permettent aujourd'hui d'acquérir également les mesures effectuées sur toute la colonne d'eau (de la surface jusqu'au fond).

Ce nouveau potentiel des sondeurs multifaisceaux bathymétriques génère des applications inattendues pour l'étude des cibles non-biologiques dans la colonne d'eau, comme les sorties d'hydrocarbures ou fluides hydrothermaux en fond de mer, les chapelets ou nuages de bulles de gaz dans les zones faillées et potentiellement riches en hydrate de gaz des marges continentales. Il s'agit d'un domaine de l'exploration des fonds marins en fort développement au plan international.

Plusieurs navires de la flotte française sont équipés de sondeurs multifaisceaux bathymétriques avec l'option colonne d'eau : Le Pourquoi Pas ? (sondeurs Reson 12 et 24 kHz), L'Atalante (sondeurs Simrad 12 et 75 kHz), Le Suroît (sondeurs Simrad 30 kHz et 200-400 kHz) et Thalia (sondeur Simrad 200-400 kHz). Par contre, les navires Thalassa et L'Europe sont équipés avec des sondeurs multifaisceaux de type halieutique, spécialement conçus pour la détection des cibles biologiques ou non biologiques de la colonne d'eau sur le plateau continental (sondeur Simrad 70-120 kHz).

Pendant la campagne Marmesonet (novembre 2009), l'option colonne d'eau du sondeur multifaisceaux EM302 du Suroît a été utilisée pour la première fois afin d'établir une cartographie à large échelle des sorties de gaz observées au fond de la mer de Marmara (Figures 3-7 et 3-8).

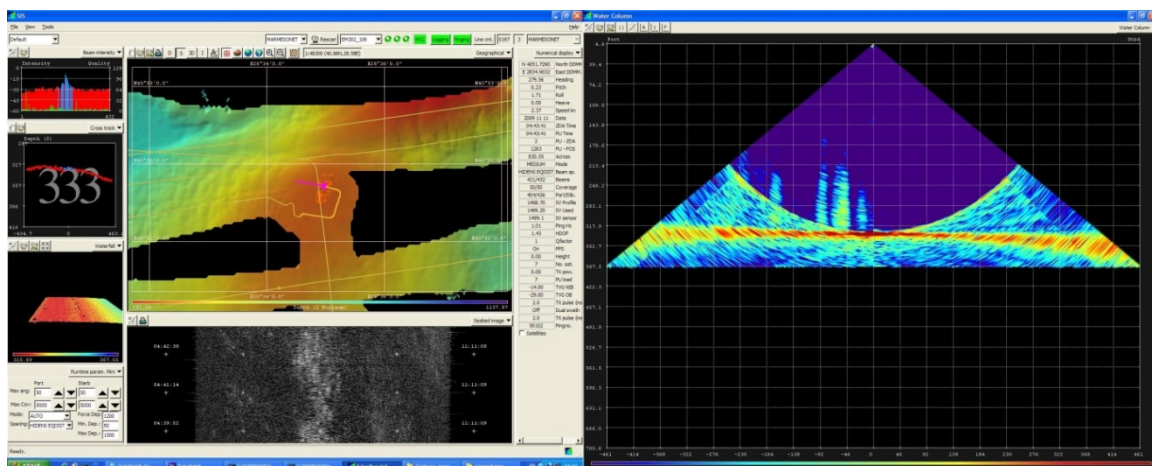


Figure 3-7 Interface du sondeur EM302 avec à gauche la représentation de la bathymétrie et de la réflectivité et à droite la visualisation des échos de panaches de gaz dans la colonne d'eau (N.O. Le Suroît, campagne Marmesonet, Central High, sonde 333 m).

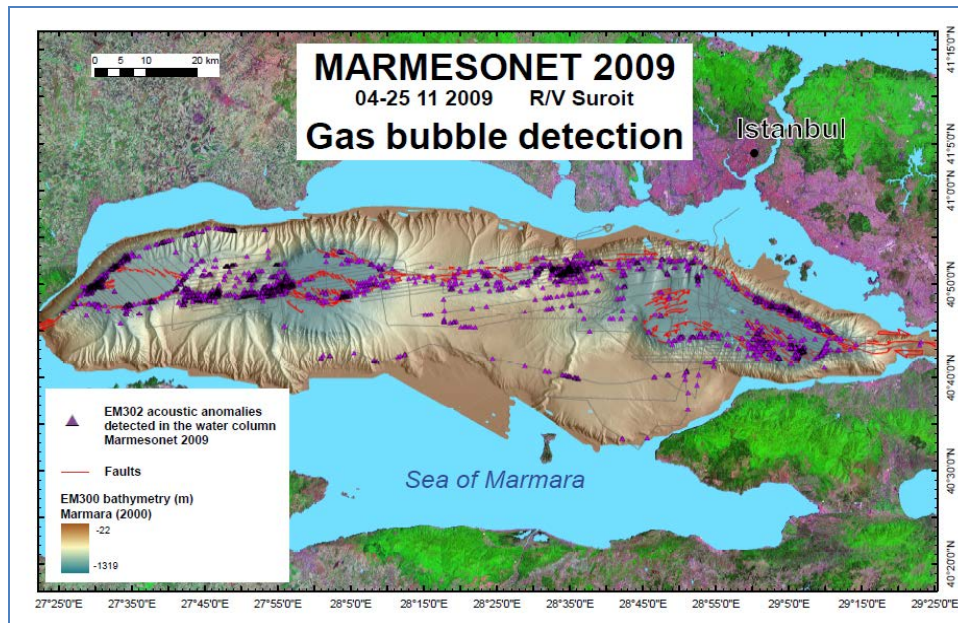


Figure 3-8 Cartographie des anomalies acoustiques observées dans la colonne d'eau pendant la campagne Marmesonet et attribuées de manière préliminaire aux sources de gaz (N.O. Le Suroit, © Ifremer).

Les données des sondeurs multifaisceaux halieutiques ou de s sondeurs multifaisceaux bathymétriques avec l'option colonne d'eau peuvent donc être utilisées au cours d'une campagne afin d'atteindre différents objectifs :

- cartographier (détection géo référencée) les sorties de fluides ou de gaz dans des zones déjà répertoriées (Figure 3-9);
- cartographier en phase exploratoire des zones où ces événements n'ont pas encore été observés ou localisés avec précision (Figure 3-10);
- utiliser la donnée acoustique comme outil d'aide à l'échantillonnage des paramètres biogéochimiques de la colonne d'eau ou du sous-sol par un positionnement plus précis et orienté des bathysondes, des carottages ou des dragages (Figure 3-11 et Figure 3-12).

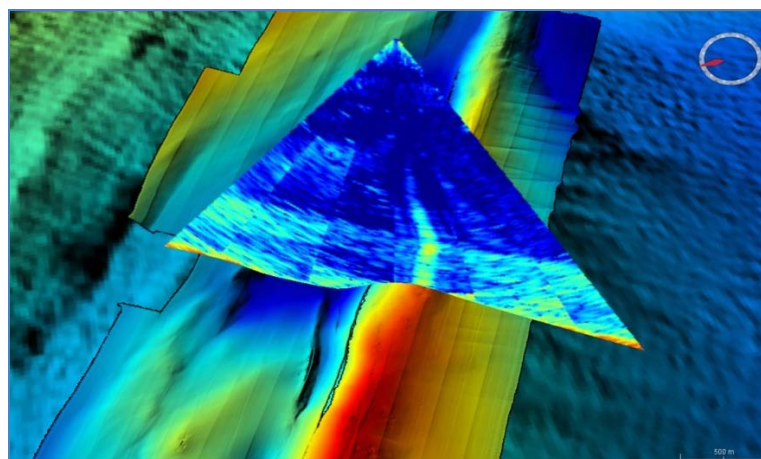


Figure 3-9 Panache généré par des bulles d'une source froide détecté dans le golfe de Californie avec le sondeur EM122 de L'Atalante (sonde 1700 m).

Cette campagne, réalisée dans une zone où les principales sources hydrothermales étaient déjà connues, a permis de valider l'utilisation de l'option colonne d'eau pour le sondeur de L'Atalante et d'indiquer la présence d'autres sources de moindre importance non répertoriées (© Ifremer, logiciel SSC/GLOBE/3DV).

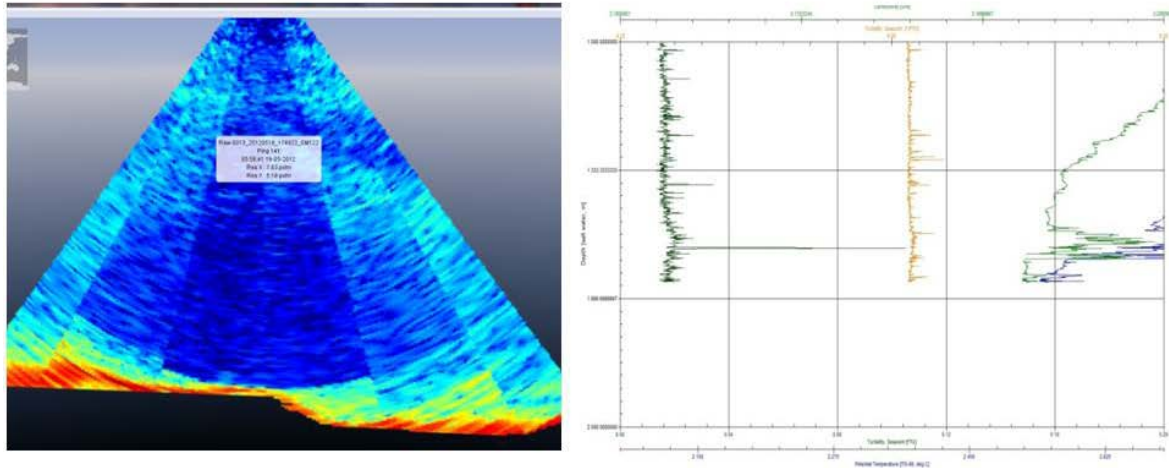


Figure 3-10 Découverte d'un site hydrothermal à 1600 m de profondeur à partir de l'identification visuelle des échos observés dans les données de colonne d'eau acquises par un sondeur multifaisceaux installé sous la coque du navire © Ifremer.
(échogramme polaire à gauche, les échos bleus clairs signalés par le cercle rouge indiquent le panache hydrothermal). Validation de la découverte par les données obtenues à partir d'un profil de température et turbidité effectué deux semaines plus tard.

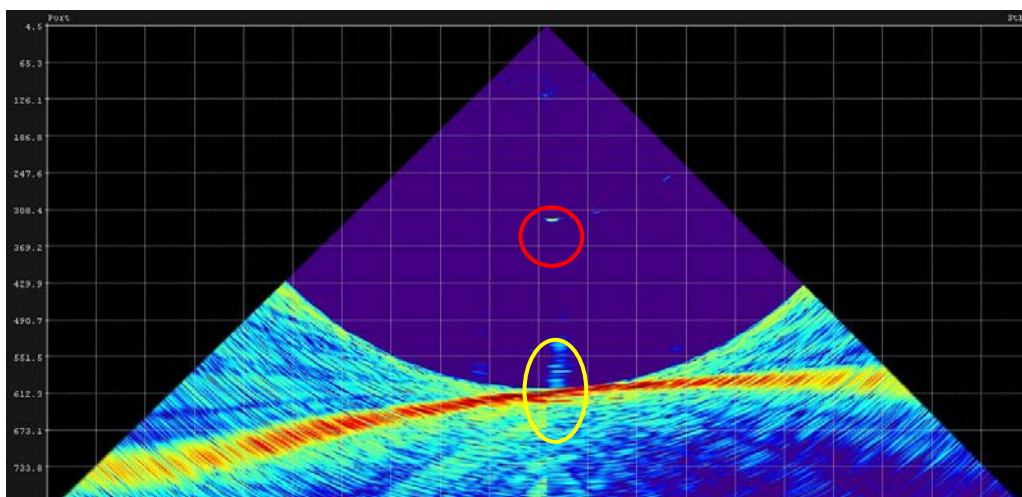


Figure 3-11 Echogramme polaire obtenu avec le sondeur de coque EM302 montrant l'écho du carottier à 300 m de la surface (cercle rouge) et les échos d'une source de gaz à 600 m de profondeur (ellipse jaune). Ce suivi, effectué en temps réel, permet d'orienter les opérations de prélèvement afin d'être au plus proche de la cible à échantillonner (source hydrothermale ou de gaz, pockmark, etc.), © Ifremer.

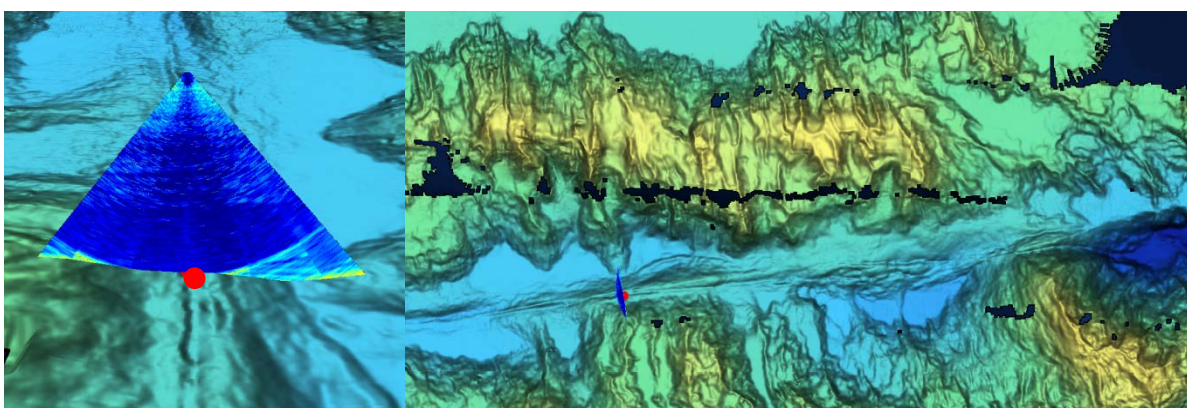


Figure 3-12 Echogramme polaire obtenu avec le sondeur de coque EM122 (à gauche) avec le point d'arrivée au fond de la bathysonde rosette (4000 m, cercle rouge) et le positionnement de l'opération (à droite) sur la cartographie de la zone (© Ifremer, logiciel SSC/GLOBE/3DV).

L'acquisition et l'enregistrement des données de colonne d'eau des sondeurs, compatibles avec le mode bathymétrique, doivent être réalisés en continu au cours d'une campagne (transits, profils et stations) avec le maximum de résolution verticale. Le sondeur doit être synchronisé lorsque d'autres équipements acoustiques sont mis en œuvre en parallèle (sondeur de sédiments, ADCP, etc.) afin d'éviter les échos parasites générés par ces émissions.

Si les outils de traitement de données bathymétriques sont déjà opérationnels, les outils de traitement des échos de la colonne d'eau sont en phase de développement ou d'adaptation depuis 2010 et ne permettent pas encore un traitement automatisé temps réel de ce type de données. Cependant, il est déjà possible de visualiser et d'expertiser les données de colonne d'eau en temps quasi-réel (différé d'une heure) au cours d'une campagne.

Les outils de traitement⁷ permettent aujourd'hui d'intégrer les données colonne d'eau aux données de terrain (bathymétrie et réflectivité) ainsi que la détection et le pointage d'échos présents dans la colonne d'eau.

La visualisation combinée à l'information multi-échelle et multi-capteur offre la perspective d'une meilleure expertise des échos ou anomalies acoustiques de la colonne d'eau pour une identification correcte de ceux susceptibles d'être attribués à des sorties de gaz ou de fluides.

Cette approche multi-échelle et multi-capteurs associée aux données acoustiques de la colonne d'eau permet d'orienter l'élaboration de la stratégie d'échantillonnage au cours d'une campagne et d'optimiser le temps d'utilisation des navires et engins en mer.

3.2.4. Prélèvements de surface : dragage, carottages

Les méthodes de prélèvement d'échantillons à partir des navires sont les dragages pour les échantillons de roche et les carottages pour des échantillons de sédiments.

Le dragage consiste à tracter, à partir du navire, un filet à mailles d'acier surmonté de dents métalliques (Tableau 3-15) afin de collecter les roches du fond. L'incertitude sur le lieu exact de prélèvement de l'échantillon reste l'un des problèmes du dragage.

Lorsque que le fond est composé de sédiments, on peut réaliser des carottages à partir du navire. De nombreuses méthodes de carottages existent (Tableau 3-15). Le carottier Kullenberg est constitué d'un tube de métal dans lequel on glisse un tube PVC pour récolter le sédiment, le tout surmonté d'un poids. Largué depuis la surface, il s'enfonce plus ou moins dans le sédiment selon sa nature. La carotte peut prélever le sédiment sur plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Les carottiers USNEL, aussi largués depuis la surface, servent à prélever la faune des sédiments superficiels (< 1m). Ce sont de grandes boîtes de 0,25 m². Ils sont largués ouverts et un déclencheur sert à les activer une fois qu'ils touchent le fond. Un indicateur de tonnage sur le câble grand fond nous indique si le carottage a été efficace. Les carottiers multitubes sont des rosettes de plusieurs carottiers-tube de 10cm de diamètre. Déployés depuis le bord, ils sont utilisés pour récolter des sédiments de surface, effectuer des mesures chimiques dans les eaux interstitielles ou encore échantillonner la méiofaune ou les micro-organismes des couches superficielles du sédiment (< 60 cm).

⁷ Exemple : chaînes de traitement SonarScope/3DViewer/GLOBE et MOVIES3D (© Ifremer).

3.2.5. Etudes in situ

Les corps minéralisés, en particulier les minéralisations sulfurées hydrothermales, sont localisés sur des surfaces souvent inférieures au km². Les nodules ou les encroûtements présentent également des reliefs locaux qu'il est nécessaire de reconnaître à l'échelle métrique ou centimétrique pour en caractériser les zones les plus riches et connaître les différents types d'habitats.

Les études in situ sont réalisées grâce à des équipements permettant de travailler à l'échelle locale afin d'atteindre la haute résolution requise (quelques centimètres) pour caractériser les minéralisations. Elles se font à partir d'engins submersibles habités, télé-opérés (ROV), tractés (sonar latéral) ou autonomes (AUV) sur lesquels divers instruments scientifiques sont installés. Elles permettent de réaliser des prélèvements, des mesures et des analyses précises près ou sur le fond.

La mise en œuvre des mêmes méthodes de cartographie (bathymétrie et imagerie) que celles de surface mais réalisées près du fond avec des sondeurs de dernière génération plus performants a permis, depuis moins d'une dizaine d'années, l'acquisition de données dites de « haute résolution » c'est-à-dire ayant une résolution d'une dizaine de centimètres selon les conditions des levés. Ces données révolutionnent la vision de nombreux objets géologiques. En permettant aux géologues, chimistes, biologistes de travailler avec des données acoustiques ayant enfin l'échelle des plongées in situ, elles contribuent à une meilleure connaissance de la distribution des ressources minérales et permettent de mieux décrire les interactions entre phénomènes géologiques et activité biologique et microbiologique.

3.2.5.1. *Les engins sous-marins*

Les engins utilisés sont de quatre types: les engins remorqués près du fond (par exemple sonar), les engins télé-opérés depuis la surface via un lien avec le navire (ROV), les submersibles habités, et les engins autonomes (drones ou AUV).

Les engins remorqués

Il s'agit d'instruments remorqués près du fond, par exemple de sonars latéraux qui permettent une étude de la topographie du fond et de la nature des substrats géologiques. Le principe du sonar à balayage latéral repose sur la variation du coefficient de rétrodiffusion du fond. Le signal acoustique, de fréquence 170 - 180 kHz, émis par les deux transducteurs logés dans le "poisson", est renvoyé avec plus ou moins d'intensité selon les caractéristiques de nature et de forme du fond. Il fournit une image « acoustique » dont les teintes de gris varient selon la nature et la morphologie des fonds. Ces images indiquent la répartition des différentes formations affleurant sur le fond et leur morphologie détaillée. Le système peut être utilisé pour cartographier de larges secteurs par assemblage de bandes parallèles, en réalisant des mosaïques. La résolution du sonar permet de distinguer des objets de 0,5 m.

Le SAR d'Ifremer a été construit dans les années 1980 pour l'exploration des champs de nodules. Il est constitué d'un lest dépresseur de 2 tonnes et d'un poisson instrumenté de 2,5 tonnes. L'ensemble lest-poisson est relié au support de surface par un câble électro-porteur coaxial de 8 500 m et évolue à des profondeurs variant de 200 m à 6 000 m. Le poisson est remorqué à une altitude optimale de 70-80 m, à une vitesse moyenne de 2 nœuds. Il est équipé de deux sonars (170 kHz pour l'antenne bâbord et 190 kHz pour l'antenne tribord) de portée 750 m, permettant d'insonifier des couloirs successifs de 1 500 m avec une résolution de 6,5 m à 750 m et de 1 m à 100 m. Il est également équipé d'un sondeur de sédiment de 3,5 kHz de

résolution 0,75 m pour une pénétration de 80 m. Les autres capteurs, installés sur le poisson, sont une balise acoustique (base longue) servant au positionnement de l'engin, des capteurs d'immersion, d'altitude, de cap et de vitesse, et un magnétomètre.

Les engins télé-opérés (ROV)

Les ROV sont des robots sous-marins rattachés à un navire par un ombilic. Ils sont constitués d'un véhicule sous-marin relié à un poste de contrôle, à la surface, par un ensemble de câbles transportant l'énergie électrique, les signaux vidéo et les données dans les deux sens, entre le robot et l'opérateur. Ils peuvent être équipés de dispositifs hydrauliques pour améliorer leur puissance ou leurs fonctionnalités. La plupart des ROVs sont équipés au moins d'une caméra vidéo et d'un éclairage lumineux. Du matériel supplémentaire est généralement ajouté pour augmenter les capacités du véhicule. Les ROV peuvent ainsi être pourvus de sonars, de magnétomètres, d'appareil photo, de bras manipulateurs ou préleveurs en nombre variable, d'échantillonneurs d'eau, de thermomètres et de néphélomètres (instruments mesurant la turbidité de l'eau). (Remotely Operated Vehicles Committee of the Marine Technology Society, 2013)

La taille et le poids des ROVs sont très variables : de moins d'un mètre à quelques mètres en largeur, longueur et hauteur et de quelques dizaines de kilos à quelques tonnes. Les dimensions de ces robots dépendent de leurs fonctions, de l'équipement embarqué, de la profondeur à laquelle ils doivent opérer.

Les ROV sont utilisés en recherche mais également en industrie (pose de câbles sous-marins, forage, maintenance d'installations pétrolières, etc.). A l'heure actuelle, on trouve dans le commerce de nombreux ROVs capables d'opérer à 1000-2000m de profondeur. Il existe aussi quelques modèles capables d'aller jusqu'à 6000m de profondeur (SAAB SeaEye, 2013; Eca Robotics, 2013; FMC Technologies, 2013; Oceaneering, 2013).

Exemple du ROV Victor 6000

Le ROV Victor peut opérer jusqu'à 6000 m de profondeur (Figure 3-3). C'est un out il particulièrement adapté aux travaux de longue durée en station et au recueil de mesures en portée visuelle du fond.

La télé-opération, depuis la surface, présente de nombreux avantages en intervention scientifique profonde, notamment celle d'accéder en temps réel à un plus grand nombre d'informations, de diffuser ces informations en temps réel - grâce à la fibre - à un grand nombre d'observateurs, d'explorer, ou d'opérer sur site, pendant de longues périodes. Les sous-marins habités ne peuvent demeurer que quelques heures au fond en raison de leur autonomie d'énergie limitée.

Les sous-marins téléguidés sont pilotés depuis la surface à partir d'un conteneur de pilotage dédié et la plongée peut être suivie par plusieurs membres de l'équipe scientifique en fonction des spécialités requises et des découvertes effectuées.

Depuis quelques années, le ROV a été équipé d'un module permettant la cartographie bathymétrique et acoustique haute résolution près du fond. Il s'agit d'un sondeur Reson SeaBat 7125 permettant de travailler jusqu'à une altitude de 100m au-dessus du fond. Les profils sont réalisés selon un espacement et une altitude constante afin d'obtenir une

couverture totale et une carte détaillée pouvant atteindre des résolutions de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

De plus, des levés réalisés à 10 m d'altitude, permettant la constitution de mosaïques optiques (juxtaposition de photographies en noir et blanc acquises par la caméra haute résolution OTUS), peuvent être effectués simultanément à l'acquisition par le sondeur multifaisceaux. Ces levés sont précieux pour travailler sur les limites d'extension des minéralisations et la nature du fond. Ils renseignent sur l'étendue, la nature des habitats, la distribution des faunes et l'évolution temporelle des écosystèmes.

Lors du déploiement du ROV pour l'observation *in situ*, les équipements standards comprennent des caméras vidéo, des projecteurs, des capteurs d'environnement ainsi que deux bras manipulateurs très performants dont l'un est utilisable en mode programmable. Des équipements scientifiques peuvent être mis en œuvre à partir d'un module placé sous le ROV : aspirateur à faune, seringues titane, sondes de température, carottiers tube, marqueurs de site, mesures de flux, prélèvement d'eau par pompage, CTD et analyseur chimique *in situ*. Le ROV peut déployer sur le fond de nombreux analyseurs biologiques et microbiologiques permettant l'analyse temporelle des environnements.

L'engin et donc les cartographies et prélèvements, mesures ou analyses effectués sont positionnés au mètre près grâce à un système acoustique à base ultra-courte, POSIDONIA.



Figure 3-13 Vue du ROV Victor 6000 © Ifremer.

Les submersibles habités

Ils sont de deux types selon qu'ils sont habités (submersibles) ou pas (AUV pour

Les submersibles habités (Nautile, Alvin, MIR, Shinkai ou Jialong, Tableau 3-19) permettent l'exploration jusqu'à 6000 m (11 000 m pour le DeepSea Challenger) de 90% des fonds marins. Généralement, trois personnes (pour le Nautile, pilote, co-pilote et chercheur)

prennent place dans une sphère de titane qui permet la résistance aux pressions extrêmes de ces environnements. Des propulseurs équipent le véhicule et les jeux de batteries actuels autonomisent l'engin sur un trajet près du fond de près de 5 ou 6 heures (profil de 8 km de long maximum). Des projecteurs, des caméras, des bras articulés permettent un travail de détail sur le fond. Comme avec le ROV, des outils de mesures et d'analyses peuvent être déployés (Figure 3-13).

Les sous-marins habités furent l'objet de nombreuses expéditions d'envergure. C'est, en effet, à bord de l'Alvin que les sources hydrothermales furent découvertes en 1977. C'est avec le sous-marin russe Mir qu'une première descente avec les humains sur le plancher du pôle nord géographique fut effectuée en 2007. Le sous-marin français Nautille est parfois utilisé pour d'autres missions que l'exploration scientifique, notamment dans le cadre de l'enquête sur le naufrage du Prestige ou l'exploration des fonds pour retrouver les boîtes noires de l'avion du vol Rio-Paris en 2009-2010.

Les engins autonomes (drones ou AUV)

Les AUV (Autonomous Underwater Vehicle) (Tableau 3-18) sont des engins autonomes non habités, dont le travail consiste essentiellement à réaliser des levés cartographiques de haute résolution. Pour l'instant, la profondeur d'intervention des AUVs français (Figure 3-13) est limitée à 3000 m. La vitesse de l'engin est relativement importante (3.5nds). Son autonomie peut atteindre 100 km sur le fond (~20 km² en 24h pour un levé bathymétrique complet). Les AUVs sont équipés de sondeurs de haute résolution. Les levés réalisés - et donc les outils installés pour la plongée sur l'engin : sismique, bathymétrie et imagerie, gravimétrie, magnétisme, température, néphélométrie, ...- seront différents suivant la stratégie visée.

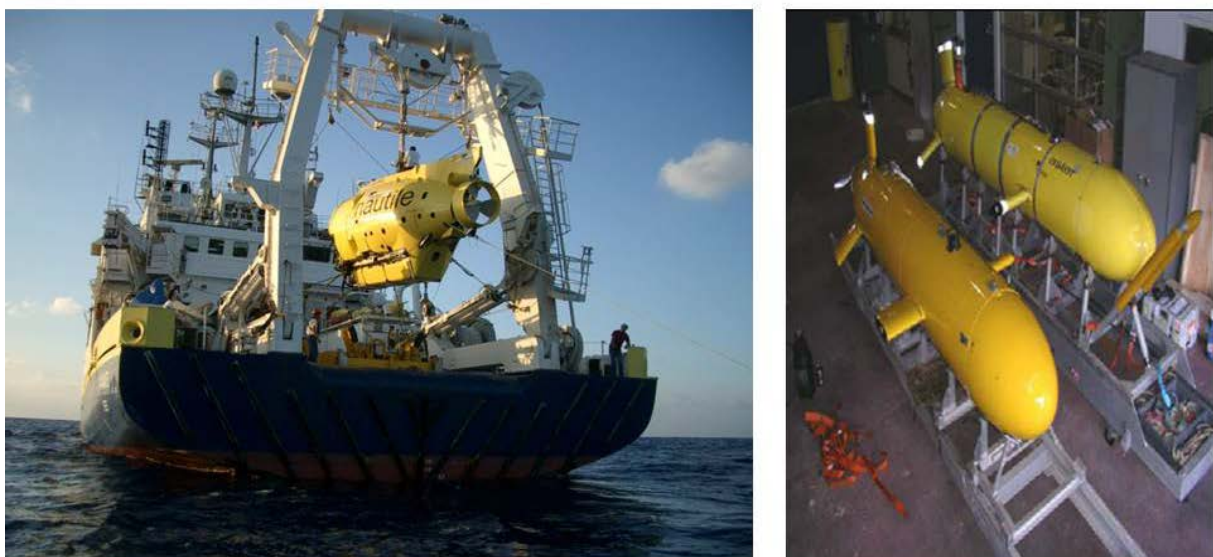


Figure 2-14 A gauche : mise à l'eau du submersible Nautille à partir du N/O l'Atalante. A droite : les AUV AsterX et IdéfiX © Ifremer.

Tableau 3-18 Principaux ROV utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 3000 m de profondeur.




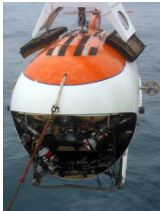



Nom	JASON I et II	ROPOS	KAIKO 7 000 II	VICTOR	LUSO	Isis	HOLLAN DI	Quest 5	PHOCA	Kiel 6000
Photos										
Pays	USA	Canada	Japon	France	Portugal	United Kingdom	Irlande	Allemagne	Allemagne	Allemagne
Propriétaire	Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)	Canadian Scientific Submersible Facility (CSSF)	Jamstec	Ifremer	Ministère de la Défense	University of Southampton	Marine Institute	University of Bremen	Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel GEOMAR	Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel GEOMAR
Opérateur	Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)	Canadian Scientific Submersible Facility (CSSF)	Jamstec	Génavir	Portuguese Task Group for the Extension of the Continental Shelf (EMEPC)	National Oceanography Centre	Marine Institute	Research Center Ocean Margins	GEOMAR	GEOMAR
Année de construction	1988 (Jason I) 2002 (Jason II)	1996	1993	2000	2008	2003	2008	2003	2010	2007
Profondeur maximum (m)	6 500	5 000	7 000	6 000	6 000	6 500	3 000	4 000	3000	6000
Longueur (m)	3,4	1,7	3,0	3,0	2,1	2,7	3,0	3,3	2,1	3,5
Largeur (m)	2,2	2,6	2,0	2,0	1,8	1,5	1,8	2,3	-	-
Hauteur (m)	2,4	1,4	2,1	0,7	-	2,0	1,8	1,9	1,7	2,5
Poids (t)	3,7	-	3,9	4,0	2,2	3,0	3,2	3,5	1,6	3,7
Adresse internet	http://www.whoi.edu/ndsfVehicles/Jason/ Consultée le 14 mai 2013.	http://www.ropos.com/ Consultée le 14 mai 2013.	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/kaiko7000.html Consultée le 14 mai 2013.	http://flotte.ifremer.fr/Présentation-de-la-flotte/Systemes-sous-marins/VICTOR-6000 Consultée le 14 mai 2013.	http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFMOS51C1271C Consultée le 14 mai 2013.	http://noc.ac.uk/news/isis-resurfaces-serve-uk-marine-science Consultée le 14 mai 2013.	http://www.marine.ie/home/Research+Vessels.htm Consultée le 14 mai 2013.	http://www.marum.de/ROV_QUEST_4000m.html Consultée le 14 mai 2013.	http://www.geomar.de/index.php?id=rovp/phoca Consultée le 14 mai 2013.	http://www.geomar.de/index.php?id=rovkiel6000 Consultée le 14 mai 2013.

Tableau 3-19 Principaux submersibles habités utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 3 000 m de profondeur.

Nom	Alvin	Alvin upgrade	Mir-I et Mir-II	Nautile	Jiaolong (Harmony)	Shinkai 6 500
Photo						
Pays	USA	USA	Russie	France	Chine	Japon
Propriétaire	Marine Nationale	Marine Nationale	-	Ifremer	-	Jamstec (Japanese Agency for Marine Earth Science and Technology)
Institut gestionnaire	Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)	Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)	Russian Academy of Sciences	Opéré et maintenu par GENAVIR, l'Ifremer en assure le suivi technique et les évolutions	CSSRC – China Ship Scientific Research Center	Jamstec
Profondeur maximum de travail (m)	4 500	6500	6 000	6 000	7 500	6 500
Année de construction	1964	En cours	1987	1984	2010	1989
Nombre de plongées	> 4 000	0	-	> 1 500	-	1 300 en 2012
Longueur (m)	7,0	7,04	7,8	8,0	8,2	9,7
Largeur (m)	2,6	2,6	3,8	2,7	3,0	2,8
Hauteur (m)	3,7	3,6	3,0	3,4	3,4	4,1
Poids (t)	17,0	20,0	18,6	18,5	25,0	26,7
Diamètre intérieur de la sphère habitée (m)	4,07	4,84	2,1	2,1	2,1	2,0
Matériel principal de la sphère	Titane	-	Nickel	Titane	-	Titane
Epaisseur de la sphère (mm)	50,0	-	50,0	-	-	73,5
Hublot (nombre et diamètre)	3	5	3 (12 et 20cm)	3	3 (12 et 20 cm)	3 (14 cm)

Pilote (nb)	1	1	3	2	3	2
Scientifique (nb)	2	2		1		1
Vitesse maximum (nœud)	-	-	5,0	1,7	2,5	2,7
Autonomie : • durée moyenne des plongées (h) • survie	• 6 à 10 • -	• 8 à 12 • -	• 17 à 20 • 246	• 5 (travail sur le fond à 6 000 m) • 120	• 12 • 72	• 8 • 129
Propulsion (nb de propulseurs hydrauliques)	5	-	3	4	-	-
Bras (nb)	2	-	2 (peut prélever des poids allant jusqu'à 80 kg)	2	-	2
Charge possible (kg)	181	191	290	200	220	150
Évènements	<ul style="list-style-type: none"> Découverte des sources hydrothermales en 1977. Exploration de l'épave du Titanic en 1986. 	-	<ul style="list-style-type: none"> Première descente avec humains sur le plancher du pôle nord géographique en 2007. Expédition dans le lac Baikal en 2008. 	<ul style="list-style-type: none"> Enquête autour du naufrage du Prestige. Exploration pour retrouver les boîtes noires de l'avion du vol Rio-Paris en 2009-2010. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus grande profondeur atteinte pour les sous-marins habités. 	-
Navire de support	ATLANTIS	ATLANTIS	Akademik Mstislav Keldysh	<i>POURQUOI PAS ? ATALANTE</i>	-	Yokosuka
Adresse internet	http://www.whoi.edu/alvin/ Consultée le 3 mai 2013.	-	http://www.ocean.ru/eng/content/view/23/36/ http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/mir/mir.html Consultée le 6 mai 2013.	http://flotte.ifremer.fr/flotte/Presentation-de-la-flotte/Systemes-sous-marins/Nautile#reference Consultée le 7 mai 2013.	http://tangle.coas.oregonstate.edu/martech/dswensen/info/INMARTECH/INMARTECH_H_2008/proceedings/session%202/Session2-Liu.pdf Consultée le 7 mai 2013.	http://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/shinkai6500.html Consultée le 7 mai 2013.

Tableau 3-20 Quelques AUVs utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 1000m de profondeur.









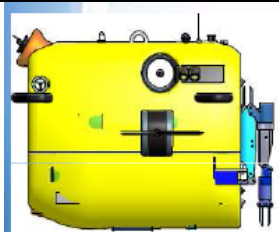
Nom	Aster ^x et Idef ^x	Autosub	Seal	Remus 3000	Remus 6000
Photo					
Pays	France	Grande Bretagne	Allemagne	USA	USA
Institut gestionnaire	Ifremer	Southampton Oceanographic Center	Marum	Woods Hole Oceanographic Institution	Woods Hole Oceanographic Institution
Profondeur maximum de travail (m)	3 000	-	5 000	-	6 000
Longueur (m)	4,5	7,0	5,5	146 in	3,84
Diamètre (m)	-	0,9	0,74	14 in	0,71
Largeur (m)	-	-	-	-	-
Hauteur (m)	-	-	-	-	-
Poids (kg)	800	-	1 300	335	862
Vitesse maximum (noeuds)	5	-	2.4 m/sec	-	≥ 5
Autonomie (h et/ou km)	<ul style="list-style-type: none"> • 14h ou 80 km avec une charge utile 250 W (standard); 300 k m avec pile à combustible H²O² (R&D) 	-	≥ 19 h (avec une charge standard)	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum de 77 heures. • Plongée classique de 22h. 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de plongée classique ≥ 22 heures.

Tableau 3-21 Principaux HROVs utilisés en recherche océanographique pour des plongées de plus de 1000m de profondeur.

Nom	Abe (Autonomous Benthic Explorer)	Sentry	Nereus	HROV Ifremer
Photo				
Pays	USA	USA	USA	France
Institut gestionnaire	Woods Hole Oceanographic Institution	Woods Hole Oceanographic Institution	Woods Hole Oceanographic Institution	Ifremer
Profondeur maximum de travail (m)	4 500	6 000	11 000	2 500
Longueur (m)	3,0	2,9	-	2,2
Diamètre (m)	-	-	-	-
Largeur (m)	2,0	2,2 (avec ailerons)	-	1,9
Hauteur (m)	2,5	1,9	-	1,6
Poids (kg)	-	1 300	2 800	1 500
Vitesse maximum (noeuds)	1,4	-	-	3
Autonomie (h et/ou km)	• Maximum de 12 heures (recharge de 80% en ~ 6 h)	• ≥ 36 h de survol suivant la vitesse.	-	6 à 12h

3.2.5.2. Les données acquises

Bathymétrie

A l'Ifremer, des données bathymétriques de haute résolution sont acquises par deux types d'engins in situ : le ROV et l'AUV. La nature des données varie en fonction de l'altitude au-dessus du fond à laquelle l'engin est déployé et des vitesses d'acquisition. Pour le ROV, la fauchée théorique est de 4 fois la hauteur d'eau sur terrain plat. Le ROV peut être mis en œuvre entre 10 m et 100m du fond (Tableau 3-22).

Sur l'AUV, le sondeur est un Kongsberg EM2040 (cf. description plus haut). Le système EM2040 est un sondeur multifaisceaux 200/300/400 kHz, de 150 degrés d'ouverture, composé d'antennes émettrices placées à l'avant du véhicule et d'un Processor Unit (PU) installé à l'intérieur de l'enceinte principale. Sa profondeur maximale de plongée est de 3000m.

Tableau 3-22 Quelques exemples d'acquisitions possibles en fonction du mode de déploiement des engins inhabités.

Engins	Altitude	Vitesse	Couverture	Résolution des cartes
ROV Victor	50 m	0,5 nds	2 km ² /24h	1 m
ROV Victor	20 m	0,5 nds	1 km ² /24h	25 cm
ROV Victor	10 m	0,3 nds	200 m ² /3h	10 cm
AUV	70 m	5 nds	20 km ² /24h	1 m
AUV	100 m	5 nds	30 km ² /24h	1,5 m

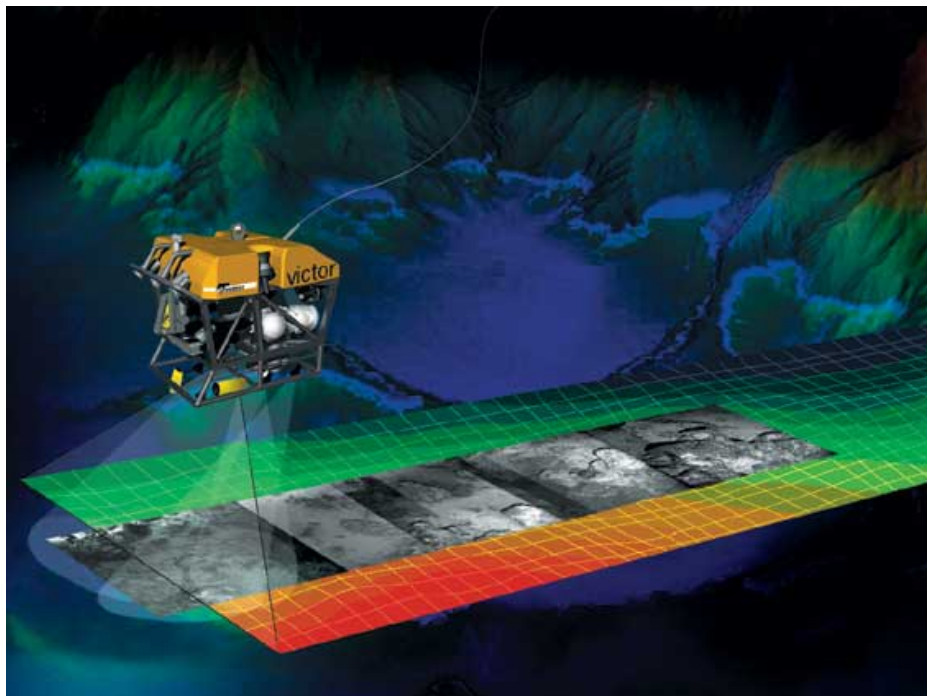


Figure 3-15 Principe d'acquisition des données de bathymétrie HR et mosaïque OTUS par le ROV Victor
© Ifremer.

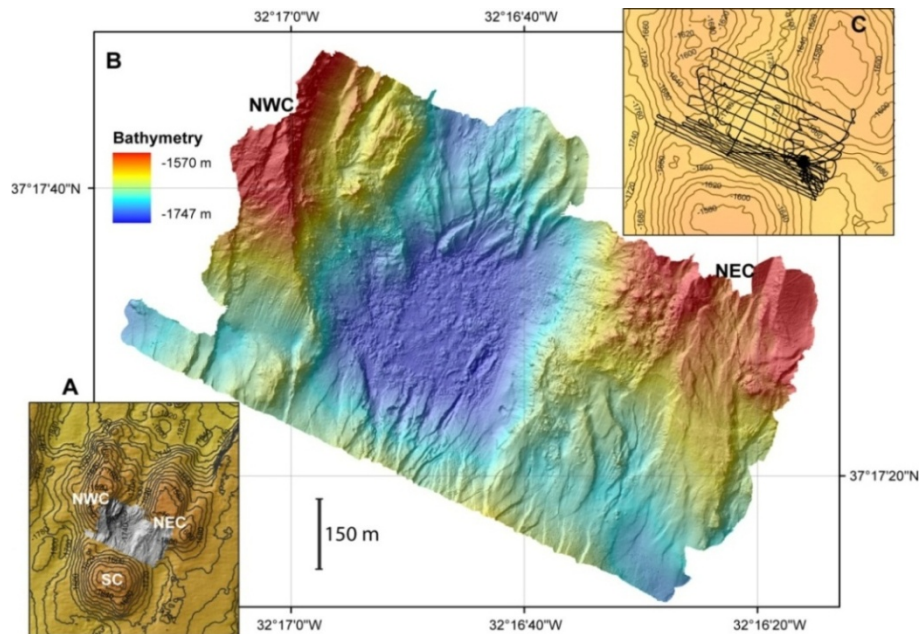


Figure 3-16 Carte haute résolution de la zone Lucky Strike (Atlantique Nord; Ondréas et al, 2009) acquise par le sondeur du ROV Victor6000.

Le cartouche A montre la localisation et l'étendue du levé HR par rapport à la bathymétrie de surface existante. Le cartouche C présente la distribution de profils ROV nécessaire à l'acquisition des données présentées en B.

Imagerie acoustique

Comme pour les données acquises depuis la surface, une information sur la nature du fond est obtenue par les sondeurs du ROV Victor-6000 et des AUVs (sondeur Reson SeaBat 7125 pour le ROV et sondeur Kongsberg EM2040 pour les AUV) et utilisée dans l'étude du contexte géologique des ressources minérales. Comme en bathymétrie, la résolution et la couverture sont étroitement liées aux conditions de mise en œuvre (vitesse, altitude) mais aussi à la morphologie du fond (pentes fortes ...). Les données d'énergie récupérées forment des cartes en niveau de gris qui reflètent la nature des fonds (réflectivité). Ces informations sont souvent couplées à celles de la bathymétrie haute résolution et aux dragages réalisés afin de définir les limites des structures géologiques de la zone explorée. Elles sont précieuses pour contraindre la localisation et l'extension des substrats durs, la distribution des minéralisations, la présence ou pas d'encroûtements et l'étude des faunes.

Données acoustiques de la colonne d'eau

L'acquisition de ce type de donnée est disponible depuis le début des années 2000 sur des engins *in situ*, i.e. le ROV et les AUV, d'abord via l'intégration des sondeurs monofaisceau pour la détection des cibles biologiques (krill et poissons, Scalabrin, Marfia et al. 2009) ou non-biologiques (Figure 3-16, Foucher, Dupré et al. 2010), ensuite par l'option "colonne d'eau" des sondeurs multifaisceaux de bathymétrie installés⁸.

⁸ à noter que le sondeur multifaisceaux installé sur le ROV VICTOR permet seulement l'acquisition des données colonne d'eau du type représenté par les sonars latéraux.

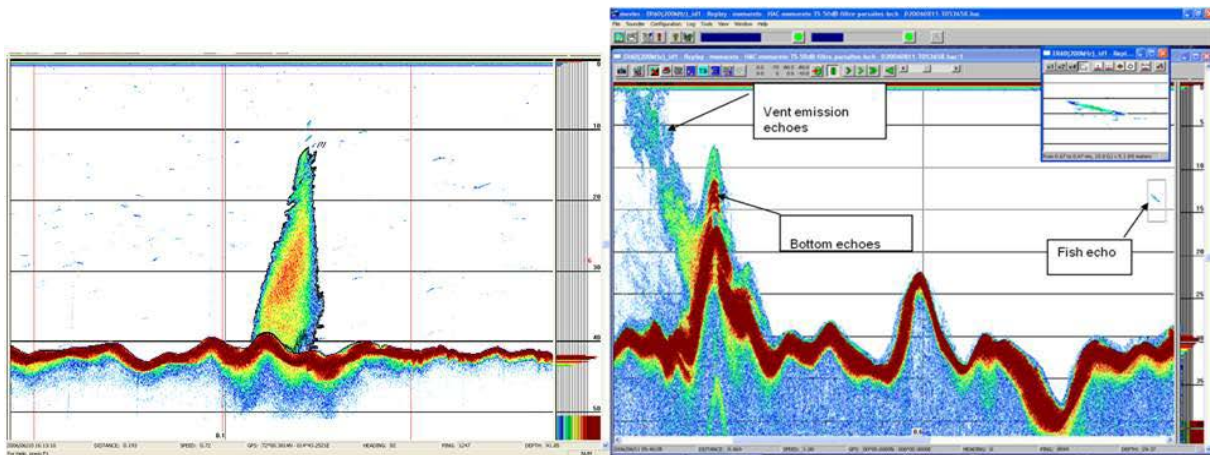


Figure 3-17 Sources de gaz (à gauche) et hydrothermale (à droite) détectées avec le sondeur monofaisceau 200 kHz installé sur le ROV VICTOR.

A gauche: La source de méthane a d'abord été détectée à partir du sondeur monofaisceau du N.O. Pourquoi Pas? pendant la campagne Viking en 2006 au large de la Norvège, puis localisée avec précision en périphérie du volcan de boue Hakon Mosby (HMMV) à 1200 m de profondeur à partir de la visualisation acoustique de la colonne d'eau du sondeur embarqué sur le ROV VICTOR, présentée.

A droite, l'émission de fluide de la cheminée hydrothermale "Tour Eiffel", à 1700 m de profondeur sur la dorsale médio-atlantique, apparaît lors d'une plongée VICTOR pendant la campagne Momareto en 2006. Noter que les poissons sont également détectés (© Ifremer, logiciel MOVIES).

L'utilisation récente de l'option "colonne d'eau" du sondeur multifaisceaux de bathymétrie EM2040 installé sur les AUVs AsterX et IdefiX permet une localisation précise des sites hydrothermaux actifs mais également des sites fossiles (Figure 3-18).

Le couplage AUV/Nautile et AUV/ROV permet, au cours d'une campagne, d'obtenir la localisation et l'étendue des sites à partir des plongées AUV et, par la suite, une exploration et un échantillonnage direct des sites avec le Nautile ou le ROV.

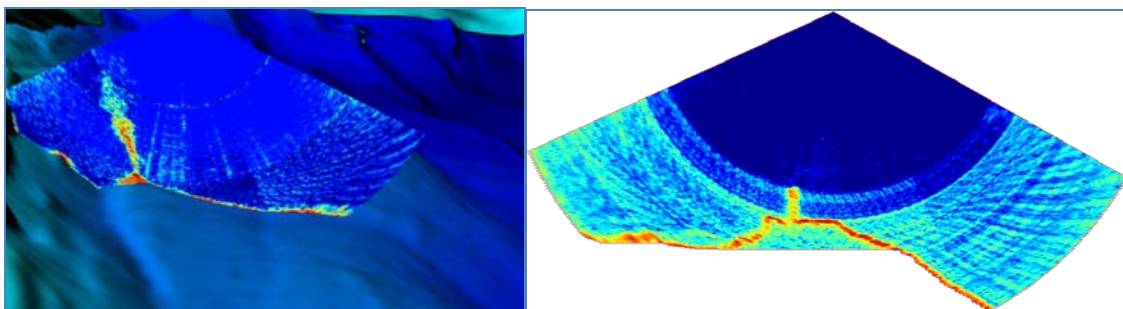


Figure 3-18 Exemple d'une cheminée hydrothermale active (à gauche) et d'une cheminée non-active (à droite) détectées, identifiées et localisées à partir des données acoustiques de colonne d'eau acquises avec le sondeur EM2040 installé sur un AUV (© Ifremer, logiciel SSC/GLOBE/3DV).

Observations in situ

L'utilisation des submersibles (ROV Victor ou Nautile) au cours d'une campagne rend possible la réalisation d'expérimentations spécifiques sur des zones à panaches (fluides ou bulles). Ces expérimentations, combinées aux prélèvements effectués, ont comme objectif principal la validation de la donnée acoustique à partir d'observations *in situ*. En particulier, il s'agit de définir la nature des échos (fluides, gaz ou hydrates de gaz), les caractéristiques physiques et chimiques, le débit de sources, la taille et la forme des cibles (bulles de gaz).

Le Module de Mesures en Route (MMR) du ROV Victor est également équipé d'un sondeur multifaisceaux qui pourrait comporter une option colonne d'eau et d'un sondeur monofaisceau halieutique (ER-60 200 kHz), capable de fournir une estimation de la taille des cibles par la mesure de l'indice de rétro-diffusion.

Sismique

Depuis quelques années, un nouvel outil, le PASISAR, a été développé pour le SAR (voir 3.2.5.1 "les engins remorqués") afin de permettre l'acquisition de données sismiques près du fond par grande profondeur d'eau (6000m). Il est constitué d'une source sismique conventionnelle en surface et d'une flûte monotrace, tractée par le SAR à environ 100 m au-dessus du fond de la mer. C'est un outil à fort potentiel, qui procure des données sismiques de qualité unique par grande profondeur d'eau. Ces données sont très complémentaires des données acquises simultanément par le SAR (sonar latéral, 3.5 kHz, magnétomètre).

D'autres données sismiques peuvent être acquises lors de la mise en œuvre de l'AUV. Le sondeur de sédiment Chirp installé récemment sur l'engin est un équipement acoustique permettant de visualiser les couches sédimentaires au-dessous du fond de la mer jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur avec une résolution de quelques mètres.

Durant certaines missions, le module sondeur de sédiments permet de préciser la structure interne des zones de sortie de fluides et de faire le lien avec des conduits potentiels de remontée. Il permet une étude spatio-temporelle des sites de minéralisation.

Gravimétrie, magnétisme

La résolution des mesures de champ potentiel dépend de la distance entre les sources (pesantes ou aimantées) et l'altitude du levé. L'effet d'une source ponctuelle varie en effet de façon inversement proportionnelle au carré (en gravimétrie) ou au cube (en magnétisme) de cette distance. Une manière d'augmenter la résolution des mesures consiste donc à se rapprocher des sources. Les engins sous-marins offrent l'opportunité de réaliser de tels levés de haute résolution.

La gravimétrie sous-marine a été jusqu'à présent réalisée sous forme de mesures ponctuelles, avec un gravimètre terrestre embarqué dans des sous-marins habités (Nautile, Alvin). Cette technique permet de faire des mesures proches des sources mais le nombre de points de mesure reste réduit et la précision est considérablement dégradée à cause des difficultés de stabilisation des engins. Des développements sont en cours pour adapter de nouveaux capteurs à l'exploration sous-marine, de manière à pouvoir disposer de mesures en continu.

Le magnétisme marin de haute résolution, réalisé à proximité du fond, s'est rapidement révélé un excellent outil pour mettre en évidence les sites hydrothermaux actifs ou fossiles. Les levés sur le site TAG, à substrat basaltique, ont montré une forte anomalie négative, interprétée comme le reflet de la désaimantation thermique ou de l'altération des minéraux magnétiques dans un conduit hydrothermal (Tivey et al, 1993). Ceci s'explique par la forte aimantation naturelle des basaltes extrusifs, qui portent l'essentiel des anomalies magnétiques observées par les levés de surface. Ce résultat d'un défaut d'aimantation aux sites hydrothermaux à substrat basaltique a été confirmé à plusieurs reprises, sur la dorsale Juan de Fuca dans le Pacifique (Tivey et Johnson, 2002), la dorsale médio-atlantique (Tivey and Dyment, 2010), la dorsale

ouest indienne (Zhu et al, 2010), et le bassin d'arrière arc des Mariannes (Nakamura et al, 2013). L'analyse de données acquises sur le site inactif Krasnov, sur la dorsale médio-atlantique, montre clairement que ce défaut d'aimantation subsiste après l'arrêt de l'activité hydrothermale, démontrant ainsi que l'altération joue le rôle principal et soulignant l'importance des événements hydrothermaux dans les bilans chimiques de l'océan (Szitkar et al, 2014a). Les levés réalisés sur les sites hydrothermaux de haute température à substrat ultramafique, présents sur les dorsales à taux d'expansion lent, ont récemment révélé une signature très différente (Dyment et al, 2005; Szitkar et al, 2014b). Les sites de faibles dimensions (de l'ordre de la dizaine de mètres), généralement marqués par des manifestations explosives, ne montrent pas de signature magnétique (par exemple les sites Logatchev et Ashadze 2 de la dorsale médio-atlantique), alors que les sites de plus grandes dimensions (de l'ordre de la centaine de mètres), qui présentent des édifices construits et magnétiquement cohérents, sont marqués par une forte anomalie positive, preuve d'une forte aimantation associée à ces sites (exemple des sites Rainbow et Ashadze 1 de la dorsale médio-atlantique). L'analyse des propriétés magnétiques d'échantillons collectés sur le site Rainbow montre que ce ne sont ni les serpentines (dont la formation s'accompagne généralement de celle de magnétite), ni les sulfures (parmi lesquels on trouve parfois de la magnétite hydrothermale), qui portent cette forte aimantation, mais les serpentines imprégnées de sulfures. Cette observation suggère que la magnétite formée par serpentinisation à haute température porterait une aimantation plus forte, qui se trouverait en outre protégée d'une oxydation rapide par le milieu réducteur du site hydrothermal. Les sites de basse température n'ont pas encore fait l'objet d'études détaillées. En tout état de cause, **il apparaît que les levés magnétiques de fond, réalisés par submersible, ROV ou AUV, permettent de détecter et de caractériser les champs hydrothermaux actifs et fossiles, en évaluant dans certains cas la géométrie et le volume des minerais sulfurés.** Il n'est pas sans ironie de noter que, à terre, les levés aéromagnétiques sont la première technique mise en œuvre pour rechercher des gisements métallifères (exemples canadien, russe, australien et africain).

3.2.5.3. Forages d'exploration

L'étude des objets minéralisés et la compréhension des processus de formation passent par une connaissance de leur composition minérale et chimique en trois dimensions. Les minéralisations sulfurées présentent classiquement des zonations verticales ou latérales. Le cuivre et les métaux associés sont concentrés au cœur des édifices tandis que le zinc et les métaux associés sont enrichis à l'extérieur. Les circulations de fluides se traduisent également par des zones d'altération qu'il s'agit d'explorer suivant les trois dimensions pour préciser les conditions physico-chimiques d'altération et de formation des minéralisations. L'utilisation d'outils de forage posés sur le fond et capables de réaliser plusieurs dizaines de mètres de carottes est incontournable.

La phase de forage d'exploration succède à la phase de génération de cibles potentielles découvertes par les études *in situ*. C'est une étape indispensable à la compréhension géologique du gisement et à l'évaluation de ses ressources, car elle permet d'échantillonner les sulfures massifs hydrothermaux et autres roches présentes sous le plancher océanique.

Technique

En premier lieu s'opère une sélection de cibles potentielles de 50 à 100m de diamètre (ou plus). Ensuite, plusieurs forages primaires (2 ou 3) sont planifiés sur ces cibles afin d'affiner ou de valider le modèle géologique théorique. La planification tient compte des différents paramètres acquis jusqu'alors. Si les résultats des forages primaires sont probants, des forages secondaires sont alors planifiés et réalisés selon un maillage de 20 m⁹. La profondeur théorique recommandée pour le forage d'exploration est de 20 m à la verticale.

L'utilisation d'un *rig*¹⁰ de forage robotisé se posant sur le fond marin et contrôlé depuis la surface, comme ceux disponibles pour l'exploration pétrolière, est tout à fait recommandée (PROD3, SFD, ROV Drill3, ...; Tableau 3-19). Ils peuvent réaliser un forage de 110 m en moyenne à une profondeur maximale de 4 000 m sur roches meubles ou indurées, ainsi que des tests géotechniques *in situ* (CPT – Cone penetration test).

Greffé sur le navire d'exploration, le *rig* de forage est déployé en 30 minutes et piloté depuis la surface grâce à un câble ombilical et avec l'assistance de ROV. Le *rig* comporte des racks ou des carrousels accueillant les tubes de forages, longs de 1,5 à 3m, ainsi qu'un bras robotisé les manipulant. Les tubes internes, collectant la carotte de roche, peuvent être en aluminium ou en polycarbonate. Un *casing*¹¹ est systématiquement posé après chaque *run*¹² de forage pour éviter l'effondrement du puits. L'eau de mer est utilisée comme fluide de forage et pour laver le puits après la pose d'un *casing*.

Trois techniques peuvent être employées pour forer des sulfures massifs hydrothermaux (Tableau 3- 23) :

- Le *Piston Core* (PC) : technique seulement utilisée en présence de terrains meubles, généralement superficiels. Une simple pression est exercée sur le train de tige et la tête de forage usinée en biseau afin de les carotter. La récupération est assurée par la présence d'un *core catcher* spécial.
- Le *Diamond Drill* (DD) : technique rotative qui permet de carotter un cylindre de roche dans un tubage interne en aluminium ou polycarbonate à l'aide d'une tête de forage tubulaire diamantée. Le train de tige est remonté à chaque carottage.
- Le *Reverse Circulation* (RC) : technique utilisant une tête de forage rotative de type tricône et de l'eau de mer sous pression permettant de faire remonter les *cuttings*¹³ par le tubage interne. Cette technique nécessite toutefois une installation rotative possédant plusieurs réservoirs permettant de récupérer ces *cuttings* à l'aide d'une pompe et d'un cyclone. Dans le cas du PROD3, un système de « *forward circulation* » est employé. L'eau de mer est injectée par le tubage interne, tandis que les *cuttings* remontent entre les tubages internes et externes par le biais d'une pompe d'origine fixée sur le PROD servant aussi pour les forages diamantés (DD).

⁹ L'espacement et le motif de la grille de forage sont susceptibles d'être modifiés en fonction de la taille de la cible à forer.

¹⁰ Appareil, installation de forage.

¹¹ Tube de diamètre supérieur au train de tige assurant son guidage et le maintien de la roche.

¹² Carottage de la longueur d'un tube de forage.

¹³ Débris de roche broyée mélangée au fluide de forage.

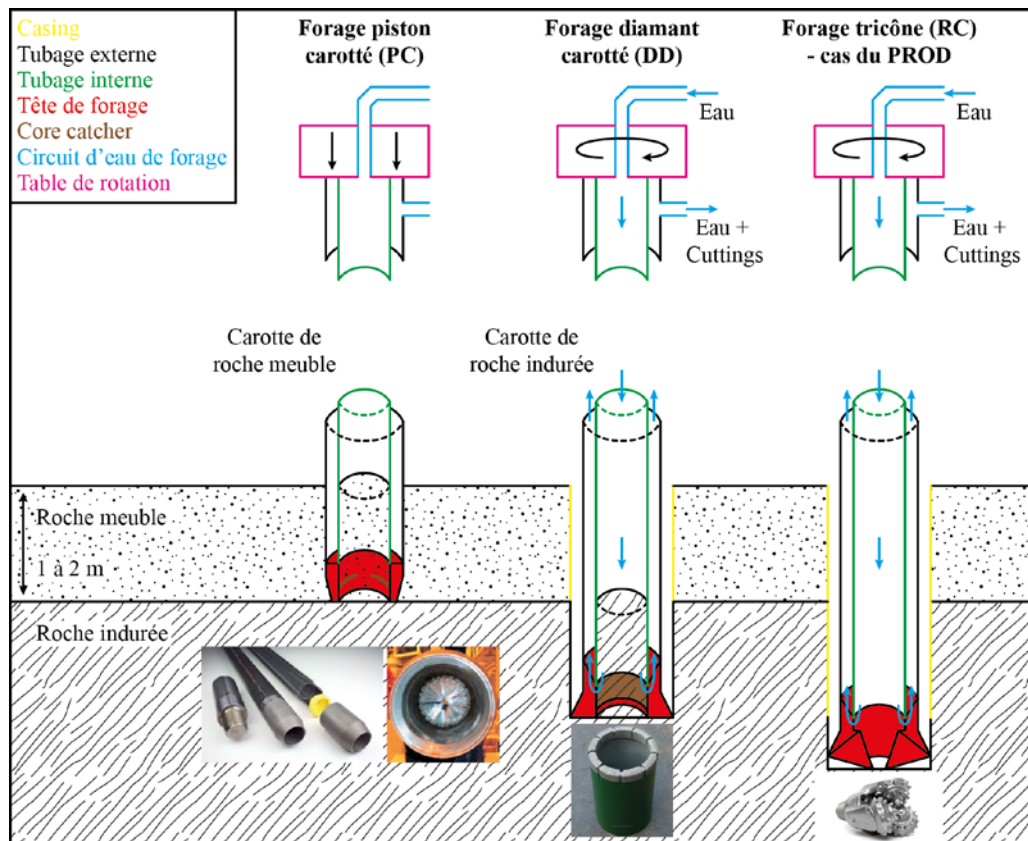


Figure 3-19 Schéma des différents types de forages et de leur fonctionnement utilisés pour l'exploration des sulfures hydrothermaux, illustré des têtes ou outils de forage respectifs.

Avantages et inconvénients

Ces types de *rigs* ont l'avantage d'être très facilement transportables et adaptables sur la majorité des navires (containers), d'avoir une plateforme de forage stable et indépendante des mouvements du navire en surface (houle, vagues, vents, courants...), de pouvoir se poser sur des fonds indurés ou meubles, de pouvoir changer facilement la tête de forage en fonction du type de roche rencontré, d'optimiser les manipulations du train de tige. Les *rigs* de forage robotisés sont économiquement rentables et bien adaptés à l'exploration de sulfures massifs hydrothermaux. Contrairement aux autres techniques de forage disponibles, comme les carottiers gravitaires (type Kullenberg, Cnexoville) ou les forages depuis un navire (campagne IODP), ces *rigs* robotisés ont aussi l'avantage d'avoir un bon taux de récupération, le plus souvent supérieur à 70% (List, 2013; Lipton, 2012).

Cependant ces *rigs* ne peuvent se poser sur des pentes moyennes ou fortes (tolérance maximale 35°), le forage ne peut être incliné ou dévié, les câbles ombilicaux sont fragiles et de fortes tensions peuvent apparaître lors du déploiement à cause de la houle, la capacité des racks et des carrousels en tubes limitent la profondeur de forage, et enfin le diamètre de l'outil de forage ne correspond pas forcément aux standards utilisés sur des forages d'exploration terrestres.

Le forage de type PC est particulièrement adapté aux sédiments meubles superficiels, mais nécessite la conception d'un *core catcher* adapté, et parfois l'emploi d'un tube de forage entier pour une faible épaisseur.

Le forage de type DD est réservé aux roches indurées. L'information géologique retournée (la carotte) est idéale car elle permet d'observer à la fois la nature, la texture et les structures des roches et des minéralisations forées. Ce type de forage offre un bon taux de récupération dans

les sulfures massifs, les brèches... mais est peu adapté à des roches volcaniques de type basaltes, andésites...

Le forage de type RC permet de réduire le temps d'opération, mais ne retourne que la nature des roches forées. Les textures et structures sont détruites par l'outil lors du forage. De plus, l'observation est de ce fait moyennée sur une certaine hauteur (généralement 1 m). Cette technique nécessite la conception d'un appareil de récupération dédié, permettant de séparer les *cuttings* de l'eau de forage par le biais d'un cyclone, et de les stocker dans des réservoirs pouvant effectuer une rotation en fonction de la profondeur de forage. Il est recommandé de changer de réservoir tous les mètres.

Analyse à bord

La procédure de manipulation et de description des carottes est adaptée à chaque campagne, mais peut se résumer par les étapes ci-après (Lipton, 2012) :

- Numérotation et ouverture des tubes de forage
- Calcul du taux de récupération
- Photographie de la carotte dans son tube
- Placement de marqueurs indiquant le numéro et la profondeur de fin de chaque *run*.
- Choix des intervalles d'échantillonnage en fonction de la lithologie, la minéralisation. Ils sont généralement compris entre 0,4 et 1 m.
- Attribution et marquage de numéros à chaque échantillon
- Logging
- Analyse XRF, à raison d'une mesure tous les 0,1m.
- Calcul d'une teneur moyenne pour chaque élément chimique.
- Photographie des carottes en place dans les plateaux.
- Séparation de la moitié (dans la longueur) de chaque échantillon pour analyse géochimique en laboratoire afin d'estimer la teneur en métaux.

Des analyses complémentaires (XRF, XRD, géotechnique, microscopie,...) peuvent aussi être réalisées à bord lors de la campagne de forage.

Les forages de sulfures hydrothermaux réalisés

Nautilus Minerals Inc.

A ce jour, Nautilus a réalisé quatre campagnes de forage sur son prospect Solwara (Tableau 3-23) (Lipton, 2008; Lipton, 2012). En 2006, le Seacore R100 Marine Drill adapté sur le navire DP Hunter a été conçu pour forer des puits d'exploration tactiques de l'ordre d'une centaine de mètres de profondeur. D'épaisses sections de sulfures massifs ont été rencontrées. Cependant les taux de récupération étaient faibles (41% en moyenne), surtout dans les sections supérieures des sulfures.

En 2007 et 2008, les ROV Drill 1 et 2 de Perry Slingsby Systems ont permis de forer de multiples puits à une profondeur de l'ordre d'une vingtaine de mètres. Le taux de récupération était supérieur à 71% (taux moyen) dans les sulfures massifs, et la productivité améliorée. Des sections minéralisées enfouies ont été forées en testant les anomalies électromagnétiques.

En 2010/11, une quatrième campagne de forage utilisant le ROV Drill 3 a permis de forer plus profondément tout en améliorant l'efficacité du forage, aboutissant à une meilleure compréhension du gisement et démontrant la continuité de la zone minéralisée sur Solwara.

Tableau 3-23 Résumé des campagnes de forage sur le projet Solwara (Lipton 2012).

Navire	Année	Type de forage	Localisation	Nombre de puits	Total forés (m)
MV DP Hunter	2006	Seacore R100 Marine Drill	Solwara 1	42	380,9
MV Wave Mercury	2007	ROV Drill 1	Solwara 1	110	1067,9
MV NorSky	2008	ROV Drill 2	Solwara 1 Solwara 4 Solwara 5 Solwara 8 Solwara 10	31	176,4
MV REM Etive	2010/11	ROV Drill 3	Solwara 1	66	1065,7
			Solwara 5	5	90,2
			Solwara 12	28	328,5
		PCD Open hole	Solwara 1	11	143,9

Neptune Minerals Inc.

A ce jour, Neptune Minerals, Inc. n'a réalisé qu'une seule campagne de forage. En 2012, le PROD3 opéré par Benthic¹⁴ a été utilisé pour réaliser une exploration tactique sur un permis de sulfures hydrothermaux dans les îles Salomon. Ont été réalisés :

- 260 m de forage au piston (PC).
- 187 m de forage carotté à des profondeurs d'eau d'environ 1 200m.
- 25 m de forage dédiés au test du système de récupération de *cuttings* (forages RC).
- Un taux de récupération moyen de 74%.
- Une productivité moyenne de 24m/jour avec des pics à 38m/jour.

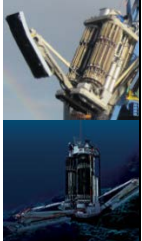





Autres organismes

De nombreux programmes, universités et instituts de recherches participent à l'exploration des sulfures hydrothermaux. L'International Ocean Drilling Program (IODP, devenu Integrated Ocean Discovery Program) est un programme international qui réalise des forages dans les océans du monde entier dans un but scientifique. Plusieurs campagnes réalisées à bord du JOIDES Resolution, un navire de forage en mer profonde, concerne les ressources minérales marines. Le Leg 139 a permis de forer les sites hydrothermaux de Middle Valley, sur la dorsale Juan De Fuca dans le Pacifique Est (Davis, Mottl et al, 1992; Mottl, Davis et al, 1994). Le Leg 158 s'est intéressé de plus près au système hydrothermal actif TAG, localisé sur la dorsale lente médio-atlantique, et en a apprécié la structure en profondeur (Humphris, Herzig et al, 1995; Herzig, Humphris et al, 1998). Le Leg 169 s'est concentré sur les dorsales sédimentées de Gorda et Juan De Fuca et leurs sites hydrothermaux respectifs Escabana Trough et Middle Valley, dans le Pacifique Est (Fouquet, Zierenberg et al, 1998; Zierenberg, Fouquet et al, 2000). IODP a également foré l'Est du bassin de Manus durant le Leg 193 pour étudier un système hydrothermal développé au sein d'un complexe de roches volcaniques felsiques dans un système de marges convergentes (Binns, Barriga et al, 2002; Barriga, Binns et al, 2007).

14 Benthic Project List [en ligne]. Date de consultation : 2 4/06/2013. Disponible sur : <http://www.benthic.com/index.php/projects/projects-list>

En 2007, durant la campagne M73/2 sur le R/V Meteor, un groupement international d'universités piloté par l'Institut de Recherche IFM-GEOMAR a étudié trois sites hydrothermaux en Mer Tyrrhénienne du Sud-Est. Ils ont utilisé le BGS Rockdrill 1 pour forer 11 puits sur le complexe volcanique de Palinuro avec une récupération de 12,7 m de sulfures massifs à semi-massifs, 38 puits sur le complexe volcanique de Panarea à travers des sulfates massifs et sulfures disséminés, et 2 puits sur la ride volcanique de Marsili sans rencontrer de minéralisation (Petersen et al, 2008; Gemmell and Petersen 2009).

En 2002, une campagne pilotée par l'Institut de recherches IFM-GEOMAR à bord du R/V Sonne a permis de forer 39 puits au sommet du Conical Seamount, localisé sur le site de PACMANUS dans le bassin de Manus, à l'aide du BGS Rockdrill 1. Un total de 91 m a été foré, avec un taux de récupération moyen de 31% (Herzig, Petersen et al, 2003; Petersen, Herzig et al, 2005).

	PROD3	SFD	ROVDri II3	MeBo2	ACS	Rockdrill RD2
Photo						
Constructeur	Benthic	Gregg Marine	Seafloor Geoservices	Marum	Williamson	BGS
Pays	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Allemagne	Etats-Unis	Royaume Uni
Profondeur d'opération (m)	3000	4000	3000	2000	4000	4000
Profondeur de forage (m)	130	150	90-200	80	100-150	50
Tolérance de pente (°)	25	?	35	?	30	?
Taille de l'outil	HQ-PQ	NQ-HQ-PQ	PQ	HQ	HQ-PQ	HQ
Diamètre carotté (mm)	72	63-76	70-73	57-63	63-73	62
Longueur des tubes de forage Int/Ext (m)	2,75	1,5	2,38 3,00	2,35	?	1,7
Possibilité de casing	OUI (40m)	OUI (>6m)	OUI (40m)	OUI	?	?
Possibilité PC	OUI	OUI	OUI	OUI	?	?

Possibilité DD	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Possibilité CP T	OUI	OUI	OUI	?	?	?
Références	(Benthic 2013)	(Seafloor _Geotec 2013)	(Forum_ Energy_ Technolo gies 2013)	(Marum 2013)	(Williamson _&_Associa tes 2013)	(BGS 2013)

3.3. Techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds

3.3.1. Techniques de surveillance ponctuelle à intervalle de temps régulier

Ces techniques reposent essentiellement sur l'utilisation des engins sous-marins.

3.3.1.1. Observations (vidéo et photos)

Les observations *in situ* des environnements profonds ne peuvent aujourd'hui être réalisées qu'à partir des submersibles habités de type *Nautilus* et des submersibles téléguidés (ROV) de type *Victor*. Actuellement, lors d'une plongée en submersible habité, l'observation est effectuée directement par le chercheur embarqué à travers les hublots de l'engin. Les données vidéo (caméras principale et verticale HD et caméras latérales) sont enregistrées en continu sur disque dur, et des photos numériques de haute qualité sont prises régulièrement par l'observateur. De façon similaire, dans le poste de commande du ROV, l'observation s'effectue sur les écrans disponibles. Là aussi l'observateur principal de la plongée réalise des prises de vues photographiques régulières (caméra numérique haute résolution) ou selon intérêt particulier. Les vidéos des différentes caméras sont enregistrées durant toute la plongée. Dans le futur, les drones sous-marins (AUV) devraient pouvoir naviguer à faible vitesse, très près du fond, avec possibilité d'arrêt pour calibration de certains capteurs ou observation optique fine de zones et prise de photos, éventuellement au cours d'une plongée dédiée à la cartographie de la zone.

L'image (vidéo ou photo) est donc ainsi la première donnée acquise par les submersibles habités et les ROVs. Cette méthode d'acquisition est non invasive.

Les observations vidéo sont exploitées par les géologues pour dresser des cartes géologiques à l'échelle des plongées. Ces données sont souvent agencées en SIG (Système d'Information Géographique) permettant l'interaction entre différents types de données (biologie, chimie, géologie), leur échange, l'analyse de leur évolution dans le temps lorsque de nouvelles plongées sont réalisées.

Les images photo et vidéo (désignées collectivement sous le terme "imagerie", à ne pas confondre avec l'imagerie acoustique, obtenue par sondeurs multifaisceaux, qui caractérise la réflectivité du fond sous l'incidence d'une onde acoustique) représentent une donnée essentielle permettant la description des écosystèmes profonds. Les levés optiques ont ainsi été utilisés à différentes échelles spatiales pour cartographier des émissions de fluides froids (Olu, Lance et al, 1997; Ondréas, Olu et al, 2005; Olu-Le Roy, von Cosel et al, 2007; Jerosch, Schlueter et al, 2007), des récifs de coraux profonds (Huvenne et al, 2007; Vertino et al, 2009) et des édifices hydrothermaux (Desbruyères, 1998; Sarrazin, Robigou et al, 1997; Shank et al, 1998; Tunnicliffe, Embley et al, 1997; Desbruyères et al, 2001; Tsurumi and Tunnicliffe 2001; Copley et al, 2007 a et b; Nees et al, 2008; Marcus et al, 2009; Cuvelier,

Sarrazin et al, 2009; Marcus et al, 2009; Cuvelier, Sarrazin et al, 2011b; Podowski, Moore et al, 2009; Fabri et al, 2011).

Ces images peuvent également être utilisées pour estimer l'impact des activités scientifiques sur l'environnement (Tunncliffe, 1990; Tyler et al, 2005).

L'imagerie est utilisée pour cartographier la répartition d'assemblages faunistiques, de substrats, d'indicateurs d'émissions hydrothermales ou d'habitats caractéristiques sur des édifices hydrothermaux actifs. Ce type d'étude sur la répartition spatiale des assemblages a été effectué dans le Pacifique (Hessler et al, 1985 et 1988; Chevaldonné et Jollivet, 1993; Jollivet, 1993; Grehan and Juniper, 1996; Sarrazin, Robigou et al, 1997; Podowski et al, 2009; Sen et al, 2013) et sur la ride médio-atlantique (Copley et al, 1997; Colaco et al, 1998, Copley et al, 2007; Cuvelier, Sarrazin et al, 2009).

La définition de ces assemblages peut être d'abord effectuée à partir des images et est généralement validée par des échantillons de faune et la caractérisation physico-chimique des habitats (Sarrazin, Robigou et al, 1997; Sarrazin and Juniper, 1999; Sarrazin, Juniper et al, 1999; Sarrazin et al, 2002; Podowski et al, 2009; Cuvelier et al, 2011).

Cette stratégie peut également être étendue pour évaluer la dynamique temporelle des assemblages hydrothermaux caractéristiques, en utilisant soit des données disponibles archivées, acquises durant des campagnes passées, soit des données acquises selon un protocole spécifique (Tunncliffe, 1990; Sarrazin et al, 1997; Shank et al, 1998; Copley et al, 2007; Cuvelier et al, 2011). L'exploitation de données anciennes archivées démontre l'importance des bases de données (Fabri, Galéron et al, 2006).

Il est ainsi nécessaire de déterminer quels paramètres peuvent être extraits (manuellement ou automatiquement) d'une image et d'estimer la représentativité de ces données avec les données «terrain», en termes de composition faunistique, de richesse taxonomique, de densité ou de biomasse par rapport à un échantillon (Cuvelier et al, 2012). L'imagerie peut également donner des informations, inaccessibles par l'échantillonnage, sur le comportement des organismes (Chevaldonné et Jollivet, 1993; Bates et al, 2005; Grelon et al, 2006; Cuvelier et al, 2012), les interactions entre espèces, la croissance (Urcuyo et al, 2003), la couverture microbienne, voire même sur le type de substrat et les conditions environnementales (Cuvelier et al, 2012). Enfin, quand la structure des assemblages faunistiques est bien caractérisée sur un site, l'image peut être utilisée comme donnée principale pour suivre la dynamique spatiale et temporelle des assemblages hydrothermaux sur ce site et éventuellement à plus grande échelle (Cuvelier et al, 2012).

Les images constituent des données complexes pour lesquelles il est indispensable de développer des protocoles automatiques de traitement et d'extraction de l'information, protocoles qui seront spécifiques à chaque question posée, à chaque type d'image et à chaque écosystème. De telles approches commencent à se développer en environnements marins profonds (Aguzzi, Costa et al, 2011; Aguzzi, Manuel et al, 2011; Aron et al, 2010; Teixido et al, 2011).

3.3.1.2. Cartographie optique OTUS

Une cartographie optique à proximité du fond (< 10m) peut être menée, par exemple, avec le ROV Victor 6000, équipé du module de mesures en route (Opderbecke et al, 2004; Simeoni et al, 2007). La juxtaposition d'images photographiques haute résolution, en noir et blanc, permet de réaliser une mosaïque sur des zones ciblées de plusieurs mètres ou dizaines de mètres de surface. Le couplage, dans un système d'informations géographiques (SIG), des cartes bathymétriques et des mosaïques OTUS (Escartin et al, 2008) apporte de nombreuses informations sur la nature du substrat, la distribution et le type des émissions hydrothermales sur le plancher océanique et des indices d'activité (Barreyre et al, 2012). La cartographie de la distribution des assemblages (Marcon et al, 2013) et de leur évolution temporelle permet éventuellement d'établir des cartographies prédictives (Jerosch et al, 2006, 2007). Ces méthodes de cartographie sont en cours de développement et commencent à être utilisées sur plusieurs écosystèmes profonds : étude de la distribution faunistique sur le volcan de boue Hakon Mosby (travaux de Jerosch et al en 2006 et 2007) et sur le pockmark Regab (Olu-LeRoy et al, 2007 ; Von Cosel et Olu, 2008), ainsi que dans les suintements froids du golfe du Mexique (Lessard-Pilon et al, 2010a et 2010b).

L'acquisition de ce type de données sur plusieurs années peut également permettre de comprendre l'évolution temporelle des processus actifs sur une zone et d'estimer les flux de chaleur liés aux émissions hydrothermales (Barreyre et al, 2012). Les nouveaux outils cartographiques permettent également le géoréférencement des opérations sur le fond, ainsi que le positionnement des prélèvements, des analyses et des mesures, offrant un lien pertinent entre différentes disciplines (géologie, chimie et biologie).

3.3.1.3. Echantillonnage de la faune

Les submersibles et les ROVs sont équipés d'outils permettant les prélèvements d'eau, de faune, de sédiments ou de roches. Au niveau de l'échantillonnage de la macrofaune, le type de prélèvement privilégié va dépendre dans un premier temps de la nature du substrat.

Substrats meubles

Les substrats meubles seront échantillonnés à l'aide de carottiers divers, déployés de la surface du bateau (USNEL, carottier Kullenberg, carottier multitubes, voir plus haut) ou à partir des submersibles (carottiers tube, carottiers lame, carottiers boîte). Ces outils sont très efficaces pour échantillonner une surface connue, mais aucun outil générique n'est utilisé par les scientifiques à travers le monde, rendant les comparaisons systématiques périlleuses (Gauthier et al, 2010). Ces carottiers sont cependant considérés comme étant des outils « quantitatifs » puisque les données biologiques acquises (abondances, biomasse) peuvent facilement être rapportées à une surface (Gauthier et al, 2010). Le « *pot sampler* » ou « *mussel pot* » a été développé par les équipes américaines pour échantillonner les assemblages de modioles et les espèces associées, sur les substrats meubles ou indurés des environnements hydrothermaux. Cependant, le volume d'échantillonnage est variable, dépendant de la pénétration de l'outil dans le sédiment. De plus, l'efficacité de cet instrument est mise en doute par de nombreuses équipes. Il en va de même pour les filets utilisés pour échantillonner la faune à la surface des sédiments. Ces outils sont particulièrement utiles pour recueillir des spécimens en bon état, afin de réaliser des études physiologiques ou de génétiques, mais ils ne permettent pas un échantillonnage quantitatif.

Substrats durs

Les moyens d'échantillonnage sur substrats durs (cheminées hydrothermales, roches basaltiques) sont plus limités et la taille des échantillons prélevés difficilement quantifiable (Gauthier et al, 2010). La plupart des submersibles scientifiques sont équipés d'un aspirateur, composé d'une pompe et d'un long tuyau souple terminé par un embout. Ces aspirateurs à faune sont manipulés par les submersibles et permettent d'échantillonner les organismes ou du matériel sur une surface cible. Les échantillons passent à travers le tuyau (dont le diamètre est limité) et sont recueillis dans des bocaux individuels. Une soie de taille de maille connue est mise en place à l'entrée des bocaux pour éviter la perte des petits organismes. L'aspirateur est donc utilisé pour récolter les organismes de petite taille (>5cm), sans quoi il se bouche et les échantillons sont perdus (Gauthier et al, 2010). C'est un outil particulièrement efficace pour recueillir la faune des substrats durs mais il peut aussi être utilisé pour ramasser des organismes à la surface de sédiments meubles. Cet outil est considéré comme étant qualitatif, voire même semi-quantitatif, puisque la surface échantillonnée (et donc dénudée) peut être estimée à l'aide de l'imagerie vidéo (voir protocole dans Sarrazin et al, 1997; Cuvelier et al, 2012). Mis à part la collecte de la totalité du substrat, le couplage aspirateur-pince-aspirateur semble être à ce jour le moyen le plus efficace d'échantillonner de façon quantitative la faune des substrats durs à l'aide des submersibles (Sarrazin et Juniper 1999; Sarrazin et al, en préparation). L'un des problèmes majeurs dans le milieu marin profond demeure l'échantillonnage des grandes communautés animales (comme les buissons de Siboglinidés ou les récifs de coraux qui peuvent atteindre quelques mètres de hauteur) des substrats durs (Gauthier et al, 2010). Le « Chimney Master » et le « BushMaster » sont des instruments spécifiques, développés par le laboratoire du Dr Fisher (Penn State University, USA) pour prélever de telles communautés sur les écosystèmes chimiosynthétiques profonds (Hourdez et al, 2000; Bergquist et al, 2002). Ces larges filets, articulés par une connexion hydraulique sur le ROV, sont utilisés pour échantillonner des buissons complets de grands vers Siboglinidés et la faune qui y est associée, sur le plancher océanique (*BushMaster*) ou sur les grands édifices hydrothermaux (*Chimney Master*) (Gauthier et al, 2010). Ils ont également été utilisés sur les récifs coralliens. Enfin, la pince des submersibles est aussi utilisée pour échantillonner la faune de grande taille, ainsi que différents types de substrats (Ritt et al, 2011; Gauthier et al, 2010). Les échantillons recueillis avec l'aspirateur, la pince ou un filet peuvent être utilisés pour quantifier la diversité spécifique, pour autant que leur sélectivité soit prise en compte et que les données soient correctement interprétées (Gauthier et al, 2010).

Micro-organismes

Les micro-organismes sont collectés avec et de la même façon que le substrat qu'ils occupent. Des recherches de micro-organismes sont ainsi effectuées dans des volumes de fluide hydrothermal collectés à cet effet (voir technique ci-dessous). De même, des échantillons de cheminées hydrothermales sont souvent ramenés aux fins de recherche de tels micro-organismes. L'eau de mer ramenée par l'aspirateur à faune dans les bocaux afférents peut également faire l'objet de telles recherches. Enfin, dans un autre ordre d'esprit, une instrumentation spécifique d'aspiration et d'examen d'eau de mer lors de transits entre sites hydrothermaux vise à rechercher les gamètes d'organismes et à étudier les phénomènes de dispersion et de colonisation.

3.3.1.4. Collecte et analyse des fluides hydrothermaux

Divers systèmes de prélèvement pour les fluides hydrothermaux existent, tous basés sur des principes d'aspiration simple (type seringue) ou par pompage. Le submersible ou le ROV se chargent du prélèvement après avoir effectué une mesure de température sur le fluide en sortie de cheminée. Au retour sur le navire, le fluide est récupéré. Commence alors un long travail de conditionnement des gaz et d'analyse à bord. Après qualification des échantillons (mesure du pH et de la concentration en H₂S), les gaz (H₂, CH₄, CO₂...) sont extraits et leurs concentrations sont mesurées à bord, à l'aide d'appareils analytiques installés dans un container laboratoire embarqué.

De nombreux conditionnements spécifiques sont aussi réalisés pour l'analyse à terre des éléments majeurs, mineurs et traces, les analyses isotopiques et la recherche des molécules organiques présentes (hydrocarbures, acides carboxyliques, acides aminés...). La composition chimique d'un fluide sortant sur le plancher océanique est un enregistrement des conditions de pression et de température et de l'ensemble des réactions chimiques qu'il a subi durant son transit dans la croûte océanique fracturée.

L'ensemble de ces données informe sur la profondeur de la circulation hydrothermale dans le substratum, sur le temps de résidence, et contribue à comprendre le mode de formation des dépôts métalliques sulfurés associés. En résumé cet ensemble de conditionnements et d'analyses permet d'établir la signature chimique du fluide, de connaître son histoire au travers de la croûte océanique, et d'évaluer les conséquences de ces flux sur le milieu environnant.

En complément et dans la suite logique de ces mesures *ex situ*, les techniques de mesures *in situ* se développent de plus en plus. En particulier, la technique de spectrométrie de masse *in situ* est extrêmement performante et la plus adaptée à l'étude des fluides hydrothermaux. Cette technique permet de mesurer *in situ* les concentrations en gaz tel que le CH₄ ou le CO₂ par exemple. Il est alors possible de générer des cartographies des concentrations en gaz au-dessus des sites hydrothermaux et de mieux calculer les flux de matière entrant dans l'océan afin de mieux appréhender l'impact de la circulation hydrothermale sur les cycles biogéochimiques.

3.3.1.5. Caractérisation physico chimique des habitats

La caractérisation chimique des habitats est une donnée indispensable dans l'étude des écosystèmes profonds et a pour objectif de déterminer l'influence des variables abiotiques sur le fonctionnement des écosystèmes. Cette caractérisation se focalise notamment sur les sources d'énergie disponibles (éléments réduits tels que le méthane et l'hydrogène sulfuré), l'oxygène, les facteurs de stress (métaux, température, pH...), les éléments majeurs comme les traceurs de mélange de fluides (Mg, Mn...). Les techniques utilisées sont différentes suivant les écosystèmes et les substrats considérés. Sur des substrats sédimentaires, les analyses se focalisent dans les 30 premiers centimètres de carottes sédimentaires par des approches *in situ* ou *ex situ*.

Sur les substrats durs comme les sources hydrothermales, c'est le mélange entre le fluide hydrothermal et l'eau de mer qui est étudié, dans une gamme de température comprise entre la température de l'eau de mer (2-4°C) et 100 ou 150°C correspondant aux zones colonisées. Les méthodes de prélèvement et d'analyse utilisées sont souvent différentes de celles déployées par les équipes de géochimistes pour caractériser la composition du fluide hydrothermal « pur » pouvant atteindre 400°C.

Les stratégies développées combinent souvent deux approches complémentaires. Le prélèvement permet d'avoir accès à de nombreuses espèces chimiques dans un même échantillon mais est limité par le faible nombre d'échantillons accessibles, lors d'une plongée ou d'une campagne. Les systèmes de prélèvement actuellement utilisés sur les submersibles français sont basés sur un pompage de l'échantillon par une pompe péristaltique et sa distribution dans des seringues ou des poches souples via une vanne rotative (PEP utilisé sur Victor 6000, Sarradin et al, 2002) ou des vannes solénoïdes en équipression (Pepito utilisé sur Victor et Nautilie, Sarradin et al, 2009). Le matériel utilisé pour le transfert ou le stockage des échantillons est inerte chimiquement (PEEK, titane, Viton, Tygon, ...). Ces systèmes permettent de prélever entre 15 et 30 échantillons par plongée. Ils peuvent être équipés d'un système de filtration *in situ* permettant d'effectuer une première étape de spéciation physique (dissous et particulaire) pour certains éléments. La canule de prélèvement est manipulée par le submersible et associée à une sonde de température. Le prélèvement peut également être effectué par des systèmes autonomes de volume compris entre 200 à 750 ml, plus souvent utilisés pour les fluides chauds. L'aspiration est assurée soit par un dispositif type seringue ou par mise en dépression du préleveur (Sarradin et al, 2008). D'autres systèmes de prélèvement de type seringue sont également utilisés pour des applications spécifiques et des petits volumes (Sipper) (Di meo, Savoie et al, 2004). Immédiatement après la remontée des submersibles, les échantillons sont traités, pour certains analysés immédiatement dans les laboratoires propres des navires océanographiques, puis stockés avant analyse à terre.

Le déploiement de capteurs ou d'analyseurs *in situ* permet, pour un nombre plus limité de paramètres, d'avoir accès à une résolution spatiale et temporelle plus fine et donc de décrire les gradients physico-chimiques caractéristiques de ces environnements. Les méthodes *in situ* permettent également d'analyser des composés susceptibles de se dégrader entre le prélèvement et l'analyse à bord.

Trois familles d'instruments ont été développées et sont utilisées pour la caractérisation *in situ* d'habitat en milieu profond :

- 1) les analyseurs chimiques en flux, essentiellement utilisés pour la mesure des sulfures, du fer dissous, du manganèse et des nitrates par colorimétrie ou spectrométrie UV (Johnson et al, 1988; Le Bris et al, 2000; Vuillemin et al, 2009; Plant et al, 2010) et plus récemment le méthane, l'hydrogène et les sulfures par spectrométrie de masse (Wankel et al, 2011; Petersen et al, 2011)
- 2) les sondes électrochimiques, manipulées par submersible, multiparamètres pour certaines sondes voltamétriques (Luther et al, 1999), ou mono-paramètre pour le sulfure d'hydrogène (Contreira et al, 2013) ou le pH (Le Bris et al, 2001)
- 3) les microprofileurs pour les mesures de profils verticaux à haute résolution de l'oxygène, de sulfure et de pH dans les sédiments (Gundersen et al, 1992; De Beer et al, 2006)
- 4) les optodes, pour la cartographie 2D des sédiments (Glud et al, 2005) ou des mesures dans l'eau essentiellement pour l'oxygène même si d'autres paramètres tels que le pH sont accessibles (Tengberg et al, 2006)

Chaque type d'instrument répond aux besoins d'un domaine particulier et ils sont complémentaires. Les microprofileurs sont exclusivement dédiés aux environnements sédimentaires et intéressent plus particulièrement les études en microbiologie (De Beer et al, 2006), tandis que les analyseurs en flux concernent les milieux fluides au sens large mais excluent les environnements trop chargés en particules. Les sondes électrochimiques sont des

outils plus souples d'utilisation (Luther et al, 2008), parfois au prix d'une précision moindre qu'avec des analyseurs. Leurs dimensions réduites permettent de les utiliser pour appréhender l'hétérogénéité spatiale très forte de ces milieux, dans des conditions d'accès particulièrement difficiles (Le Bris et al, 2005; Podowski et al, 2010). Des équipements autonomes de petite taille sont aussi disponibles pour suivre dans le temps, éventuellement en réseau, certains paramètres-clés (Yücel et al, 2013; Contreira et al, 2013). La problématique principale pour ces suivis temporels est la stabilité de la mesure, et la calibration des équipements dans des conditions représentatives du milieu, qui sont naturellement variables. Au-delà des instruments eux-mêmes, les méthodes de mesure doivent être adaptées aux paramètres chimiques majeurs et aux exigences de qualité des mesures qui diffèrent totalement selon les milieux étudiés et les questions posées (Le Bris et al, 2012).

Peu d'équipements sont commercialement disponibles. Quelques-uns peuvent être utilisés avec plus ou moins d'adaptation (optode Andrea (Tengberg et al, 2006), sondes de température autonomes NKE et MISO). Les capteurs et microprofileurs électrochimiques développés par la société Unisense peuvent être utilisés directement dans le milieu.

3.3.2. Techniques de surveillance en continu

3.3.2.1. Surveillance acoustique : le module BOB

Le module BOB (Bubble OBServation) permet, dans le cadre de l'étude des sites hydrothermaux, une surveillance acoustique du débit des bulles, et donc du débit de fluide émis.

BOB est un concept basé sur l'utilisation de l'acoustique active et des stations de fond pour la détection et la surveillance des cibles biologiques et non biologiques présentes dans la colonne d'eau. Ce concept est évolutif d'un point de vue technologique en ce qui concerne la source d'énergie (observatoire câblé ou autonome), le type d'équipement acoustique (sondeur monofaisceau, sondeur multifaisceaux, sonar, etc.) et adaptable: chaque solution peut correspondre à la problématique posée en fonction de la nature des cibles à détecter ou à surveiller (organismes pélagiques, bulles, fluides, type de mesure acoustique, etc.), de l'environnement (étendue de la zone, topographie, profondeur, etc.) et des objectifs de temporalité à atteindre (échantillonnage continu ou semi-continu, échelle de temps, etc.).

BOB est également un démonstrateur opérationnel dans la mesure où il a déjà été déployé au cours de trois campagnes (Figure 3-20) permettant l'acquisition de séries temporelles sur l'évolution du débit des sources gazeuses identifiées au fond.

Comme démonstrateur opérationnel, BOB est un module autonome destiné à collecter de données acoustiques sur les sorties de fluides afin de constituer des séries temporelles sur l'évolution de leurs débits. Ce module est équipé d'un sondeur monofaisceau monté sur un support rotatif "pan&tilt" et fonctionne sous batterie avec une autonomie de 25 jours. Le transducteur 120 kHz permet l'insonification d'un volume d'eau borné par l'ouverture circulaire du faisceau de 7° sur une distance horizontale de 100 m. Des consignes permettent d'acquérir de données sur différents secteurs géographiques pendant des périodes de temps prédéfinies. Typiquement, il est possible d'insonifier, séquentiellement avec un pas de 7°, 24 secteurs géographiques différents pendant une heure chacun, totalisant un secteur global d'observation de 168° sur un cycle d'acquisition de 24 heures. Dans ce cadre, l'acquisition de données sur une source de gaz implique que la ou les sources doivent être situées dans le

volume d'échantillonnage de BOB, laissant peu de marge d'erreur sur leur positionnement relatif.

BOB peut également être utilisé pour observer, à partir d'un point fixe, des cibles qui se déplacent dans la colonne d'eau, comme des sources hydrothermales. Les données ainsi acquises et combinées à d'autres approches peuvent aider à établir l'état zéro d'un environnement donné et à surveiller son évolution.

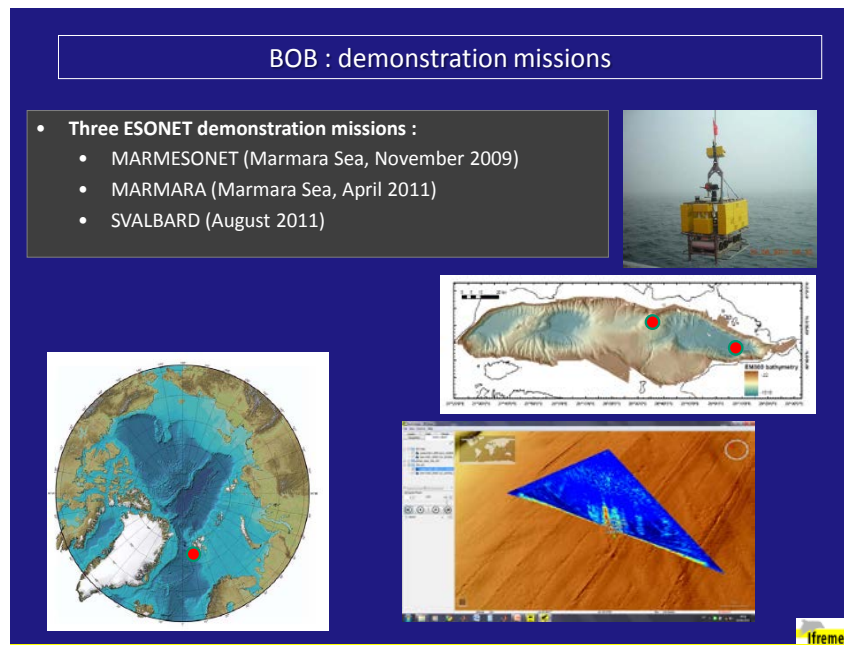


Figure 3-20 Les deux premières campagnes du module BOB (Bubble OBServation) ont été effectuées en mer de Marmara afin d'étudier la variabilité du débit d'émissions de gaz identifiées par 1200 m et 350 m. Elles préparent l'établissement d'un observatoire qui étudiera les relations entre les séismes et la variabilité des émissions de gaz sur les failles. Une troisième campagne a été effectuée au Svalbard pour étudier l'impact des variations de température de l'océan Arctique sur les émissions de gaz méthane et d'hydrates de gaz.

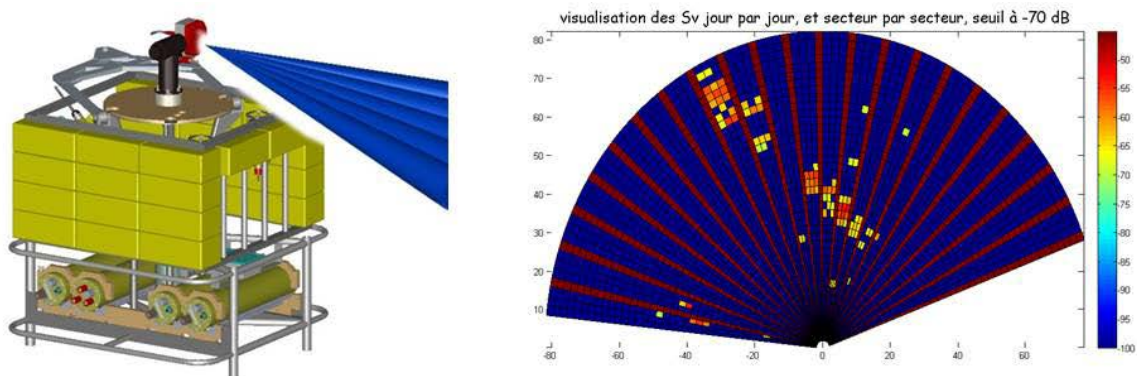


Figure 3-21 Schéma du module actuel BOB (à gauche) et visualisation des mesures acoustiques acquises par BOB pendant 4 jours en mer de Marmara (Marmesonet 2009) représentant la position et l'intensité des sources de gaz détectées au fond (Cinarcik Basin, 1200 m de profondeur).

3.3.2.2. Les mouillages long terme : courantomètres et pièges à particules

Matériel utilisé

La compréhension des conditions environnementales est primordiale dans les études écologiques des écosystèmes marins. En premier lieu, les caractéristiques physiques des eaux autour des organismes (température, salinité, courant, oxygène) ainsi que celles des apports énergétiques sous forme particulaire sont des données de base à appréhender afin de connaître leur influence dans l'espace et le temps. De plus, dans le cas de mouvements de terrain naturels (Crassous, Khripounoff et al, 1991) ou de l'exploitation d'une zone, les risques dus aux remises en suspension et de la dispersion du nuage de sédiment doivent être évalués par une analyse des courants locaux (Khripounoff, Crassous et al, 2012).

Les études hydrodynamiques de l'environnement marin ainsi que l'estimation des flux de matière près du fond font appel à deux types d'équipement: les courantomètres (acoustiques ou mécaniques) et les pièges à particules. La stratégie développée est d'enregistrer simultanément ces deux types de mesures sur un même mouillage autonome pour des durées d'acquisition qui peuvent être supérieures à une année, durée recommandée dans les zones de fluctuations saisonnières marquées.

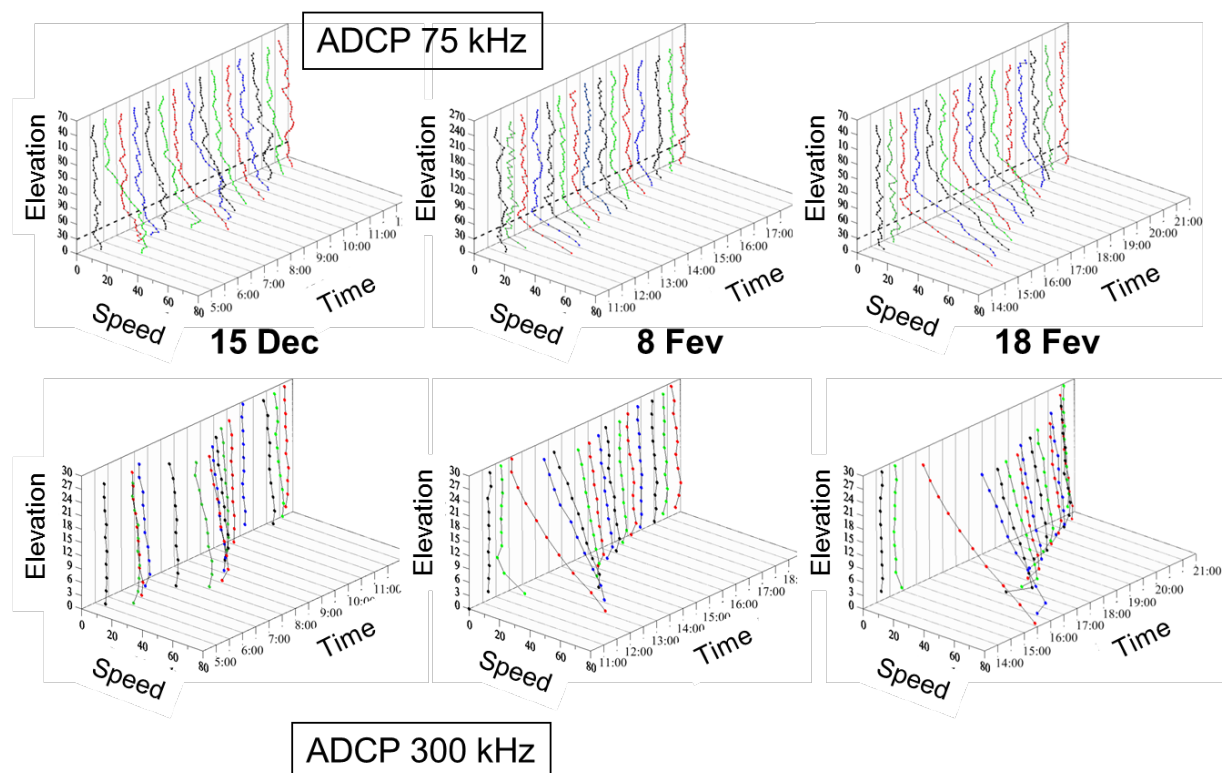


Figure 3-22 Représentation 3D de la vitesse du courant mesurée avec un ADCP 75 kHz et 300 kHz à différentes altitudes par rapport au sédiment dans le canyon sous-marin du Var par 1200m de profondeur au moment du passage d'un courant de turbidité.

De base, les courantomètres permettent de mesurer la vitesse et la direction d'un courant à une profondeur donnée. Ces appareils peuvent être aussi de véritables plateformes de mesure avec l'ajout de capteurs supplémentaires mesurant simultanément, outre le courant, la température au millième de degré, la pression de manière suffisamment sensible pour évaluer la hauteur de la colonne d'eau, et la concentration d'oxygène. Ces données sont en général enregistrées toutes les heures. Depuis quelques années, les courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP) permettent d'obtenir aussi des données de vitesse et de direction des

courants sur une épaisseur de plusieurs mètres (Figure 3-22) et ainsi d'avoir une vision spatiale des conditions hydrodynamiques en un point (Khripounoff, Crassous et al, 2012).

En parallèle aux mesures de courant, le calcul du flux de matière en un point donné se réalise à l'aide d'un piège à particules (Figure 3-23) qui capte et concentre les particules sédimentant passivement dans un cône de surface connue et sur une durée programmée.



Figure 3-23 Piège à particules posé sur le sédiment d'une zone de fluide froid riche en bivalves et polychètes.

Analyses

Les analyses réalisées sur les particules collectées réunissent généralement des mesures de concentration en composés élémentaires tel que carbone organique, azote total et carbonates. Ces mesures, associées aux variations des conditions hydrodynamiques, permettent de suivre l'influence de ces paramètres sur l'installation et le développement des écosystèmes benthiques (Auffret, Khripounoff et al, 1994).

Un tamisage préalable du matériel particulaire avant les analyses chimiques permet de trier les organismes vivants pris dans le piège à particules. Ils sont représentés en majorité par des adultes du zooplancton et des stades larvaires de macro et mégafaune benthique ou pélagique (Metaxas, 2004). Les reproductions saisonnières de ces organismes peuvent donc être étudiées en suivant tout au long de l'année les variations de densité de larves piégées dans cet appareil (Khripounoff, Vangriesheim et al, 2001).

3.3.2.3. Les observatoires de fond de mer

Les connaissances actuelles des milieux marins profonds sont surtout le résultat de missions ponctuelles, nécessitant une présence en mer, ce qui limite notre connaissance et notre compréhension de la dynamique temporelle de ces écosystèmes à une échelle inférieure à l'année. Le développement récent des observatoires permet la mise en place de suivis continus, et sur le long terme, d'un certain nombre de sites sélectionnés en fonction de leur intérêt géographique et/ou historique (Tableau 3-25).

Notre capacité à prévoir des variations sur le long terme nécessite des séries temporelles qui résolvent des processus rapides, comme par exemple la propagation de vagues internes ou la

réponse comportementale des espèces à différents événements environnementaux, qu'ils soient cycliques (rythmes biologiques) ou stochastiques. L'avantage des observatoires, en plus de la mise en place de suivis continus, repose sur l'acquisition simultanée de multiples variables océanographiques en un seul point et donc la possibilité de conduire des études multidisciplinaires permettant une compréhension complète du fonctionnement des écosystèmes (Ruhl et al, 2011).

Deux types d'observatoires fond de mer sont distingués :

- Les observatoires câblés sont reliés à la terre par un câble sous-marin qui fournit l'énergie nécessaire à son fonctionnement et permet un lien permanent et haut débit.
- Les observatoires non câblés sont des mouillages autonomes en énergie, qui peuvent être équipés de capacité de transmission de données en temps quasi réel via une liaison satellite.

Ces observatoires sont développés dans le cadre de projets nationaux ou internationaux.

Observatoires câblés

L'approvisionnement en courant et le transfert des données n'étant pas limitant pour les observatoires câblés, ces installations ont un grand avantage pour l'étude de processus naturels très épisodiques, statistiquement imprévisibles, ou qui nécessitent une longue série temporelle pour être détectés, en raison du bruit lié à des processus de plus haute fréquence. La connexion câblée permet également la communication et donc le contrôle à distance des instruments afin d'ajuster l'échantillonnage suite à la détection d'un événement particulier.

Tableau 3-25 Liste non-exhaustive des observatoires/réseaux câblés profonds et côtiers pour l'étude multidisciplinaire des écosystèmes (adapté de Matabos et al, sous presse).

Observatoire/Réseau	Localisation	Profondeur	Domaine d'étude	Lien
DONET (JAMSTEC, Japon)	Baie de Sagami (Japon)	2000-4000 m	Géophysique	http://www.jamstec.go.jp/donet/en/
	Nankai Trough (Japan)		Géophysique	
	Kuril Trench (Japon)		Géophysique	
Kilo Nalu Nearshore Ree	Hawaii	10-40 m	Océanographie, Chimie, Biologie	http://www.soest.hawaii.edu/OE/KiloNalu/
LEO 15	Au large de Tuckerton (NJ, E.-U.)	10-20 m	Océanographie, Météorologie, Biologie	http://marine.rutgers.edu/mrs/LEO/LEO15.html
Marine Cable Hosted Observatory (MACHO)	Plaine d'Ilan (Taiwan)		Géophysique	
Observatoire côtier Martha's Vineyard	Au large de Martha's Vineyard (MA, E.-U.)	Côtier	Climatologie Océanographie	http://www.whoi.edu/mvco
Monterey Accelerated Research System	Baie de Monterey (CA, E.-U.)	890 m	Géophysique, Océanographie, Chimie,	http://www.mbari.org/mars/

(MARS)			Biologie	
Télescope Neutrino, Italie, France, Grèce (KM3NeT)	Mer Méditerranée (Italie)	2500-3500 m	Astronomie Géophysique	http://www.km3net.org/home.php
North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments (NEPTUNE Canada)	Nord Est Pacifique, (C.-B., Canada)	24-2600 m	Géophysique, Océanographie, Chimie, Biologie	http://www.neptunecanada.ca/
Expandable Seafloor Observatory (OBSEA)	Mer Méditerranée (Espagne)	20 m	Géophysique, Océanographie, Biologie	http://www.obsea.es/
Victoria Experimental Network Under the Sea (VENUS)	Saanich Inlet/Détroit de Georgia (C.-B., Canada)	100-300 m	Géophysique, Océanographie, Chimie, Biologie	http://venus.uvic.ca/

Infrastructures

Un observatoire câblé est constitué de 4 éléments essentiels :

- (1) un réseau de câbles électro-optiques et de nœuds profonds pour la distribution du courant et une communication haut-débit bidirectionnelle;
- (2) une large gamme d'instruments déployés sur le fond et dans la colonne d'eau;
- (3) un centre d'archive de données pour la gestion, l'archivage et la distribution des données;
- (4) un centre d'opération pour contrôler et surveiller toutes les composantes de l'infrastructure à la fois sous-marine et terrestre (Barnes, Best et al, 2008).

Ce sont des systèmes flexibles à large bande passante qui peuvent recevoir divers types d'instruments caractérisés par différents protocoles de communication et des demandes en courants variées (de 15V à 400V). Chaque nœud de l'observatoire peut accueillir une large gamme de modules et d'instruments incluant des boîtes de jonction connectant chacun des divers instruments regroupés sur des plateformes, des capteurs individuels, des mouillages ou des stations pour AUV (Figure 3-24). Un observatoire câblé comme NEPTUNE Canada se caractérise par (Barnes, Best et al, 2008) :

- Une présence de 24 heures/7 jours/365 jours/25 ans
- Une large gamme de capteurs
- Des fréquences d'échantillonnage pouvant être inférieures à la seconde
- Des expérimentations multidisciplinaires interactives et en temps réel
- La détection d'évènements et une capacité de réponse
- La capacité à transmettre des grands volumes de données aux utilisateurs en temps quasi-réel
- Une quasi-immunité contre les problèmes climatologiques
- Une large quantité de courant électrique (kW) entre la côte et les fonds marins.

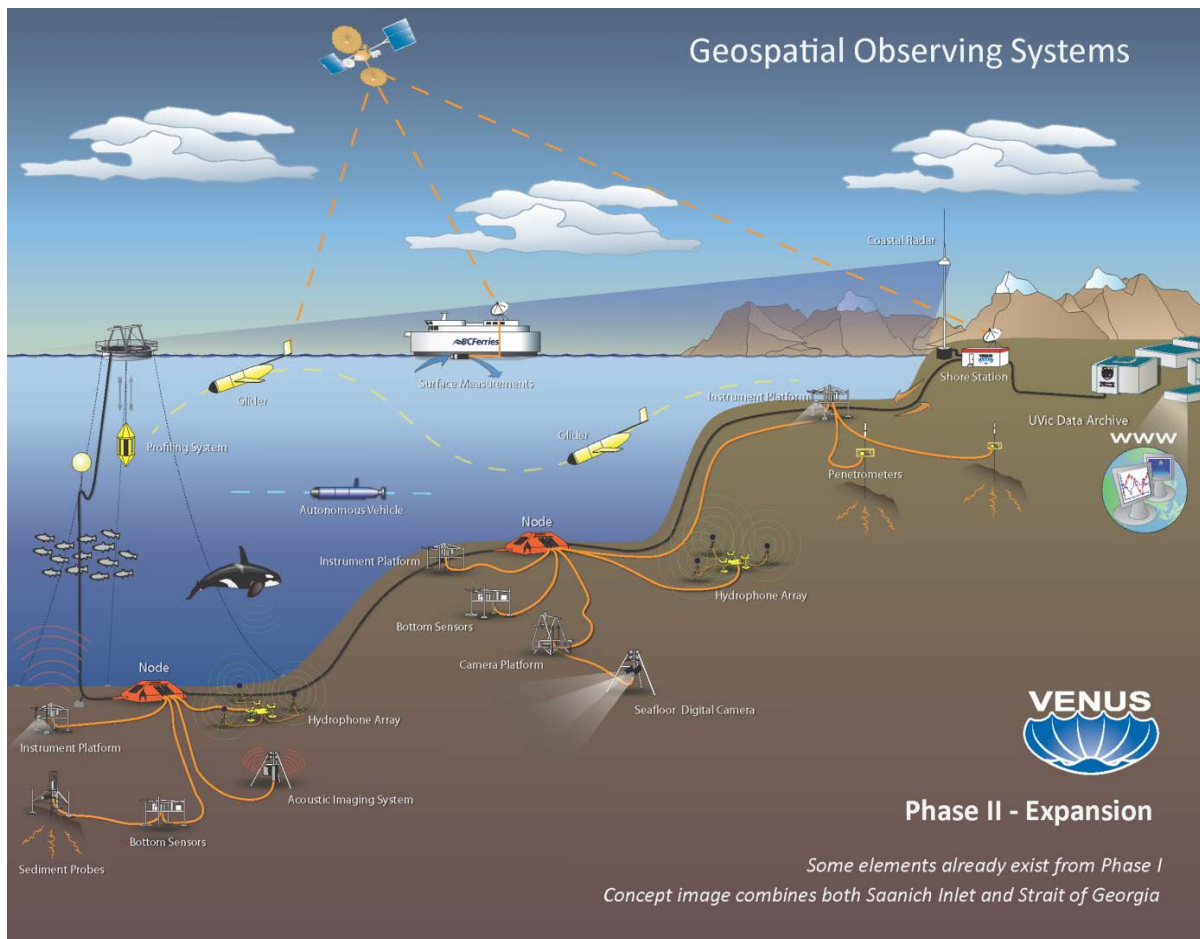
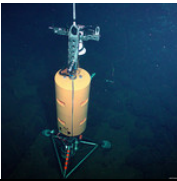

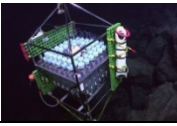
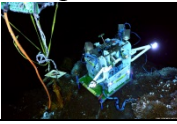
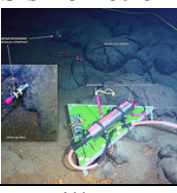
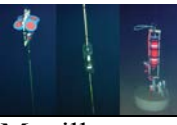



Figure 3-24 Schéma décrivant la structure d'un observatoire câblé sur l'exemple de VENUS (ONC, UVic, C.-B., Canada).

Le réseau câblé NEPTUNE Canada, planifié pour une durée de 25 ans, a ainsi mis en place un site d'observation sur le segment Endeavour de la dorsale Juan de Fuca dans le Pacifique Nord-Est, une zone à forte activité hydrothermale qui a fait le sujet d'études depuis les années 80 (Chase et al, 1985). Le site est fonctionnel depuis septembre 2010 et se compose d'une large gamme d'instruments et de capteurs permettant la mise en place d'approches multidisciplinaires pour une étude intégrée des écosystèmes hydrothermaux. Le nœud est relié à trois sites le long de la dorsale grâce à des câbles secondaires connectés à des boîtes de jonction (Figure 3-24). Les capteurs et instruments déployés sur le site Endeavour sont décrits dans le Tableau 3-26. Le site est toujours en cours d'installation et doit être complété dans les deux années à venir.

Tableau 3-26 Liste des instruments déployés sur le site d'Endeavour de NEPTUNE Canada (source : www.neptunecanada.ca, photos : ONC/CSSF).

Site	Instrument/ capteur	Variabes mesurées	Principal investigateur
Grotto	Sonar COVIS 	Imagerie Quantification flux hydrothermal	Rutgers University (E.-U.)
	BARS 	Haute température (fluide pur) Résistivité	University of Washington (E.-U.)
	RAS 	Echantillonneur à distance de fluide diffus Température	NOAA (E.-U.)
	Tempo-mini 	Imagerie Température Oxygène Concentration en fer	IFREMER (France)
	ADCP	Courants Température	NEPTUNE Canada
	Sismomètre 		Commission géologique du Canada
Site nord	Mouillage avec ADCPs et CTD 	Courants Température Conductivité Densité	Pêche et Océan Canada
Site sud/ Mothra	Mouillage avec ADCPs et CTD	Courants Température Conductivité Densité	Pêche et Océan Canada
	Sismomètre 		Commission géologique du Canada

Méthodes d'analyse

Les observatoires câblés offrent des moyens innovants pour l'étude des processus benthiques et de nouvelles approches méthodologiques adaptées sont en cours de développement afin d'exploiter de façon optimale les capacités uniques offertes par ces systèmes (Juniper, Matabos et al, 2013; Matabos, Aguzzi et al, 2011; Matabos, Best et al, sous presse; Robert and Juniper 2012). Il est important d'adapter la fréquence d'échantillonnage aux phénomènes d'intérêt. Il est maintenant reconnu que les courants internes et d'inertie créent des patrons hydrodynamiques très variables dans le temps et dans l'espace, dont les oscillations influencent l'activité rythmique des espèces marines. Grâce aux observatoires, nous avons enfin accès aux rythmes biologiques des espèces en milieu profond dont la connaissance permet de déterminer des fréquences d'échantillonnage nécessaires à l'étude des processus à plus grande échelle (Aguzzi, Company et al, 2012).

L'obtention simultanée, en un même point, de données environnementales et d'imagerie permet de mieux comprendre le lien entre les changements des conditions environnementales et la structure des communautés animales grâce à l'utilisation de statistiques appropriées. Des méthodes avancées d'écologie numérique comme les analyses canoniques ou les cartes de vecteurs propres de Moran (MEM, Legendre and Legendre, 2012) permettent de détecter des patrons écologiques temporels et de modéliser ces structures en fonction des variables environnementales mesurées. La méthode MEM fournit la contribution relative de chaque espèce et des variables environnementales aux différentes structures détectées, ainsi que la quantité de variance expliquée par le modèle identifié (Angeler, Viedma et al, 2009). En outre, il est important de noter que la large gamme d'instruments déployés en un site fournit un grand nombre de variables environnementales (propriétés physico-chimique de l'eau, données de flux, courants, apport en matière organique, données sismiques,...) qui sont rarement accessibles en simultané via le biais de missions ponctuelles. Un effort combiné de chercheurs provenant de différentes disciplines est cependant nécessaire afin de traiter correctement l'ensemble des données avant de définir des modèles d'écosystèmes.

Observatoires non câblés

Les observatoires non câblés vont répondre aux mêmes questions scientifiques que les observatoires câblés, avec cependant une limitation liée à la disponibilité de l'énergie et aux capacités de transmission de données. Ils offrent une alternative intéressante au câble avec une infrastructure moins coûteuse, plus légère et donc plus facile à déployer. Ils seront donc privilégiés pour des étapes de validation de site avant câblage, des projets nécessitant des durées d'acquisition plus courtes (c.à.d. 5-10 ans) ou des projets de suivi d'impact.

Au niveau européen, le développement des observatoires fond de mer a été organisé dans le cadre des projets ESONET (CA et NOE) et EMSO (<http://www.emso-eu.org/management/>). EMSO est une « large-scale **European Research Infrastructure (RI)** ». Il forme un réseau de partenaires travaillant sur les observatoires fond de mer fixes ayant pour objectif commun l'étude long terme et temps réel des interactions entre la géosphère, la biosphère et l'hydrosphère. La Figure 3-25 présente les 12 sites d'observation supportés par le projet EMSO.

La dernière génération d'observatoires non câblés présentée ci-dessous permet l'acquisition de séries temporelles avec transmission de données en temps quasi réel vers une station d'archivage de données à terre. Ce type d'infrastructure nécessite une maintenance annuelle.

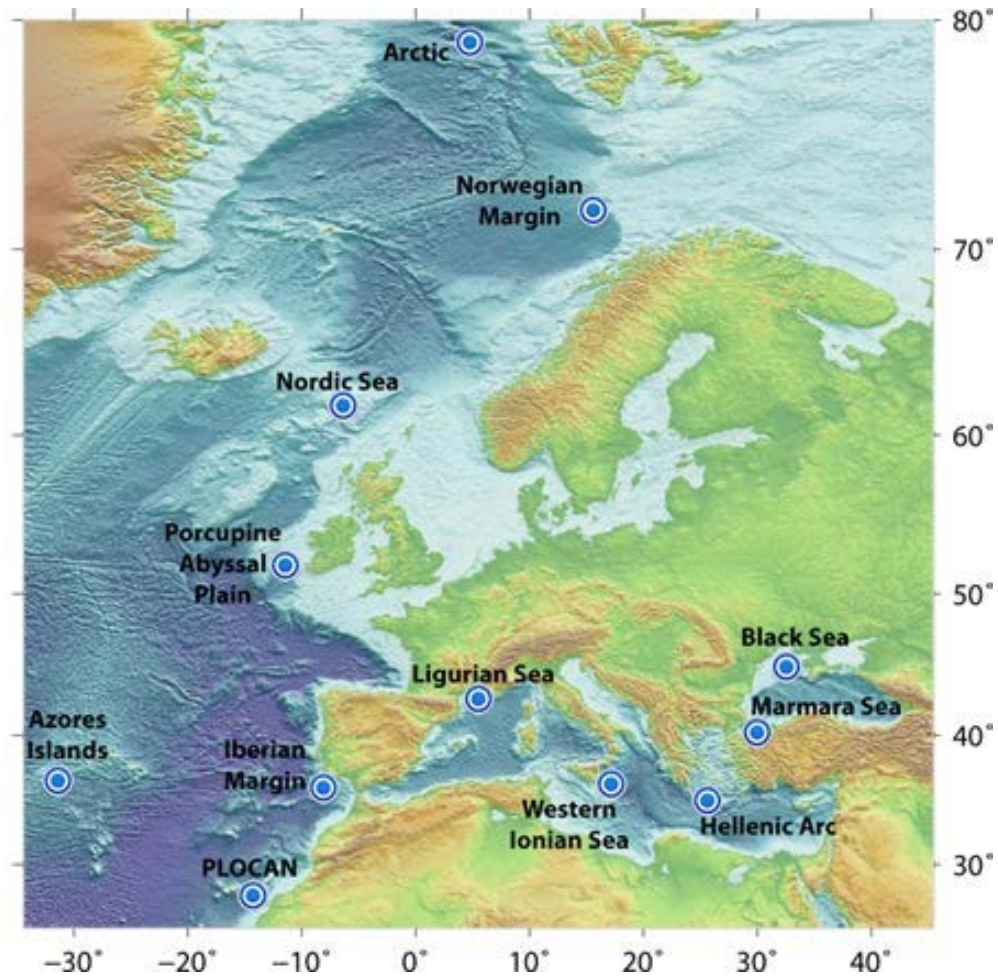


Figure 3-25 Carte de localisation des 12 sites observatoires du réseau EMSO.

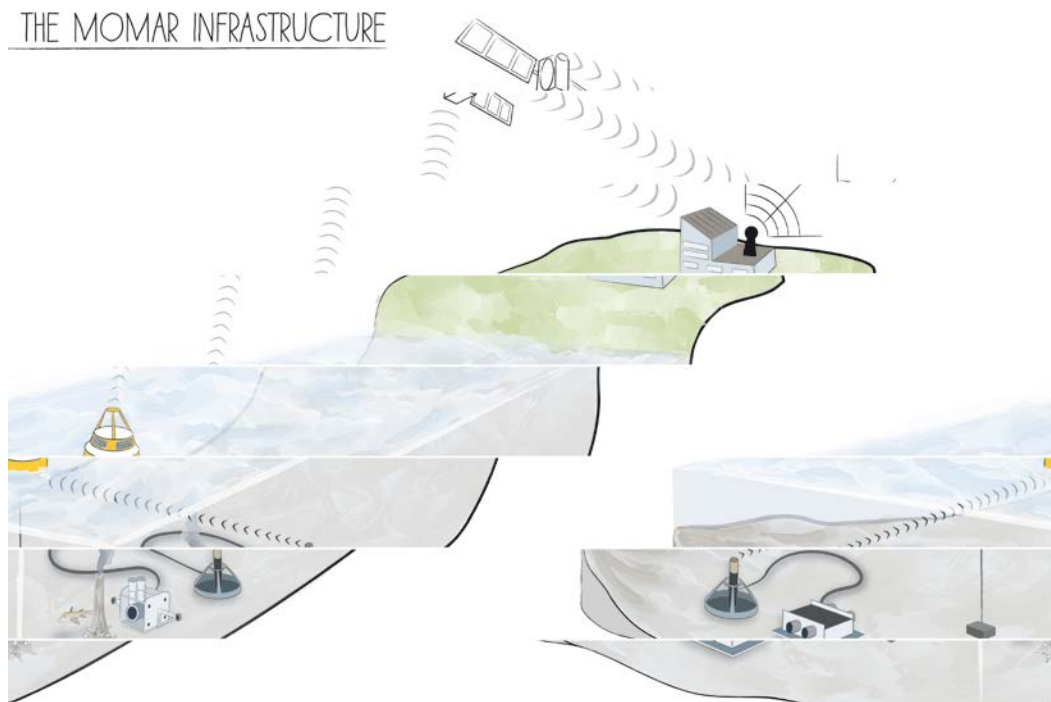


Figure 3-26 Schéma décrivant l'infrastructure de l'observatoire non-câblé MoMAR, déployé sur le champ hydrothermal Lucky Strike. © Ifremer

L'observatoire MOMAR

Les objectifs de l'observatoire MoMAR (Nœud EMSO-Açores) sont d'assurer un suivi de la dynamique naturelle de l'écosystème hydrothermal, sur le champ hydrothermal Lucky Strike au sud des Açores, ainsi que des processus géologiques et hydrothermaux actifs. Il rassemble des instruments dédiés à l'étude de la sismicité, de la géodésie, de la physique, de la géochimie et de l'écologie. Les données acquises permettront d'identifier les facteurs qui influencent les variations du milieu et de la faune ainsi que de mieux comprendre les processus, les interactions et les variations des différentes composantes de l'écosystème à plusieurs échelles spatiales (locale, régionale) et temporelles. Le projet est coordonné par l'Ifremer, l'IPGP et le CNRS (Cannat et al, 2011; Colaço et al, 2011). Il est à noter que cet observatoire est positionné dans une aire marine protégée (Santos et al, 2003).

L'infrastructure de cet observatoire non câblé est constituée

- de 2 nœuds de surveillance (SEA MONitoring Node, Blandin and Rolin 2005). regroupant dans une même structure l'énergie nécessaire au fonctionnement des capteurs, l'électronique de pilotage des capteurs et d'archivage des données (COSTOF), le système de transmission acoustique des données.
- d'une bouée relais (BOREL) : La transmission des données est effectuée par acoustique pour la partie sous-marine, puis par satellite (Iridium) jusqu'à la terre. Le relais est assuré par une bouée mouillée à portée acoustique des nœuds de surveillance. Cette bouée peut être équipé de capteurs accessoires (météo, GPS, ...). L'énergie est apportée par des batteries rechargées par des panneaux solaires. Pour augmenter la fiabilité, la transmission est assurée par deux voies redondantes.
- de capteurs connectés et pilotés par les nœuds de surveillance. Le premier nœud a pour objectif l'étude de la sismicité et des déformations verticales du plancher océanique et abrite un sismomètre à trois composantes, un hydrophone et deux sondes de pression (IPGP). Le second nœud s'intéresse à la dynamique temporelle d'un assemblage de modioles hydrothermales. L'instrumentation rassemble un module d'observation écologique (caméra vidéo et capteurs environnementaux) et un module de colonisation microbiologique instrumenté (Ifremer).
- d'un centre de réception et d'archivage des données situé sur le centre Ifremer de Brest.
- et enfin, pour augmenter le potentiel scientifique de l'observatoire, d'un réseau de capteurs autonomes (sondes de température, sismomètres fond de mer (OBS), mouillage d'océanographie physique) déployé sur la même zone. Les périodes de maintenance de l'observatoire, avec un retour annuel sur site, permettent également de compléter la connaissance du site par l'acquisition ponctuelle de données complémentaires, non accessibles par l'observatoire : écologie, chimie des fluides, microbiologie...

Cet observatoire est en opération depuis 2010. Sa maintenance est assurée annuellement lors d'une campagne hauturière de deux semaines (assurée par le Pourquoi pas? ou, occasionnellement, la Thalassa, et le ROV Victor 6000).



Déploiement du nœud géophysique

La bouée BOREL

Le module d'observation biologique

Figure 3-27 Les différents éléments de l'observatoire MOMAR.

3.4. Techniques d'exploitation utilisées ou en cours de développement par les entreprises et organismes de recherche.

3.4.1. Nodules

Dès que l'on a considéré les nodules comme des gisements miniers sous-marins, se sont posés les problèmes des spécificités d'une exploitation minière sur des fonds océaniques, recouverts par des hauteurs d'eau proches de cinq kilomètres. Il ne s'agit pas, ici, de développer les aspects techniques de ces recherches, mais plutôt d'en dégager les grands traits, ainsi que leurs incidences sur les recherches sur les nodules. C'est l'objet de l'article de GEMONOD, groupement d'intérêt public pour la mise au point des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules polymétalliques, au 21^{ème} Ocean Technology Conference en 1989 (Herrouin et al, 1989).

3.4.1.1. Spécificités d'une exploitation minière des nodules

Impératifs techniques

Un champ de nodules ne correspond pas à un gisement en trois dimensions comme la majorité des gisements à terre, mais en deux dimensions car les nodules sont disposés à la surface des sédiments: il n'y a donc qu'une seule couche exploitable. La prise en compte de la topographie des lieux de ramassage est donc essentielle et exige une connaissance des pentes, des escarpements et des obstacles.

Une exploitation des nodules se fait en pleine mer; cela correspond à des distances de plusieurs centaines sinon des milliers de kilomètres par rapport à une structure portuaire d'acheminement et de traitement des minerais.

Les paramètres météo-océaniques sur le site d'extraction ainsi que sur les trajets doivent être pris en compte.

Les nodules sont associés à des sédiments qui, dans le cas d'une exploitation, représentent le plan de travail de tout engin de ramassage. Les caractéristiques géotechniques de ces sols sous-marins conditionnent les techniques à mettre en œuvre dans l'éventualité d'un ramassage industriel.

L'eau de mer est un milieu corrosif et les engins de ramassage auront à subir une pression hydrostatique de 500 bars.

De plus, il faut amener au fond de l'océan l'énergie nécessaire au bon fonctionnement des engins mécaniques comme les moteurs des pompes ou des concasseurs.

Impératifs économiques

L'économie globale d'une exploitation des nodules impose que l'entreprise minière dépasse des seuils de production annuelle de plusieurs millions de tonnes. John Méro, qui a fait miroiter un nouvel eldorado avec son livre « The mineral resource of the sea » en 1965 (Mero, 1965), estimait une production minimale de 2 millions de tonnes de nodules par an pour atteindre un seuil de rentabilité. Vers 1972, une estimation « réaliste » semblait être une cadence d'extraction de 15 à 20000 tonnes par jour. Dans son rapport final de 1988, le groupement GEMONOD estimait à 1,5 millions de tonnes la quantité annuelle de nodules indispensable pour une exploitation.

3.4.1.2. Trois grandes filières de ramassage

Sur la base des contraintes qui viennent d'être exposées, trois grandes filières de ramassage ont été proposées et partiellement testées:

- les systèmes de ramassage par bennes,
- les systèmes hydrauliques,
- les systèmes de préleveurs libres autonomes.

Une première comparaison des trois systèmes fut faite dès 1972 par Stechler et Nicholas (Stechler and Nicholas, 1972) au colloque sur les nodules de New York. Ils conclurent leur présentation en insistant sur l'urgence qu'il y avait à développer l'une de ces méthodes: « Nous n'avons aucun doute que, ultérieurement, lorsque l'effort sur le ramassage des nodules sera accentué, de meilleures méthodes seront développées. Cependant, nous ne pouvons pas attendre la fin du millénaire ». Une quarantaine d'années plus tard, alors que le caractère d'urgence de ces ramassages n'est plus à l'ordre du jour, il est possible de faire le point sur les efforts effectués pour chacun de ces systèmes.

Système de ramassage par bennes ou « procédé CLB » (Continuous Line Bucket)

Les tout premiers essais de ramassage industriel des nodules sont d'origine japonaise. Le commandant Yoshio Masuda invente, dès 1966, un système de ramassage mécanique des nodules, constitué d'une boucle de câble portant des bennes à intervalles réguliers. Entre 1967 et 1970, des essais sont faits en bassin, puis dans le port d'Inoshima et dans la baie de Suruga. Puis un test est effectué par 3 600 m de fond à 460 km au nord de Tahiti. En 1970, le système est breveté dans plusieurs pays. Masuda s'associe avec Méro pour approcher les compagnies minières. En mai 1972, ils forment le Syndicat International CLB avec 30 compagnies de 6 pays différents (dont 10 japonaises). Un test de démonstration (Masuda, Cruickshank et al, 1971) est réalisé en 1972, à environ 1800 km au sud-est d'Hawaï par 4700 m de profondeur, avec un seul navire, le Chiyoda Maru 2, un ancien baleinier de 79 m. La boucle de ramassage est constituée de 8400 m de câble sur lequel 250 bennes sont accrochées. Les bennes quittaient le navire par l'avant et remontaient par l'arrière. Ce n'est pas un franc succès: le système d'attachement des bennes sur les câbles provoque des blocages au passage de la machine de traction, mais surtout, le navire, qui ne possédait pas de propulseurs latéraux suffisants, dérive au gré des vents, ce qui provoque des enchevêtrements de la boucle.

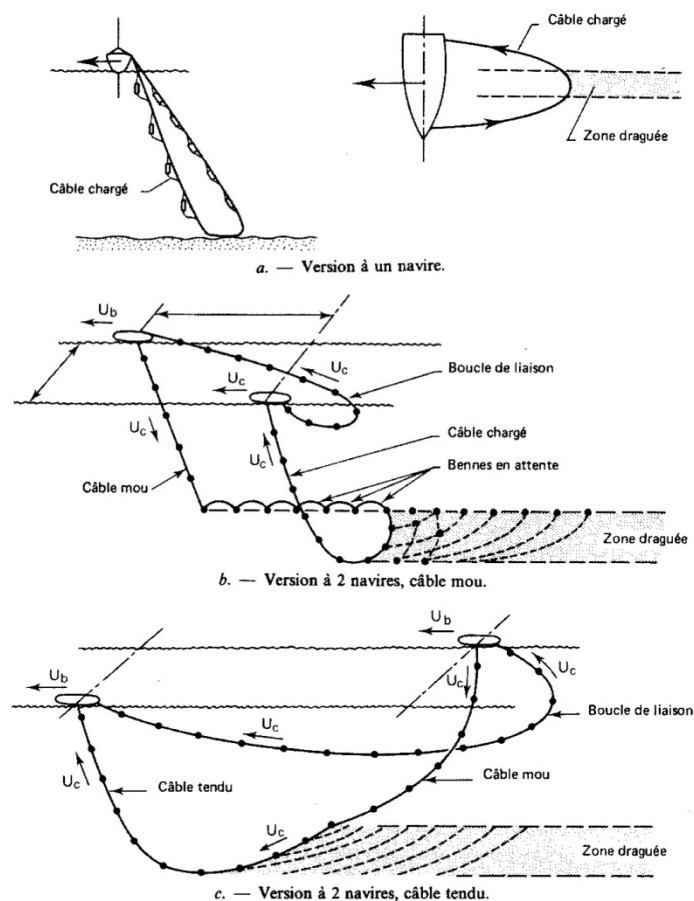


Figure 3-28 Différentes versions du CLB.

À ces tests de démonstration, la France envoie des observateurs de l'association SLN (Société Le Nickel) - CNEXO alors en charge des études sur les nodules. En tirant leçon de ces échecs, le CNEXO initie l'étude d'un système de ramassage à deux navires. Un tel projet est présenté en 1974 par les Ateliers et Chantiers de Bretagne, avec des partenaires allemands et japonais. Il est breveté en 1975 (Gauthier and Marvaldi, 1975). Un câble de 13 km devait permettre à un système de bennes d'effectuer une boucle, cette fois-ci entre deux navires, pour bien séparer le brin descendant du brin ascendant.

Le principe de la réalisation d'un essai du système à deux navires est accepté en juin 1975 par quinze des membres du Syndicat International CLB. Le rapport final (C.L.B., 1976), remis aux 15 membres commanditaires en septembre 1976, prévoit un budget de 8 millions de dollars pour la réalisation d'un essai de deux mois à la mer d'un système d'une capacité de 300 tonnes par jour. Sur les quinze compagnies, trois seulement (dont AFERNOD) répondent favorablement. Les autres associés ont rejoint entretemps des consortia ayant choisi le système de ramassage hydraulique.

Le système CLB est simple et économique, mais c'est un système passif qui entraîne un ramassage aléatoire des nodules. Il présente en permanence le risque de blocage et de rupture d'un long câble et n'est pas compatible avec des variations de topographie du sol marin, ni avec des variations de densité de la couverture en nodules. Il est définitivement abandonné sans aucun essai à la mer en conditions normales d'exploitation.



Figure 3-29 Descente d'une drague sur le câble du CLB.

Systèmes de ramassage hydrauliques (hydraulic – lift et air – lift)

Le principe de ce système est celui de la collecte des nodules par un engin se déplaçant sur le fond puis de la remontée des nodules à l'intérieur d'un tube rigide situé entre l'engin collecteur et un support de surface (bateau ou barge). Le système de collecte peut être très variable, depuis la drague simple jusqu'aux aspirateurs plus ou moins raffinés permettant ou non le débouillage au fond. C'est sur les méthodes de remontée des nodules à l'aide d'une conduite rigide que plusieurs systèmes ont été proposés. Dès 1972, deux techniques sont envisagées et expérimentées: le procédé hydraulique (« hydraulic-lift ») et le procédé basé sur l'injection d'air (« air-lift »). Dans le système « hydraulic-lift », des pompes centrifugeuses sont placées à plusieurs niveaux du tube rigide et créent un flux d'eau ascendant qui entraîne les nodules en surface. Dans le système « air-lift », de l'air sous pression est injecté à différentes profondeurs dans la colonne de remontée et amène en surface un mélange de trois phases: l'air, l'eau et les nodules.

Le système de ramassage hydraulique a été expérimenté par les différents consortiums et a permis les premiers ramassages de nodules à l'échelle minière. Bien entendu, ces tests ont été faits dans le plus grand secret et il est certain que les résultats connus sont incomplets. Cependant, certains des résultats obtenus durant ces missions ont été publiés.

Les premiers essais de ramassage ont lieu dès 1970, sur le plateau de Blake, au large de la Floride, par 1000 m de profondeur, par Deep Sea Ventures, à l'aide du Deep Sea Miner, un cargo de 6750 tonnes. Le système utilisé est le système « air-lift » qui s'est avéré tellement efficace lors de ces premiers essais que les nodules arrivaient en surface à la vitesse d'un boulet de canon!

En 1970, le consortium OMA transforme un ancien navire minéralier de 20 000 tonnes, le Wessel Ore, en l'équipant d'un puits central et d'un derrick puis, en 1976, de propulseurs orientables. Ce bateau, rebaptisé Deep Sea Miner II (Kaufman, 1985), est capable de mettre en place un tube de plus de 4 km qui se termine par une tête d'aspiration hydraulique aspirant les nodules à l'aide d'une drague montée sur skis. Le système de remontée est également le système « air lift ». Après des essais infructueux en 1977, c'est sur le site « Domes C », situé à plus de 4 000 m, qu'en octobre 1978, 550 tonnes de nodules sont remontées en 18 heures, à une cadence maximale de 50 tonnes par heure. Puis le système tombe en panne. Ces essais

sont également utilisés pour étudier l'impact d'une extraction industrielle des nodules sur leur environnement biologique (Ozturgut, Lavelle et al, 1981).

Le consortium OMI a équipé un navire de forage pétrolier, le SEDCO 445 avec des équipements d'essai de tête de drague et de remontée hydraulique par « hydraulic-lift » et par « air-lift ». Les essais effectués sont très satisfaisants (Yasui, 1978) : le 28 mars 1978, les premiers nodules arrivent à bord. Environ 600 tonnes de nodules sont ramassées au cours de trois essais à 1 250 km au sud d'Hawaïi, à une profondeur de 5200 m.

Le groupe OMCO loua à l'US Navy le Glomar Explorer. Le navire est équipé d'un système de collecte utilisant des vis d'Archimède pour sa propulsion sur des sédiments mous. En février 1979, après quelques essais infructueux, environ 50 tonnes de nodules sont prélevées. Les résultats plus ou moins concluants de ces essais ont montré les difficultés de prélever les nodules à l'échelle industrielle et le coût élevé de la mise au point d'une telle technologie (Welling, 1981).

Après 1980, ces campagnes d'essais de ramassage par grands fonds vont cesser quasi totalement. Les efforts en vue de la préparation d'une exploitation éventuelle des mines océaniques vont se déplacer. La mise au point des engins de ramassage nécessite une meilleure connaissance de l'environnement des nodules : topographie de détail, propriétés mécaniques des sédiments qui doivent supporter le déplacement du collecteur de nodules, relations entre les nodules et les sédiments ...

La remontée des nodules dans un tube rigide est une des contraintes fortes qui limitent le système de ramassage hydraulique, en particulier par sa grande sensibilité aux conditions météo-océaniques. En 2001, un colloque (Fourth ISOPE Ocean Mining Symposium – Szczecin/Pologne) sur les techniques minières dans les océans fait le point sur l'utilisation d'un système de tubes souples « flexible riser » (Yoon, 2001). Testé à des profondeurs voisines de 400 m, ce système aurait l'avantage d'une plus grande indépendance entre l'engin collecteur et le navire de stockage. Mais, pour l'instant, aucun essai de ramassage à grande profondeur ne semble prévu.

Systèmes de navettes autonomes (système PLA) et le chantier sous-marin français

Le concept de véhicules ou navettes autonomes assurant les fonctions de collecte et de remontée a été discuté dès 1972 au colloque de New-York et les auteurs qui comparent cette méthode aux deux autres concluent qu'elle est certainement la plus économique (Wiendiek, 1972). D'ailleurs, l'un des auteurs qui représente la société « Oceans Unlimited International, Inc. » annonce qu'il est en mesure de présenter, sans dévoiler des secrets industriels, quelques caractéristiques de ces engins autonomes dont le prix de revient unitaire serait d'environ 500 000 dollars et qui peuvent servir pendant 3 ans. En utilisant 10 engins pouvant chacun effectuer 8 navettes par jour (ce qui implique une descente à 5 000 m, un ramassage, une remontée et un déchargement en 3 heures), et sachant que chaque navette permettra de prélever 30 tonnes de nodules, il est facile de conclure que, chaque jour, 2400 tonnes de nodules seront « aisément » prélevés. Si l'on admet qu'une tonne de nodule vaut au minimum 50 dollars, cela représente un résultat de 560.000 dollars par jour. À notre connaissance, ces navettes autonomes n'ont jamais été construites.

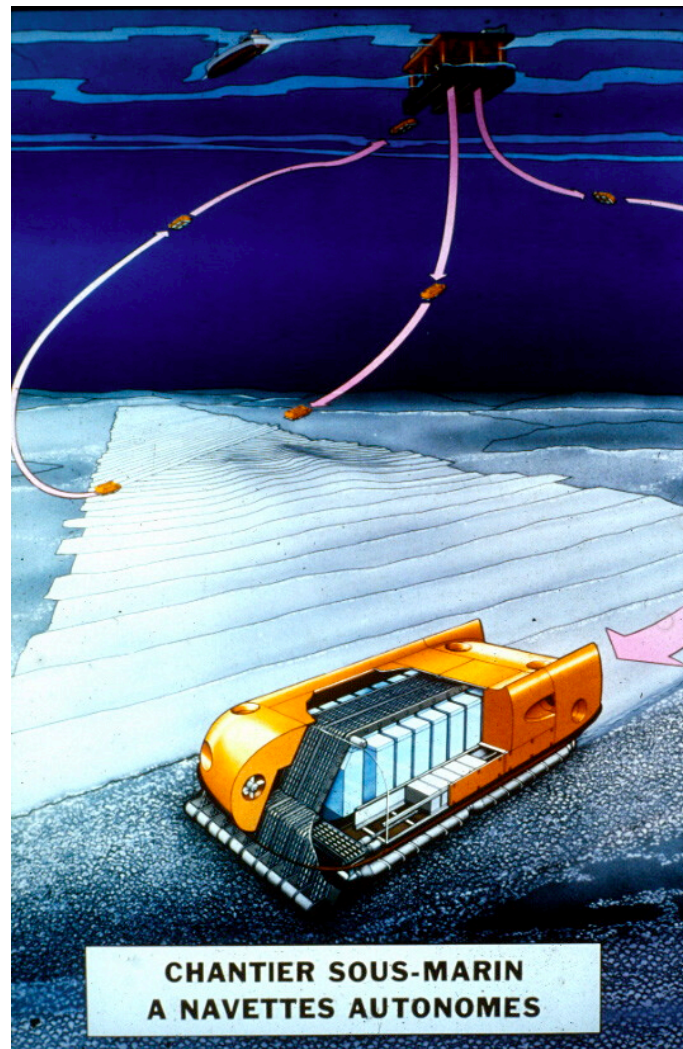


Figure 3-30 Vue d'artiste du chantier sous-marin à navettes autonomes.

Cette filière est considérée avec beaucoup d'attention en France par AFERNOD car elle est indépendante d'une exploitation avec un tube de remontée de maniement fragile. Le concept de « chantier sous-marin à navettes autonomes » est étudié avec soin (Bastien-Thiry, 1977) et les premiers essais d'un PLA-1 (Préleveur Libre Autonome) sont réalisés en 1977 pour tester en particulier des propulseurs à vis d'Archimède. Ce système ne sera jamais réalisé.

Mais, encouragé par les premiers essais de cet engin expérimental (Vertut, 1977), il est décidé en 1977 de lancer le programme PLA-2 portant sur l'étude d'un engin libre autonome (collecteur) qui fonctionnerait en appui sur le sédiment jusqu'à 6000 m de profondeur sans liaison avec la surface et qui serait capable de se déplacer sur une distance de un à deux kilomètres en effectuant des opérations de ramassage de nodules.

A partir de 1980, la France décide d'étudier en parallèle avec le « chantier sous-marin à navettes autonomes » un système de collecte hydraulique basé sur une drague autopropulsée. C'est le groupement d'intérêt économique GEMONOD, créé à cet effet qui est chargé de cette étude.

Dès 1983, les études sur le chantier sous-marin sont arrêtées pour des problèmes techniques nécessitant un trop long et trop coûteux programme de recherche et de développement. Mais le PLA-2-6000 en cours d'étude servira de base pour le collecteur du système hydraulique.



Figure 3-31 Maquette du PLA 2.

3.4.1.3. Chantier de ramassage hydraulique français (Herrouin et al, 1989)

Un des principes de base pour GEMONOD a été de ne recourir à des innovations techniques que dans la mesure où celles-ci étaient inévitables. En effet, afin de réduire les aléas de développement et de mise au point, et par conséquent les coûts correspondants, la définition et les choix ont été orientés vers les technologies existantes ou en voie d'aboutir à court terme. Ces études se sont appuyées sur les expériences acquises dans les domaines suivants:

- offshore, grâce en particulier à l'Institut Français du Pétrole (IFP) et notamment aux dossiers du programme *Mer profonde*. De nombreuses sociétés de ce secteur ont participé au programme.
- minier pour ce qui concerne le traitement physique des minerais (concassage, séparation, ...) ainsi que sur les premières réalisations d'engins miniers océaniques peu profonds.
- sous-marin profond, où la France tient un rôle de premier plan, grâce aux recherches de l'Ifremer et aux réalisations confiées aux industriels de ce secteur. De plus, les développements technologiques réalisés sur le PLA ont également servi de référence.

D'autres domaines ont aussi servi de référence : le dragage, le transport du charbon, l'architecture navale, etc. ...

Par ailleurs, GEMONOD et PREUSSAG (Société Allemande minière et offshore) ont décidé en 1985 de mener en collaboration les études de fonctions fondamentales du système de ramassage :

- système de collecte (Preussag),
- locomotion de l'engin (Gemonod),
- remontée hydraulique des nodules (en commun).

Cette coopération a permis une étude plus approfondie des points techniques majeurs. Les études ont été réparties entre les sous-traitants spécialisés dans les domaines indiqués ci-dessus et en interne suivant les compétences réunies dans le Groupement.

Après analyse du cahier des charges de l'exploitation, GEMONOD a choisi le concept du système de ramassage comportant un engin de dragage autopropulsé, relié par un long flexible à la conduite principale.

Fonctionnement général du système

Le débit maximum du système est de 500 t/h (140 kg de nodules humides par seconde).

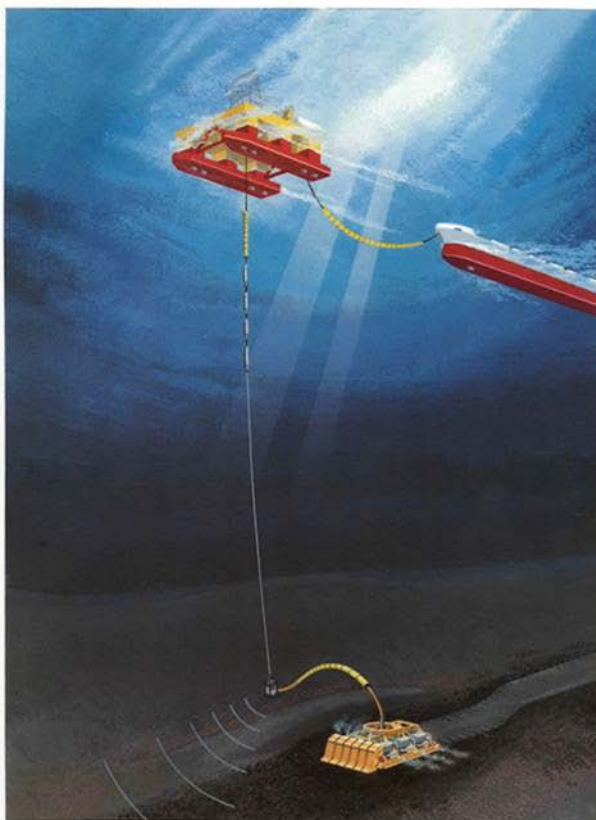
La vitesse nominale de déplacement du chantier est de 0,65 m/s. Sa vitesse maximum est de 0,75 m/s.

Le système manœuvre en faisant des demi-tours à l'extrémité des plages minières. Le rayon de giration nominal de l'engin de dragage est de 100 m. La perte de temps pendant un demi-tour est en moyenne de 10 mn, temps inférieur à la durée de la manœuvre car le système est opérationnel pendant celle-ci.

Les obstacles au ramassage sont considérés ponctuels quand leur largeur ne dépasse pas 150 m. Dans ce cas, le chantier de surface ne dévie pas de sa route, mais l'engin de fond les évite en faisant une trajectoire en forme de créneau. La perte de temps est proportionnelle à la largeur de l'obstacle.

La longueur du flexible est suffisante pour éviter de modifier la longueur de la conduite métallique tant que la variation de profondeur ne dépasse pas 150 m. La quasi-totalité des plages minières répond à ce critère.

De façon à ne pas perdre de temps, les minéraliers sont chargés pendant le fonctionnement du système de ramassage.



CHANTIER DE RAMASSAGE

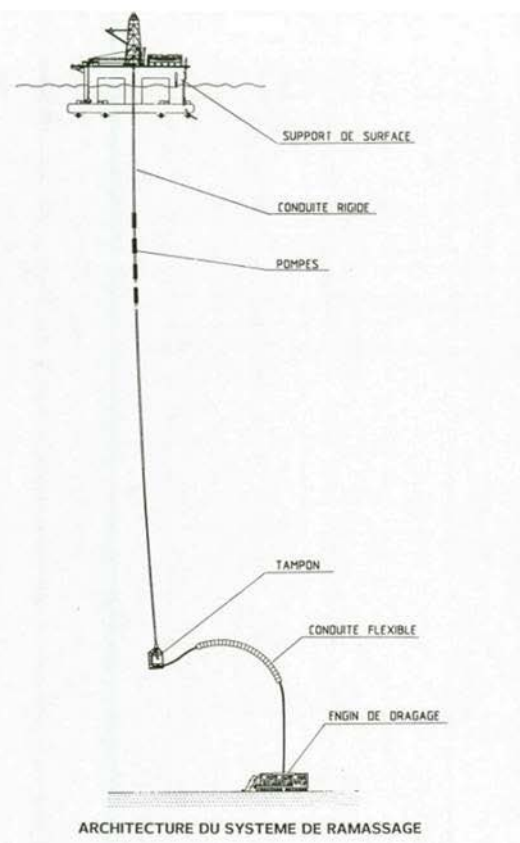


Figure 3-32 Vue d'artiste et principe du chantier de ramassage par air-lift.

Engin de dragage

Il remplit trois fonctions principales: la collecte, la locomotion, le conditionnement et le pompage des nodules avant leur remontée dans le flexible.

Des études approfondies des fonctions ont conduit au choix des équipements de base de l'engin. L'architecture a été définie et un pré-dimensionnement de l'ensemble a été réalisé.

L'engin mesure 18 m x 15 m x 5 m. Sa masse est de 330 tonnes pour un poids apparent de 78 tonnes. Sa capacité maximum est de 600 t/h. La puissance électrique d'alimentation requise est de 3 MW.

Lors de son passage, il ramasse les nodules sur une largeur de 12 m, les concasse puis refoule le broyat dans la conduite flexible qui relie le préleveur à la conduite principale.

Le système de remontée hydraulique

Cette fonction fondamentale a fait l'objet d'études et d'essais approfondis.

Trois systèmes ont été étudiés:

- l'air-lift: injection d'air comprimé vers 2000 m de profondeur; cet allègement de la colonne permet de remonter les nodules,
- les pompes centrifuges situées sur la conduite vers 1000 m de profondeur,
- la pulpe : broyage des nodules et adjonction de sédiment sur l'engin de dragage et pompage à l'aide de 4 stations de pompes à piston échelonnées sur la hauteur de la conduite.

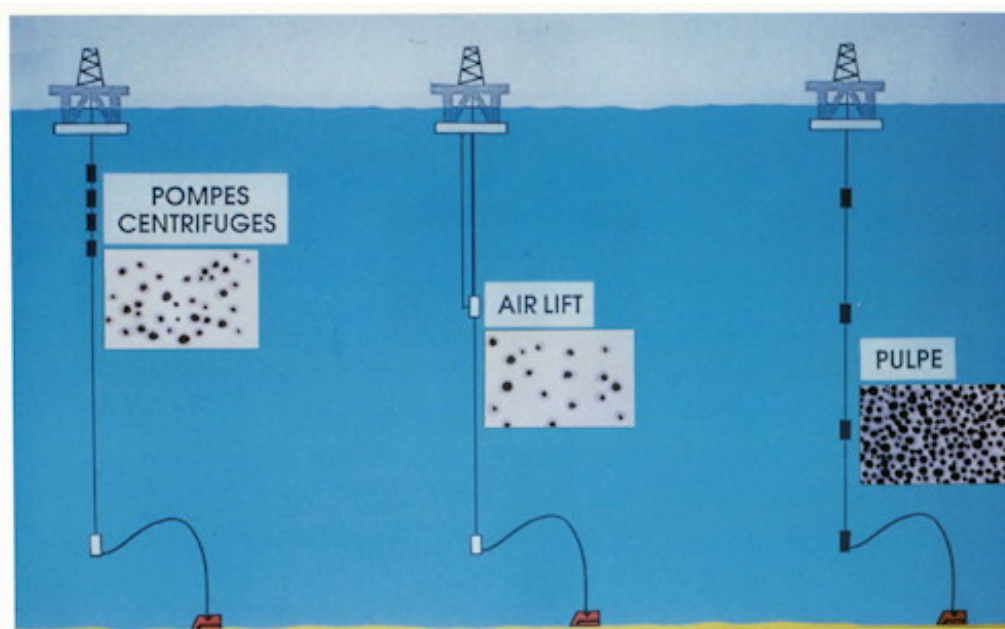


Figure 3-33 Systèmes de remontée hydraulique.

Les deux premiers sont apparus très comparables; le troisième, très intéressant mais plus délicat à mettre au point, serait réservé à une exploitation ultérieure. L'air-lift et les pompes centrifuges ont été menés quasiment au même niveau de définition. Ni l'un ni l'autre n'entraînent de différences majeures pour les autres parties du système. L'avantage à moyen terme s'étant dégagé en faveur des pompes, celles-ci ont été retenues pour la définition de base du système de ramassage.

Le flexible

Le tuyau flexible de 600 m relie l'engin de dragage à la conduite principale. Il permet à l'engin de s'écarter de la route suivie par le chantier de surface sans entraîner d'efforts inadmissibles sur l'engin. En régime normal, il a la forme d'une arche flexible soutenue par des volumes de flottabilité en mousse syntactique, en son milieu, sur 200 m.

Il est réalisé en structure type *Coflexip allégé*. Son diamètre intérieur est de 15" (381 mm).

Pendant les phases de manutention, le flexible soutient l'engin de dragage.

Le tampon

C'est l'interface entre le flexible et la conduite métallique. Cette dénomination vient de ce que, dans un premier temps, il a été envisagé de constituer à cet endroit un stockage intermédiaire en trémie. Par la suite, ce stockage inutile a été supprimé. La structure est réalisée en tubes et en profilés.

Il comprend :

- l'articulation et la connexion du flexible,
- un flexible intermédiaire,
- des équipements tels que capteurs, sonar, ...

La conduite métallique

A la suite d'études comparatives et de prédimensionnement, une conduite en acier à haute limite élastique a été retenue.

Le diamètre extérieur de la conduite est de 16" (406 mm); cette dimension est normalisée pour les risers pétroliers. Les tubes sont en tronçons de 27 m de long; ils sont équipés de connecteurs type riser pour assurer une connexion rapide.

La longueur nominale de la conduite métallique est de 4 800 m. Le bas de la conduite est équipée d'un lest de 100 tonnes afin de suivre au mieux le déplacement du chantier, ainsi que pour améliorer le comportement dynamique.

La partie supérieure (2000 m) de la conduite est allégée par des volumes de flottabilité.

Le support de surface

Le support de surface a un poids économique important dans le chantier de ramassage. A l'inverse des autres parties du système, il ne présente pas de point critique technique particulier.

Une analyse comparative de différents types de support et des études fonctionnelles ont permis de choisir un support de type plateforme semi-submersible catamaran.

Sa taille et sa conception rappellent celles d'une grosse plateforme de forage.

La plateforme semi-submersible remplirait les fonctions suivantes :

- manutention du système de ramassage,
- stockage et maintenance des équipements de ramassage,
- positionnement dynamique / remorquage du système de ramassage,
- transfert / conditionnement des nodules.

L'avant-projet sommaire de la plateforme semi-submersible, réalisé en 1988, a permis de préciser ses caractéristiques principales:

- longueur hors tout 110 m
- largeur 70 m

- hauteur 40 m
- tirant d'eau 22 m
- déplacement en transit 28600 t
- déplacement en opération 41600 t

La logistique du chantier et l'exploration

La logistique du chantier de ramassage comprend :

- un navire de petite taille,
- un navire ravitailleur de grande taille, opérant à partir d'une base arrière située en Californie, pour la relève du personnel ainsi que pour le transport des consommables.

L'exploration en amont aux opérations d'exploitation comporterait : une exploration préliminaire simultanée à la période de pilotage permettant de recenser les plages minières correspondant à une durée d'exploitation de 20 ans, puis une exploration détaillée (environ 2 mois par an) des plages minières exploitées à court terme.

Le transport

Les nodules sont transportés, depuis le site minier jusqu'à l'usine de traitement, au moyen de 9 minéraliers spécialisés. La spécificité de ces minéraliers a été étudiée par le chantier naval NORMED et la Société EMH et consiste en :

- Des cales, spécialement conçues pour recevoir la pulpe à haute concentration qui sera pompée à partir du support de surface minier. Cette pulpe est transférée au moyen d'un tuyau flexible de 300 m de long.
- Un positionnement dynamique lâche, pour maintenir le minéralier à proximité du support de surface pendant la phase de chargement. Des simulations ont été effectuées de façon à définir la puissance nécessaire aux propulseurs et la configuration d'ensemble.
- Un tuyau de chargement, des vannes, et des dispositifs de connexion pour le flexible de transfert.

Capacité de production du système

La détermination de la capacité de production constitue évidemment un paramètre important puisqu'elle suppose la prise en compte réaliste de l'ensemble des interactions existant entre le site minier et le système de ramassage.

Les études de développement ont conduit à considérer une production annuelle de 3 millions de tonnes comme étant à la fois attrayante sur le plan économique, réaliste pour un système minier hautement performant, et d'un impact limité sur le futur marché des métaux.

Compte-tenu du nombre de jours opérationnels sur site, des temps perdus en manœuvre, de l'ensemble des pertes au cours du dragage, de la remontée et du transfert des nodules vers l'usine de traitement, est-il possible de dimensionner et de faire fonctionner le système de manière à atteindre l'objectif fixé de production, soit 1,5 million de tonnes sèches par an pendant une durée suffisante pour rentabiliser les investissements?

La détermination du nombre de jours opérationnels sur site prend en compte des temps de carénage, des transits, des changements de minéralier, des aléas météo, des durées de maintenance programmées et des pannes aléatoires.

Les études réalisées en collaboration avec les opérateurs compétents ont conduit à estimer à 115 le nombre de jours perdus par an (carénage, maintenance, changement de minéralier, météo...). Le système serait donc effectivement opérationnel 250 jours par an.

La simulation du ramassage effectuée sur le site minier français a permis d'arriver aux conclusions suivantes: le système autopropulsé, équipé d'une drague de 15 m de large, se déplaçant à 0,65 m/s et travaillant sur le cœur du permis français, est capable de fournir à l'usine de traitement 1,5 million de tonnes sèches de nodules par an et ce pendant une durée de 50 ans. Ainsi, on récupérera les métaux contenus dans environ 30 % du tonnage présent sur le site.

Les 70 % restant se décomposeront en 12,5 % de pertes, 16 % de zone à fort relief et 41 % de zones dont une partie pourrait être exploitée par un système de 2^{ème} génération.

3.4.1.4. Quelques travaux plus récents

Concepts développés par Aker Solutions Drilling Technologies (Allemagne)

Le système (Knodt, 2013) est encore conceptuel. Il est composé de crawlers (1) reliés à un module tampon (2) par des flexibles par lesquels sont transportés les nodules. Le module tampon est destiné à stocker temporairement les nodules extraits afin de ne pas encombrer le système élévateur (3), formé par des tubes d'acier connectés par des flexibles (inspiré des technologies de pétrole et gaz) dans lequel est injecté de l'air sous pression afin de faire remonter les nodules. L'ensemble du système est contrôlé par des caméras, ROVs et AUVs (4) et opère dans un champ de balises. A la surface, le navire opérateur (5) est équipé de treuils et grues ainsi que de moyens de stockage des nodules.

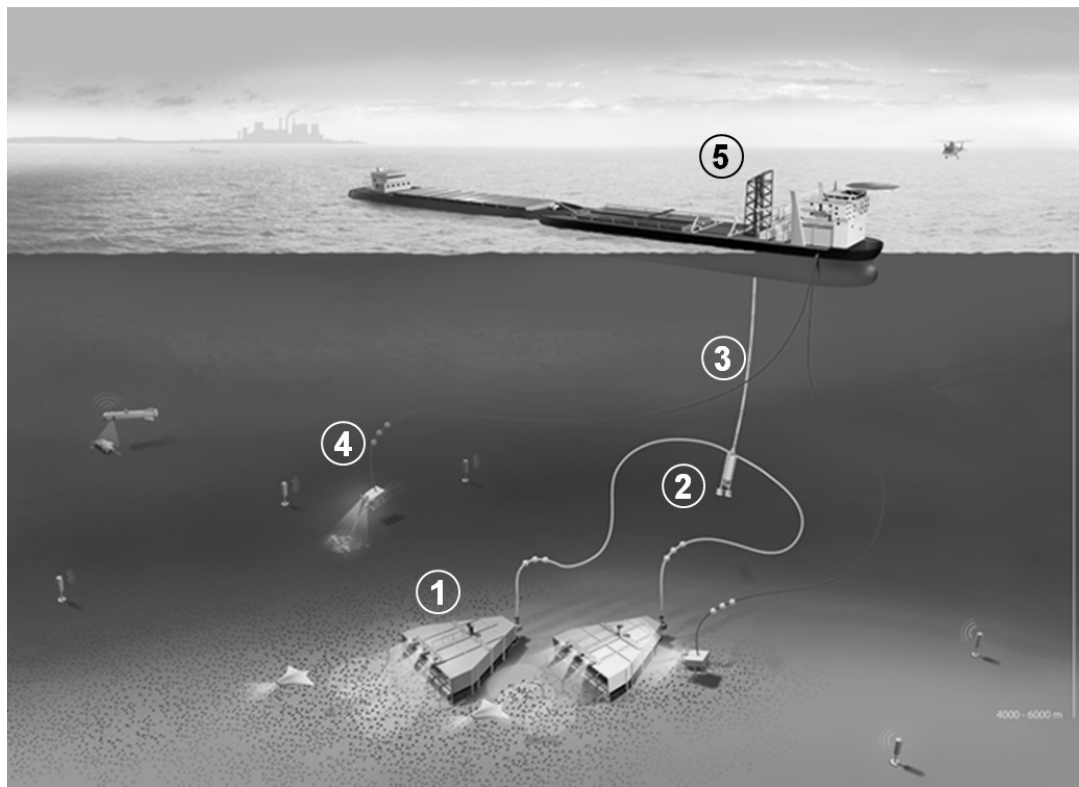


Figure 3-34 Concept développé par Aker Solutions Drilling Technologies (Knodt, 2013).

Concepts développés par Korea Institute of Ocean Science and Technology (Corée du Sud)

Le robot pilote développé à échelle 1/5 par KIOST pour exploiter les nodules (Hong et al, 2013; Yeu et al, 2013; Kim et al, 2013) est destiné à être testé en conditions réalistes lors d'une expérience à mener en 2015 (pour l'instant non financée). Le robot est modulaire, composé de plusieurs unités (crusher, pilote, aspirateurs, unités optiques...) afin de simplifier la maintenance en mer. Sa consommation est de 550 kW. Le système est commandé et suivi depuis le navire. L'image montre le schéma opérationnel du robot. Des tests en mer ont été effectués afin de tester les performances du robot et les systèmes de navigation par une profondeur de 1300 m.

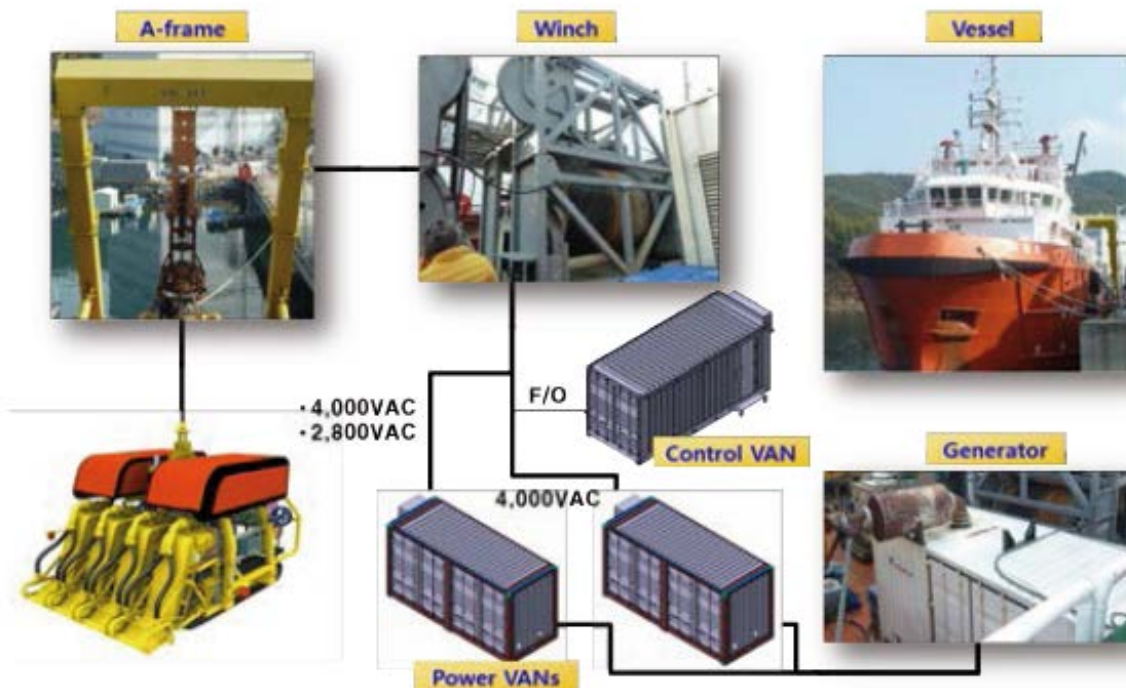


Figure 3-35 Concept développé par Kioist (Hong et al, 2013).

3.4.2. Encroûtements hydrogénétiques (ou cobaltifères)

L'exploitation des encroûtements est, sur le plan technologique, beaucoup plus difficile que celle des nodules de manganèse. La récupération des nodules est relativement aisée puisqu'ils reposent sur un substrat de sédiments meubles, tandis que les encroûtements sont plus ou moins solidement rattachés au substrat. Pour une exploitation réussie, il est indispensable de récupérer les croûtes sans enlever le substrat rocheux, ce qui diluerait considérablement la teneur en minerai (Halkyard, 1985).

MAJOR DIMENSIONS

Length : 13 m
 Width : 8 m
 Height : 6 m
 Weight : 100 t
 Installed Power : 900 KW

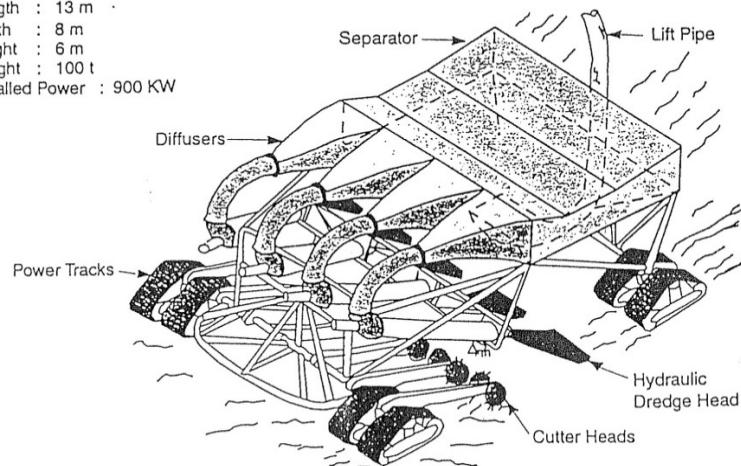


Figure 3-36 Modèle de collecteur (Halkyard, 1985).

Cinq opérations se succéderaient : la fragmentation, le broyage, l'enlèvement, le ramassage et la séparation. La méthode de récupération proposée fait intervenir un véhicule qui se déplace sur le fond marin et qui est attaché à un navire d'exploitation minière en surface, au moyen d'un système d'enlèvement hydraulique et d'un câble électrique (Chung, 1996) (Figure 3-37). Le véhicule est autopropulsé et se déplace à une vitesse d'environ 20 cm/s. Dans ce cadre, le volume de la production pourrait atteindre 1 million de tonnes par an. Ce scénario offre une efficacité de 80% en ce qui concerne la fragmentation et de 25% pour ce qui est de la dilution de la teneur en minerai lors de la séparation des croûtes du substrat.

Ito et al, (2008) ont proposé un procédé (Figure 3-38) pour séparer efficacement le minerai (ex. les oxyhydroxydes de fer - manganèse) des minéraux du substratum. Ce procédé, utilisable pour les encroûtements et pour les nodules, commence par une étape de broyage et de séparation des grains en trois granulométries : < 0.5 mm, entre 0.5 et 1 mm et entre 1 et 4 mm. La fraction la plus petite passe par une étape de flottation ce qui permet de séparer directement le minerai du stérile. La fraction intermédiaire subit une phase de séparation gravitaire (table à secousses) pour séparer le stérile du minerai. Enfin, la partie la plus grossière connaît une étape supplémentaire. En effet, une première séparation gravitaire permet de séparer minerai, stérile et une fraction mélangée. Cette dernière est de nouveau broyée jusqu'à une fraction fine (< 0.5 mm) et passe alors par l'étape de flottation. Au total, ce procédé permettrait une récupération de 93 % du minerai pour une pureté de 86 %.

D'autres méthodes innovantes sont proposées, telles que le décapage par jet d'eau pour séparer les croûtes du substrat, les techniques de lixiviation *in situ* et le détachement des croûtes du substrat par effet acoustique. Ces méthodes sont très prometteuses et gagneraient à être développées.

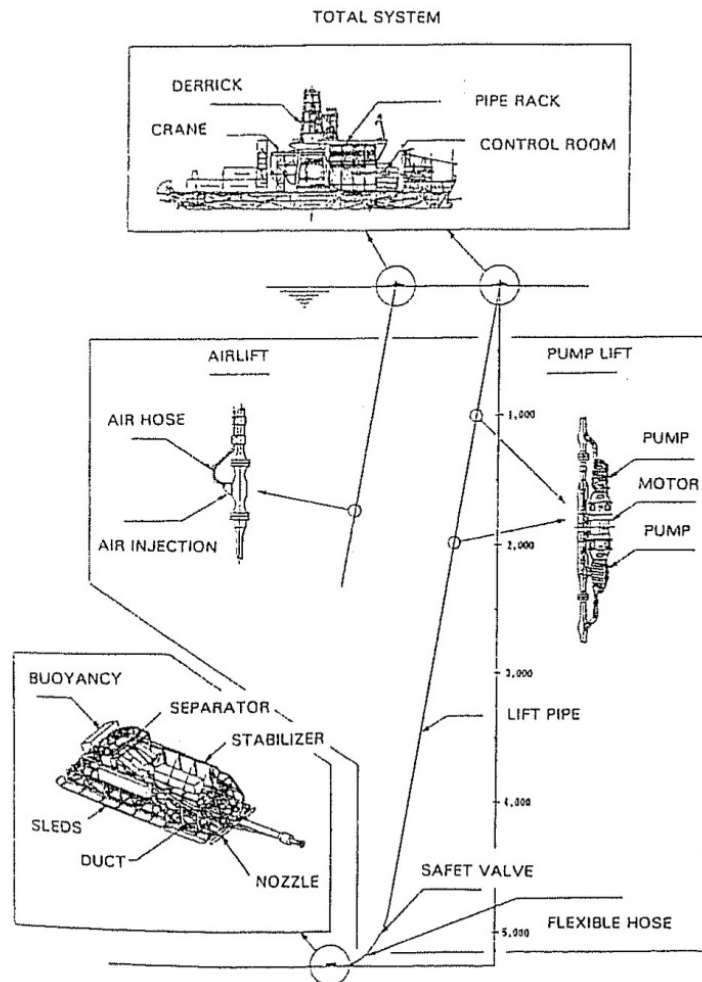


Figure 3-37 Système minier japonais (Chung, 1996).

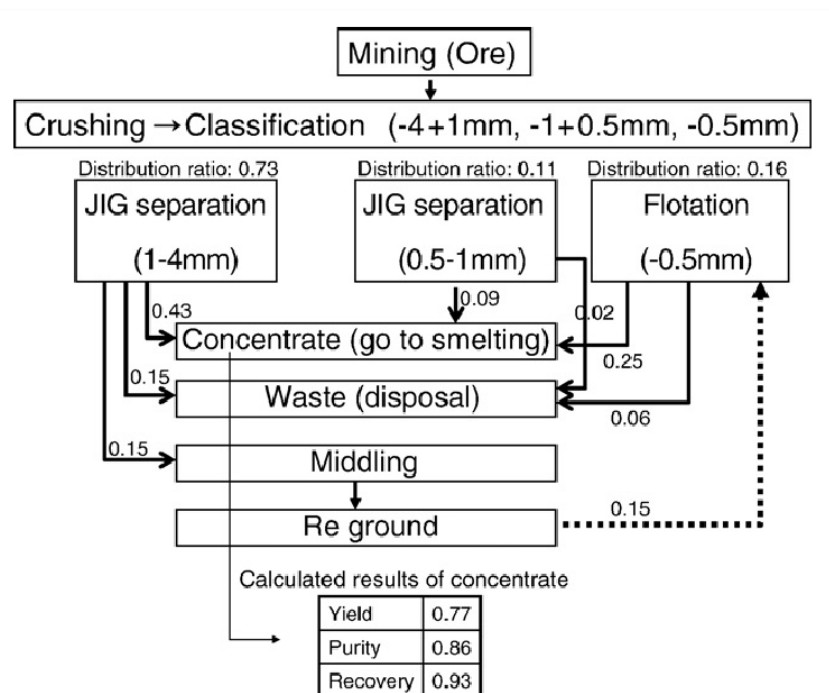


Figure 3-38 Procédé de séparation proposé pour les encroûtements et les nodules. D'après Ito et al, 2008.

3.4.3. Sulfures hydrothermaux

3.4.3.1. Techniques d'exploitation envisagées par Nautilus Minerals pour Solwara 1

La réflexion sur le dimensionnement des outils d'exploitation pour le projet Solwara 1, dans le bassin de Manus, en Papouasie Nouvelle Guinée, a été lancée par la compagnie Nautilus Minerals dès 2007. Un rapport (Blackburn et al, 2010), disponible sur le site internet de Nautilus à l'adresse http://www.nautilusminerals.com/i/pdf/NAT005_Solwara_1_Offshore_Production_System_Definition_and_Cost_Study_Rev_3_21_June2010.pdf détaille le système de production et les coûts associés. Le système envisage le développement de plusieurs éléments comprenant (Figure 3-40) :

- (i) des engins miniers sur le fond (SPT),
- (ii) un système de riser et de pompage permettant de remonter le minerai (RALS) et
- (iii) un navire de production permettant de prétraiter le minerai avant envoi à terre (PSV).

Les engins miniers sur le fond (SPT) sont de trois types (Figure 3-40) :

- (i) un tailleur auxiliaire – « *Auxiliary cutter* »,
- (ii) un tailleur principal – « *Bulk cutter* »
- (iii) un engin de ramassage – « *Collecting machine* ».

Chacun de ces engins a été développé pour répondre à une fonction précise. Le tailleur auxiliaire a pour objectif de préparer le terrain pour le tailleur principal. Il peut travailler sur terrains rugueux et crée des terrasses pour les autres engins. La tête servant à fragmenter la roche est fixée d'un bras mobile pour plus de flexibilité. Le tailleur principal a une capacité de fragmentation des roches beaucoup plus importante mais ne peut travailler que sur un sol peu accidenté. Il est donc utilisé après le passage du tailleur auxiliaire et laisse derrière lui des fragments de roches calibrés pour le ramassage. L'engin de ramassage prélève le minerai fragmenté en l'aspirant sous forme d'une boue composée d'eau de mer et de roches. Le matériel est ensuite amené par pompage jusqu'au système RALS par l'intermédiaire d'un flexible.

Le système comprenant la station de pompage et le riser (RALS) est constitué d'une grande pompe et d'un conduit rigide (riser) suspendus à un navire. Ce système permet de délivrer la boue minéralisée à la surface.

Le navire de production (PSV) récupère le minerai et, par des procédés classiques, déshydrate la boue minéralisée. Le matériau ainsi obtenu est ensuite transféré sur une barge de transport amarrée au navire. L'eau de mer est renvoyée vers le fond à travers le riser et permet d'alimenter en énergie hydraulique la pompe RALS.

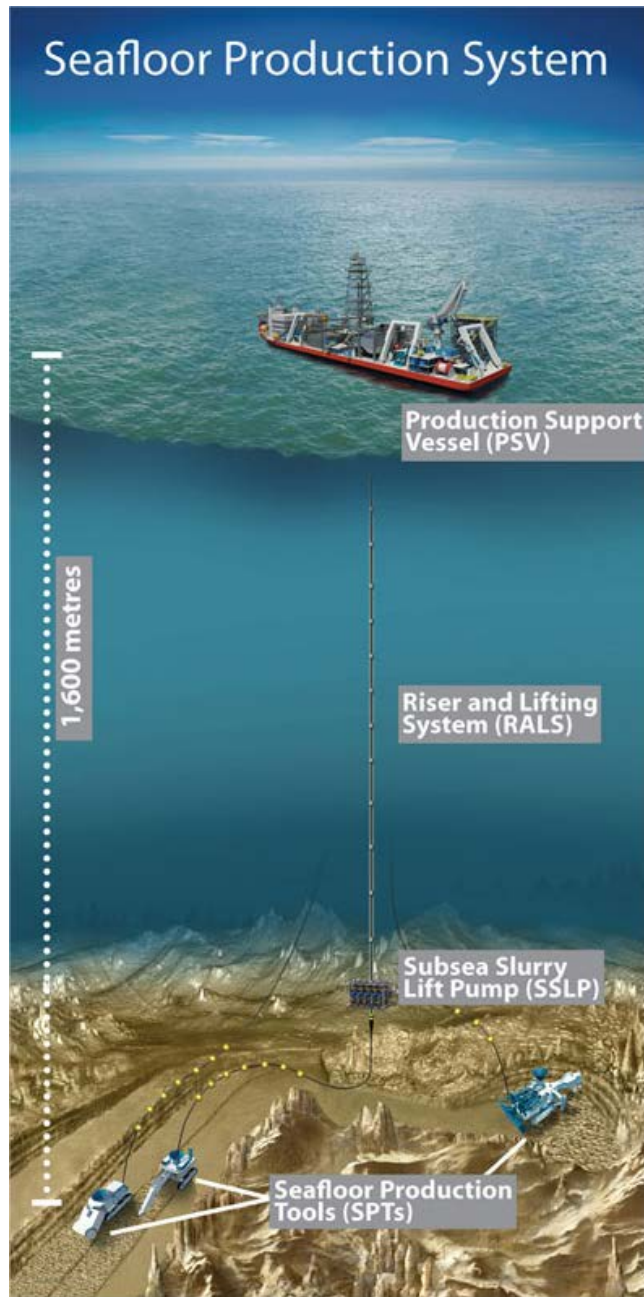


Figure 3-39 Vue d'artiste du système d'exploitation imaginé par Nautilus pour le site de Solwara 1 (source : <http://www.nautilusminerals.com/s/resourceextraction.asp>).

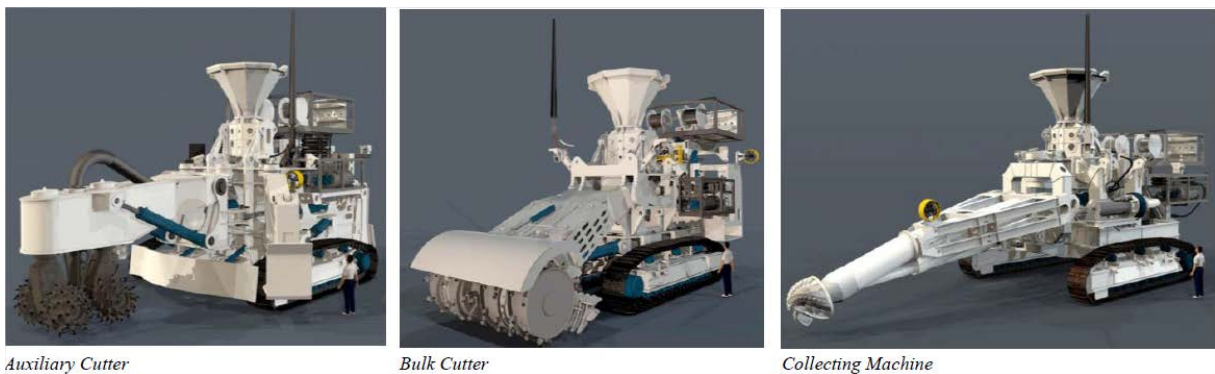


Figure 3-40 Engins miniers sur le fond utilisés pour fragmenter et ramasser le minerai (source : <http://www.nautilusminerals.com/s/resourceextraction.asp>).

3.4.3.2. Techniques d'exploitation envisagées par Neptune Minerals

Le système proposé par Neptune Minerals Plc est assez semblable à celui de Nautilus Minerals, bien qu'il soit a priori plus robuste pour faire face aux mers plus difficiles où il devrait être déployé. Le projet pilote de Neptune Minerals est en effet situé dans les îles Kermadec, au nord de la Nouvelle Zélande, vers 30°S de latitude. Neptune Minerals envisage les éléments suivants (<http://www.neptuneminerals.com/minerals-extraction/>)

- un navire minier, disposant du positionnement dynamique, capable d'effectuer les opérations de charge et décharge requises sous les conditions de vent, de mer, et de courant attendues.
- un outil d'extraction (grab) descendu sur le fond par un système de grue et mis en œuvre par un ROV. Les opérations sont contrôlées depuis un poste de commande sur le navire. L'extracteur dépose le minerai dans une benne pour être remonté en surface.
- deux bennes utilisées pour le transport du minerai entre le fond et la surface. Ce système est conçu spécifiquement pour qu'il n'y ait pas de contamination de la colonne d'eau et/ou d'érosion du minerai durant son ascension.
- un système de calibrage et de déshydratation du minerai. L'eau est récupérée et filtrée avant d'être renvoyée au fond dans la benne vide. Le matériel sec est concassé et stocké par le navire. Durant cette étape, il est échantillonné de manière à en évaluer les teneurs en métaux.
- un système de stockage du minerai.

Peu de détails techniques sont présentés pour soutenir ces éléments.

3.4.4. Autres ressources liées à l'hydrothermalisme océaniques

3.4.4.1. Techniques d'exploitation des boues minéralisées de mer Rouge envisagées par Diamond Fields International

Les ressources minérales de mer Rouge sont très spécifiques: il s'agit de boues métallifères (Figure 3-41) riches en zinc, cuivre, argent, or, plomb et autres métaux mises en place par hydrothermalisme océanique dans des cuvettes profondes, les *deeps*, qui constituent l'axe actif de la dorsale séparant l'Arabie de l'Afrique. Ces ressources, découvertes en 1965 et étudiées dans les années 1970s par Preussag A.G. sous l'égide de la Saudi-Sudanese Red Sea Commission, font l'objet de droits récemment acquis par la compagnie Diamond Fields International, jusqu'alors plutôt spécialisée dans l'extraction de diamants dans les sédiments au large de la Namibie.



Figure 3-41 Exemple de carottes de boues métallifères de mer Rouge (Diamond Fields International).

Un test pilote d'exploitation réalisé par Preussag a démontré que les boues minéralisées du *deep* Atlantis peuvent être continûment extraites (le document consulté ne précise

malheureusement pas comment) et concentrées en mer en utilisant des techniques conventionnelles de flottation. Durant ce test, 15 000 m³ de sédiments et de saumures provenant de quatre sites de cette zone ont été traités. Les teneurs en métaux finalement obtenues ont été supérieures à celles prévues par les modèles réalisés par Preussag (<http://www.diamondfields.com/s/AtlantisII.asp>).

3.4.4.2. Techniques d'exploitation de l'énergie thermique des sites hydrothermaux envisagées par Marshall Hydrothermal

Marshall Hydrothermal (<http://www.marshallhydrothermal.com/>) présente des pistes visant à récupérer "l'énorme potentiel énergétique des événements hydrothermaux". Bien qu'a priori alléchant, ce site ne propose pas de véritables solutions techniques mais seulement quelques concepts (Figure 3-42) qui ne résistent pas à une analyse élémentaire du problème. Les tuyaux destinés à concentrer et remonter le flux hydrothermal vers la surface seraient très rapidement inopérants car obstrués par les minéralisations! Le fluide perdrait par ailleurs une bonne partie de son énergie par refroidissement naturel au cours de la remontée. Cet exemple n'est donc présenté que pour recommander la prudence face aux concepts non soutenus par une étude technique sérieuse.

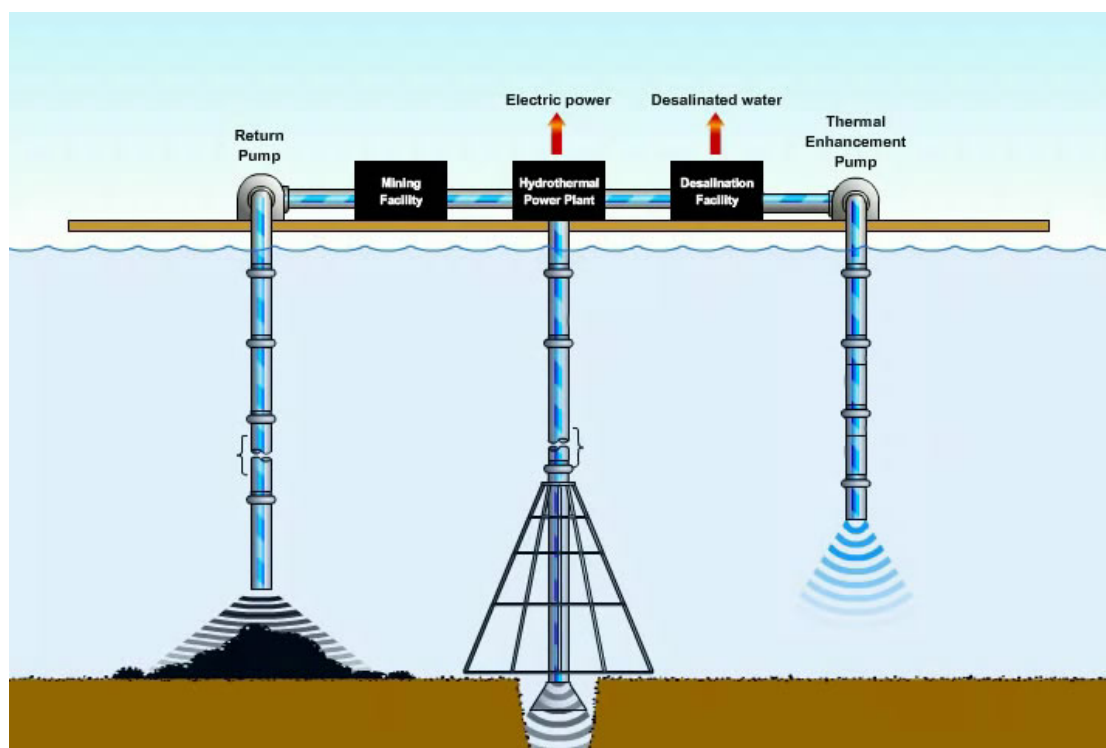


Figure 3-42 Concept d'exploitation de l'énergie thermique des sites hydrothermaux actifs (Marshall Hydrothermal).

3.5. Entreprises, acteurs, états impliqués (opérateurs et fournisseurs)

De nombreux acteurs sont impliqués dans l'exploration et l'exploitation future des ressources minérales profondes. L'exploration consiste à rechercher des indices de minéralisation. Ces indices deviennent un gisement lorsque le potentiel économique est avéré (teneur et quantité suffisantes), conduisant le cas échéant à son exploitation.

3.5.1. Organisations impliquées dans l'exploration et avant vocation à exploiter les ressources minérales marines

3.5.1.1. *Nodules*

Les acteurs historiques de l'exploration des nodules polymétalliques sont décrits dans le Chapitre 2, partie " historique de la prospection au niveau international". Un nombre limité de ces acteurs conserve une activité de maintien des permis d'exploration délivrés par l'ISA, auxquels se sont ajoutés des compagnies soutenues par des états insulaires du Pacifique d'une part, quelques compagnies européennes d'autre part. L'ensemble des permis concerne la zone Clarion-Clipperton dans l'océan Pacifique, à l'exception du Gouvernement de l'Inde qui dispose d'un permis dans le bassin Indien Central, dans l'océan Indien.

Les contractants historiques avec l'ISA sont :

- le **Gouvernement de l'Inde** (Inde)
- le Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (**BGR**) (Allemagne)
- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (**COMRA**) (Chine)
- Deep Ocean Resources Development Co. Ltd (**DORD**) (Japon)
- l'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer (**Ifremer**) (France)
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (**KIOST**, ex KORDI) (Corée du Sud)
- **Yuzmorgeologiya** (Russie)
- **Interoceanmetal Joint Organization** (Bulgarie, Cuba, Rép. Tchèque, Pologne, Russie et Slovaquie)

Les contractants avec l'ISA apparus depuis 2010 sont :

- **Tonga Offshore Mining Ltd** (Tonga)
- **Nauru Ocean Resources** (Nauru)
- **Marawa Research and Exploration Ltd.** (Kiribati)
- **UK Seabed Resources Ltd** (Royaume Uni)
- **G-TEC Sea Minerals Resources NV** (Belgique)
- **Ocean Mineral Singapore Pte Ltd** (Singapour)

3.5.1.2. *Encroûtements*

Deux organisations ont à ce jour obtenu de l'ISA un permis d'exploration des encroûtements hydrogénétiques. Ces permis sont tous les deux situés dans l'océan Pacifique occidental :

- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (**COMRA**) (Chine)
- Deep Ocean Resources Development Co. Ltd (**DORD**) (Japon)

La demande du Brésil sur la ride du Rio Grande, dans l'Atlantique, est en cours d'évaluation.

3.5.1.3. *Sulfures*

Quatre organisations ont à ce jour obtenu de l'ISA un permis d'exploration des sulfures polymétalliques. Ce sont :

- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (**COMRA**) (Chine) pour un permis situé sur la dorsale ouest-indienne, au sud-ouest de l'océan Indien
- le **Gouvernement de la Fédération de Russie**, pour un permis situé sur la dorsale médio-atlantique entre 10 et 20°N
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (**KIOST**, ex KORDI) (Corée du Sud) pour un permis situé sur la dorsale centrale indienne, au centre de l'océan Indien
- l'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer (**IFREMER**) (France) pour un permis situé sur la dorsale médio-atlantique, au nord de 20°N

Les demandes de permis du Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) allemand et le Geological Survey of Brazil (CPRM) brésilien, le premier sur la partie la plus méridionale de la dorsale centrale-indienne, le second sur la dorsale médio-atlantique Sud, sont à différents stades de préparation et d'évaluation.

Dans les zones économiques exclusives des Etats, plusieurs compagnies ont obtenu des droits d'exploration, voire d'exploitation, en accord avec les juridictions nationales de ces Etats. Ce sont:

- **Nautilus Minerals Inc.** (<http://www.nautilusminerals.com/s/Home.asp>; enregistrée à Toronto, Canada) voit son capital contrôlé, en 2012, par Gazmetall Holdings (21%), Anglo American (11.1%) et Teck Resources (6.8%). Elle est titulaire de nombreux permis dans les états insulaires du Pacifique Ouest, Le projet phare de Nautilus Minerals est le projet Solwara 1, en mer de Bismarck, dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle Guinée. Ce projet, qui semblait près d'aboutir à une première exploitation en 2011, a longtemps été bloqué par des difficultés juridiques opposant Nautilus Minerals et le Gouvernement de Papouasie-Nouvelle Guinée. Il semble relancé au printemps 2014.
- **Neptune Minerals Plc.** (<http://www.neptuneminerals.com/>; enregistrée dans le Nevada, aux Etats-Unis) compte, en 2012, Newmont dans son capital (5%). Elle dispose de permis en Nouvelle Zélande, au Japon, et en Papouasie-Nouvelle Guinée. Son projet-phare est situé dans les îles Kermadec, au nord de la Nouvelle Zélande.
- **Diamond Fields International** (<http://www.diamondfields.com/s/Home.asp>; enregistrée à Vancouver, Canada), connue pour avoir exploité les diamants dans les sédiments au large de la Namibie, a récemment racheté les droits de Preussag AG sur le site de l'Atlantis II Deep, en mer Rouge, et envisage d'y exploiter les boues métallifères d'origine hydrothermale.
- Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (**JOGMEC**, Japon; <https://www.jogmec.go.jp/english/>) est une compagnie japonaise qui développe un important programme de recherches minérales dans les eaux japonaises, notamment dans les arcs et bassins d'arrière-arc Izu-Ogasawara et d'Okinawa.

D'autres organisations ou consortia mènent des recherches préliminaires.

- Un consortium français constitué notamment d'**ERAMET** (<http://www.eramet.com/>), de **Technip** (<http://www.technip.com/fr>) et d'**IFREMER** (<http://wwwz.ifremer.fr/institut>), travaille depuis 2010 dans la ZEE française de Wallis et Futuna.

- La société **AuruMar** (<http://www.aurumar.co.za/>), joint-venture rassemblant les compagnies minières **AngloGold Ashanti Ltd** et **De Beers**, a recherché de l'or au large de la côte ouest de la Nouvelle Zélande, dans ce qui était le projet Seafield lancé en 2004. Les teneurs s'étant révélées décevantes, ce projet a été gelé en 2011.

3.5.2. Organisations fournissant des services technologiques aux précédentes

3.5.2.1. Exploration

Les principales compagnies de service géophysique sont susceptibles de proposer des travaux d'exploration grands fonds: levés géophysiques de surface ou par AUV, mesure de paramètres spécifiques, forages... La compagnie **Fugro** (<http://www.fugro.com/>) liste clairement les ressources minérales parmi ses (nombreux) domaines d'activité; **CGG** (<http://www.cgg.com/>) mentionne son intérêt pour tous les domaines des géosciences; d'autres compagnies majeures comme **Schlumberger** (<http://www.slb.com/>) ou **Halliburton** (<http://www.halliburton.com/en-US/default.page>) ciblent leurs activités sur le domaine pétrolier.

Les fournisseurs d'instruments permettant les travaux d'exploration mentionnés dans la partie 3.1 sont trop nombreux pour pouvoir tous être mentionnés ici. Nous ne citerons que quelques fabricants majeurs d'équipements océanographiques tels que les sondeurs multifaisceaux et autres équipements acoustiques:

- Kongsberg Maritime - **Simrad** (<http://www.simrad.com/>)
- **Atlas Hydrographic** (<http://www.atlashydro.atlas-elektronik.com/company-info/>)
- **Teledyne Reson** (<http://www.teledyne-reson.com/>)
- L3-ELAC Nautik - **SeaBeam** (<http://www.elac-nautik.de/>)
- **Triton** (<http://www.tritonimaginginc.com/site/>)

En ce qui concerne les engins sous-marins, on citera, parmi les nombreux fabricants d'AUV,

- Kongsberg Maritime - **Hydroid** (modèles Remus, Abyss, Hugin, Munin...) (<http://www.km.kongsberg.com/hydroid>)
- **Bluefin Robotics** (<http://www.bluefinrobotics.com/>)
- **International Submarine Engineering** (ISE, modèle Explorer, Theseus) (<http://www.ise.bc.ca/>)
- **Lockheed Martin** (modèles Marlin) (<http://www.lockheedmartin.com/>)
- **Marine Autonomous Systems Engineering** (Semi-Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Mission) (<http://maseinc.com/>)

Pour les ROV, http://www.rov.org/industry_manufacturers_rovs.cfm fournit une liste de fabricants d'engins légers.

La **COMEX** (<http://www.comex.fr/>) fournit des prestations en intervention sous-marine.

Enfin, les compagnies suivantes disposent d'instruments adaptés et réalisent des forages de faible profondeur dans des roches consolidées (typiquement des sulfures):

- **Benthic** (<http://www.benthic.com/>): Portable Remotely Operated Drill (PROD)
- **Gregg Marine** (<http://www.greggmarine.com/>): Seafloor Drill
- **Seafloor Geoservices Inc** (appartenant au groupe Triton) : ROVDrill 3
- **Williamson & Associates** (<http://www.wassoc.com/ocean-engineering/drills>)

3.5.2.2. Exploitation

Alors que les premiers développements technologiques relatifs à une possible exploitation des ressources minérales sous-marines étaient effectués de manière indépendante et dans la plus grande discrétion par chacun des consortia impliqués, les développements récents proposés combinent généralement les acquis des compagnies de service de l'offshore pétrolier et gazier profond au savoir-faire des constructeurs de machines-outils de l'industrie minière. En conséquence, la compagnie française **Technip** (<http://www.technip.com/fr>) semble tenir un rôle central d'intégrateur de ces différentes technologies et propose des solutions à la plupart des compagnies privées impliquées dans une possible exploitation de ressources minérales sous-marines profondes (cf. http://www.technip.com/sites/default/files/technip/publications/attachments/MiningMetals_Jan2013_Web.pdf).

Plusieurs fabricants d'éléments mécaniques se sont positionnés sur le marché des outils destinés à l'exploitation des ressources minérales profondes. La liste ci-dessous est bien entendu très loin d'être exhaustive.

- **Seatools BV** (<http://www.seatools.com/>) est une compagnie d'une quarantaine de personnes basée aux Pays-Bas qui propose des solutions d'ingénierie sous-marine dans les domaines de la mécanique, de l'hydraulique, et de l'électronique.

- **Nexans** (http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigate_10/Global_expert_in_cables_and_cabling_system.html), compagnie française spécialisée dans les câbles, a mis au point un outil sous-marin destiné à creuser des tranchées, le Spider, de manière à protéger les câbles sous-marins.

- **IHC Merwede** (<http://www.ihcmerwede.com/>) est une compagnie sud-africaine concevant des navires destinés au dragage et à l'exploitation minière ainsi que leur équipement. Elle dispose d'un centre de recherche aux Pays-Bas, le **MTI Holland BV** (<http://www.mtiholland.com/>), et a noué un partenariat avec la compagnie belge **DEME** (<http://www.deme.be/>), groupe intéressé par les aspects environnementaux du dragage, qui a conduit à la création de la joint-venture **OceanfLORE** (<http://www.oceanflore.com/>).

- **Bosch Rexroth AG** (<http://www.boschrexroth.com>) est une compagnie allemande spécialisée dans l'hydraulique, qui s'est positionné récemment sur les applications sous-marine liées à l'exploitation minière (voir http://dc-corp.resource.bosch.com/media/en/xc/company_1/press/product_information/product_information_2012/pi_september_2012/pi_060_12_pdf.pdf).

- En France, le **Cluster Maritime Français** (<http://www.cluster-maritime.fr/>) rassemble des entreprises intéressées au développement des ressources minérales profondes. Ce cluster a récemment préparé, en association avec le **Pôle Mer Bretagne** (<http://www.pole-mer-bretagne.com/>) et le **Pôle Mer Méditerranée** (<http://www.polemermediterranee.com/>) un document de synthèse précisant ses positions sur le sujet.

3.5.3. Instituts de recherche poursuivant des travaux dans le domaine des ressources minérales marines

Les instituts de recherche impliqués dans l'exploration, la connaissance et le suivi des fonds océaniques et l'exploitation des ressources minérales, sont nombreux. Nous proposons ci-après une liste non-exhaustive de ces instituts.

France

BRGM (Orléans)
 CNRS-INSU (Paris)
 CNRS-InEE (Paris)
 IFREMER (Brest)
 Institut de Physique du Globe de Paris, Géosciences marines (Paris)
 Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer (Brest)
 Université Pierre et Marie Curie: équipe "adaptation aux milieux extrêmes" (Paris)
 Université Pierre et Marie Curie: station biologique de Roscoff (Roscoff)
 Université Pierre et Marie Curie: station biologique de Banyuls (Banyuls)
 Université Paul Sabatier, Laboratoire Géosciences et environnement de Toulouse

Reste de l'Europe

Allemagne

BGR (Hannover)
 Geomar (Kiel)
 Marum (Bremen)

Belgique

Université de Liège

Norvège

University of Bergen

Portugal

Université de Lisbonne

Royaume Uni

National Oceanographic Centre (Southampton)
 University of Cardiff
 University of Durham

Suisse

ETH Zurich

Russie

Institut Vernadsky (Moscou)
 VNIIOkeangeologia (Saint Petersburg)

Reste du Monde

Etats-Unis

Lamont-Doherty Earth Observatory (Palisades)
 Scripps Institution of Oceanography (La Jolla)

University of Washington (Seattle)
Woods Hole Oceanographic Institution (Woods Hole)

Canada

University of Victoria

Australie

University of Tasmania (Hobart)

Nouvelle Zélande

GNS Science
National Institute of Water and Atmospheric Research

Japon

Japan Agency for Marine Science and Technology (Yokosuka)
Tokyo Institute of Technology (Tokyo)
University of Tokyo (Tokyo)

Chine

China Ocean Mineral Resources Research & Development Association
First Institute of Oceanography (Qingdao)
Second Institute of Oceanography (Hangzhou)

Corée du Sud

Korea Institute of Ocean Science and Technology (Ansan)
Korea Polar Research Institute (Inchon)
Seoul National University (Seoul)

Inde

National Institute of Oceanography (Goa)

3.6. Conclusion sur les points de vigilance

3.6.1. Exploration, connaissance et suivi

Les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi des grands fonds océaniques présentées sont souvent peu ou non invasives et ne nécessitent généralement pas d'étude d'impact au sens de l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). Tel est le cas, par exemple, des levés bathymétriques et géophysiques effectués par les navires, depuis la surface, ou à l'aide d'engins profonds autonomes (AUV) ou tractés (ROV), qui sont sans effet notable sur l'environnement. Le prélèvement d'échantillons d'eau, d'organismes, de sédiments ou de roches réalisé à des fins scientifiques est effectué en petite quantité et reste par conséquent peu perturbant. Seul le prélèvement de nodules par traineau, drague ou chalut épibenthique pour un échantillonnage supérieur à 10 000 m², destiné à évaluer des teneurs moyennes et donc l'intérêt économique d'une zone, est soumis à une étude d'impact au sens de l'AIFM. La mise en place de systèmes d'observation sur les zones actives des sites hydrothermaux est également peu invasive. Notons enfin que l'ensemble de ces règles est en cours de révision par l'AIFM.

Outre son intérêt majeur pour la connaissance scientifique sur les fonds océaniques et les environnements qui s'y développent, d'une part, et pour l'exploration de ressources minérales potentielles, d'autre part, l'ensemble de ces données joue un rôle essentiel dans l'évaluation des impacts d'une éventuelle exploitation de ces ressources, en fournissant un état initial nécessaire à toute étude de ce type. Ainsi, l'AIFM recommande la réalisation d'un état initial pour un ensemble de paramètres physiques, chimiques, géologiques et biologiques, s'intéressant particulièrement à la sédimentation en cours, aux sédiments déposés, et à la bioturbation. Notons que certains paramètres des environnements profonds, notamment aux dorsales océaniques rapides, sont affectés d'une variabilité naturelle importante, qui devra être contrainte par des observations répétées.

En résumé, les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi ne demandent pas de vigilance particulière, et leur mise en œuvre est requise pour obtenir un état initial des sites.

3.6.2. Exploitation

Si les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi sont bien connues et leur faible incidence sur les environnements profonds peut ainsi être vérifiée, il n'en va pas de même pour les techniques d'exploitation envisagées, qui n'en sont qu'au stade de concepts, de modèles ou au mieux de prototypes. Il est très difficile d'obtenir des industriels des paramètres précis, soit que ceux-ci relèvent du secret industriel, soit que ceux-ci restent très mal évalués.

La plupart des systèmes d'exploitation envisagés comportent des éléments communs, que nous allons tenter de mettre en évidence, avant de relever les possibles points de vigilance afférents. Ces systèmes comportent des éléments posés sur le fond, des éléments flottant dans la colonne d'eau, et un navire commandant l'ensemble depuis la surface. On distingue généralement

- une unité d'extraction du minerai, installé sur le fond. Celle-ci ramasse ou aspire les nodules, arrache ou concasse les sulfures, racle les encroûtements. Dans tous les cas, ce système exerce une action mécanique sur le fond pour libérer la ressource minérale recherchée. Il concentre éventuellement cette ressource en filtrant les sédiments pour ne conserver que les nodules, en

réduisant la taille des blocs de sulfure par broyage... pour acheminer cette ressource jusqu'à la base du système de remontée.

- une unité de remontée du minerai. Celui-ci transporte la ressource minérale depuis le fond jusqu'au navire. Il peut s'agir de bennes, comme dans les systèmes imaginés dans les années 70 et 80 pour la remontée des nodules polymétalliques, ou de tuyaux appareillés de pompes de manière à induire un flux d'eau ou d'air transportant les éléments de minerai, comme dans les systèmes proposés de nos jours.
- une unité de prétraitement du minerai, à bord du navire. Celui-ci vise d'abord à séparer la fraction solide du minerai de l'eau de mer, puis éventuellement à compacter le premier et à le stocker temporairement. Le minerai sera transféré sur des barges ou autres navires permettant de l'amener à terre pour traitement. L'eau sera rejetée à la mer, à plus ou moins grande profondeur et dans certains cas à proximité du point de prélèvement.

Les points de vigilance soulevés par de tels systèmes sont les suivants (Figure 3-43):

Sur le fond,

- la destruction du milieu (habitat et faunes associées) provoquées par l'extraction dans la zone exploitée;
- la mise en suspension de sédiments et de particules métalliques et l'effet de leur redéposition (par exemple étouffement des organismes fixés);
- les vibrations induites par l'extraction;
- la lumière.

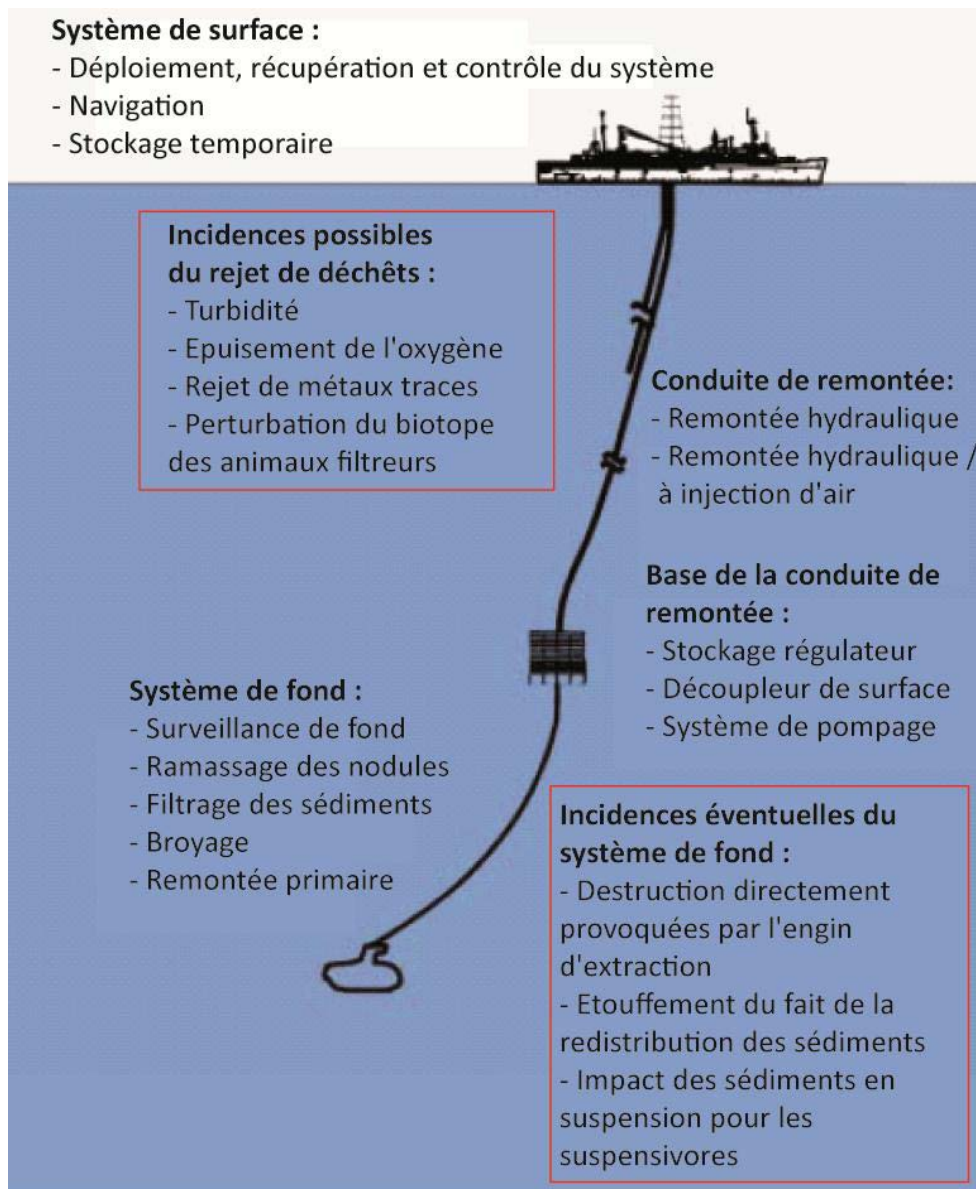
Au lieu de rejet en mer de l'eau remontée avec le minerai, **en surface ou à proximité du site d'extraction** suivant les cas.

- le transfert de masses d'eau de caractéristiques physico-chimiques différentes;
- le rejet de particules fines après filtration, plus dangereuses pour les espèces que les grosses particules.

En surface

- la dispersion de minerai, en éléments de toutes tailles, depuis le navire
- le bruit causé par les moteurs, pompes, et autres systèmes

A ces points de vigilance en conduite d'opérations normale s'ajoute le cas d'une dispersion accidentelle de minerai lors de transferts sur le navire ou d'éventuelles ruptures ou fuites de l'unité de remontée, qui pourrait affecter toute la colonne d'eau.



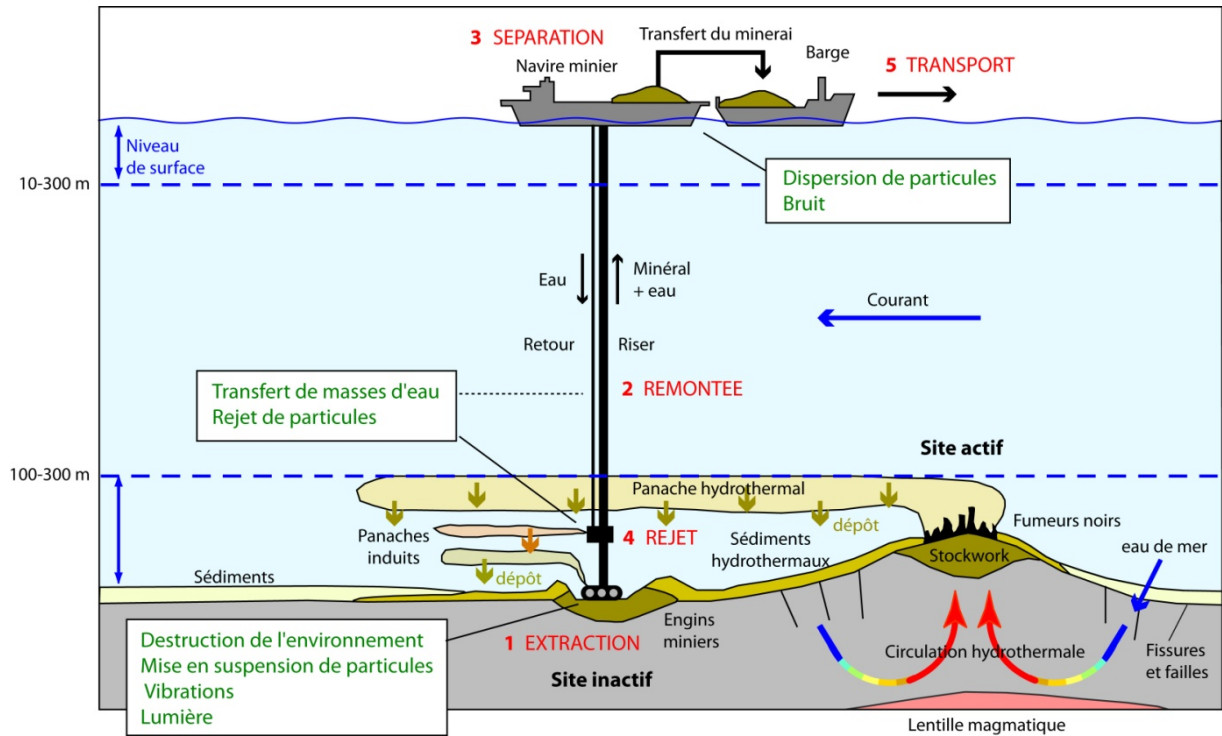


Figure 3-43 Points de vigilance relevés sur un système idéalisé d'exploitation des nodules polymétalliques (haut; source: AIFM) et des sulfures hydrothermaux (bas; adapté de Collins et al, 2013).

En résumé, les techniques d'exploitation doivent faire l'objet de nombreux points de vigilance, d'autant que leurs caractéristiques restent encore mal définies ou confidentielles.

Acronymes

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler (courantomètre acoustique profileur)
AFERNOD	Association Française pour l'Étude et la Recherche des NODules
AIFM	Autorité Internationale des Fonds Marins (équivalent à ISA et ISBA)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Bureau de recherches géologiques et minérales allemand)
BOB	Bubble Observatory module
BOREL	BOuée RELais
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C.-B.	Colombie Britannique
CA	California
CA	Coordinated Action
CCGS	Canadian Coast Guard Ship
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CLB	Continuous Line Bucket
CMF	Cluster Maritime Français
CNEXO	Centre National pour l'EXploitation des Océans
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COMRA	China Ocean Mineral Resources Research and Development Association
COSTOF	Communication and Storage Front-end
CPRM	Bureau de recherches géologiques et minérales brésilien
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Organisation fédérale australienne pour la recherche scientifique et industrielle)
CSSF	Canadian Scientific Submersible Facility
CSSRC	China Ship Scientific Research Center
CTD	Conductivity Temperature Depth
CTP	Cone penetration test
CW	Continuous wave
DD	Diamond Drill
DONET	Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis (observatoire marin japonais)
DORD	Deep Ocean Resources Development (Japon)
E	Encroûtements cobaltifères
E.-U.	Etats-Unis
EMSO	European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory
ERAMET	Entreprise de Recherche et d'Activités Métallurgiques
ESONET	European Seas Observatory NETWORK (réseau européen d'observatoires marins)
FM	Frequency Modulation
GEMONOD	Groupement d'intérêt public pour la mise au point des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules polymétalliques
GENAVIR	Groupement d'Intérêt Économique pour la gestion de navires de Recherche.
GEOMAR	Research Center for Marine Geosciences (Centre Helmholtz pour la recherche océanique à Kiel)
GPS	Global Positioning System
HMMV	Hakon Mosby Mud Volcano
HR	Haute Résolution
IAGA	Association Internationale de Géomagnétisme et Aéronomie

IFM	Institut für Meereskunde
IFP	Institut Français du Pétrole
Ifremer	Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
InEE	Institut Ecologie et Environnement
INSU	Institut national des sciences de l'Univers
IODP	International Ocean Drilling Program (2004-2013)
IODP	International Ocean Discovery Program (2014-)
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris
ISA	International Seabed Authority
ISE	International Submarine Engineering
ISOPE	International Society of Offshore and Polar Engineers
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
KIGAM	Bureau de Recherches Géologiques coréen)
KIOST	Korea Institute of Ocean Science and Technology
KORDI	Korea Ocean Research and Development Institute
MA	Massachusetts
MAC	Module autonome de colonisation
MACHO	Marine Cable Hosted Observatory
MARS	Monterey Accelerated Research System
MBA	Anomalie de Bouguer réduite au manteau
MEM	Moran's eigenvector maps = vecteurs propres de Moran
MMR	Module de Mesures en Route
MoMAR	Monitoring the Mid-Atlantic Ridge
MV	Motor Vessel
N	Nodules polymétalliques
NCAOR	National Centre for Antarctic and Ocean Research indien
NEPTUNE	North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments
NIO	National Institute Of Oceanography indien
NIOT	National Institute of Ocean Technology indien
NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research néo-zélandais
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration américain
NOE	Network of Excellence (Réseau d'Excellence) européen
NORMED	Chantiers navals du Nord et de la Méditerranée
NY	New York
OBS	Ocean Bottom Seismometer
OBSEA	Expandable Seafloor Observatory
OMA	Ocean Mining Associates (USA)
OMCO	Ocean Minerals Company (USA)
OMI	Ocean Management Inc (USA)
ONC	Ocean Networks Canada
OTU	Operational Taxonomy Units
PC	Piston Core
PEEK	PolyEtherEtherKetone (Polyétheréthercétone)
PLA	Préleveur Libre Autonome
PREUSSAG	Société Allemande minière et métallurgique
PROD	Portable Remotely Operated Drill
PSV	Production Support Vessel
PU	Processor Unit

PVC	polychlorure de vinyle
RADAR	RADio Detection And Ranging
RALS	Riser And Lifting System
RC	Reverse Circulation
RI	European Research Infrastructure
ROV	Remotely Operated Vehicles
S	Sulfures polymétalliques
SAR	Specific Absorption Rate
SIG	Système d'Information Géographique
SLN	Société Le Nickel
SONAR	sound navigation and ranging
SPTs	Seafloor Production Tools
SSLP	Subsea Slurry Lift Pump
TAAF	Terres Australes et Antarctiques Françaises
TAG	Trans-Atlantic Geotraverse
THR	Très Haute Résolution
UMI	Underwater Mining Institute
UNOLS	University-National Oceanographic Laboratory System
USA	United States
UVic	University of Victoria
VENUS	Victoria Experimental Network Under the Sea
WA	Washington
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution
XRD	<i>X-ray diffraction</i> (diffraction des rayons X)
XRF	X-ray fluorescence (spectrométrie de fluorescence X)
ZEE	Zone Economique Exclusive

Bibliographie

- Aguzzi, J., A. Manuel, F. Condal, J. Guillen, M. Nogueras, J. del Rio, C. Costa, P. Menesatti, P. Puig, F. Sarda, D. Toma and A. Palanques (2011). "The New Seafloor Observatory (OBSEA) for Remote and Long-Term Coastal Ecosystem Monitoring." *Sensors* 11(6): 5850-5872.
- Aguzzi, J., C. Costa, K. Robert, M. Matabos, F. Antonucci, S. K. Juniper and P. Menesatti (2011). "Automated Image Analysis for the Detection of Benthic Crustaceans and Bacterial Mat Coverage Using the VENUS Undersea Cabled Network." *Sensors* 11(11): 10534-10556.
- Aguzzi, J., J. B. Company, C. Costa, M. Matabos, E. Azzurro, A. M ànuel, P. Menesatti, F. Sardà, M. Canals and E. Delory (2012). "Challenges to the assessment of benthic populations and biodiversity as a result of rhythmic behaviour: Video solutions from cabled observatories." *Oceanography and Marine Biology-An Annual Review* 50: 235.
- Angeler, D. G., O. Viedma and J. M. Moreno (2009). "Statistical performance and information content of time lag analysis and redundancy analysis in time series modeling." *Ecology* 90(11): 3245-3257.
- Aron, M., J. Sarrazin, P. Sarradin and G. Mercier (2010). "Elaboration of a video processing platform to analyze the temporal dynamics of hydrothermal ecosystems." AGU Fall Meeting Abstracts.
- Auffret, G., A. Khripounoff and A. Vangriesheim (1994). "Rapid post-bloom resuspension in the northeastern Atlantic." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 41(5-6): 925-939.
- Barnes, C. R., Best, M.M. R., Johnson, F.R., Phibbs, P, and Pirenne, B. (2008). "Building the world's first regional cabled observatory: NEPTUNE Canada." *Journal of Ocean Technology* 3: 13-18.
- Barreyre, T., J. Escartin, R. Garcia, M. Cannat, E. Mittelstaedt and R. P rados (2012). "Structure, temporal evolution, and heat flux estimates from the Lucky Strike deep-sea hydrothermal field derived from seafloor image mosaics." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 13.
- Barriga, F. J. A. S., R. A. Binns, D. J. Miller and S. Roberts (2007). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Vol. 193. Anatomy of an active felsic-hosted hydrothermal system, Eastern Manus Basin. Covering Leg 193 of the cruises of the drilling vessel "Joides Resolution", Apra Harbor, Guam, to Townsville, Australia, Sites 1188-1191, 7 November 2000 - 3 January 2001, Texas A & M University Ocean Drilling Program.*
- Bastien-Thiry, H. E. A. (1977). "Technologies récentes dans le domaine du ramassage des nodules polymétalliques." *AFERNOD*: 1-20.
- Bates, A. E., V. Tunnicliffe and R. W. Lee (2005). "Role of thermal conditions in habitat selection by hydrothermal vent gastropods." *Marine Ecology Progress Series* 305: 1-15.
- Benthic. (2013). "Benthic PROD." Retrieved 24/06/2013, from <http://www.benthic.com/index.php/services/geotechnical-site-investigation/prod>
- Bergquist, D. C., I. A. Urcuyo and C. R. Fisher (2002). "Establishment and persistence of seep vestimentiferan aggregations on the upper Louisiana slope of the Gulf of Mexico." *Marine Ecology Progress Series* 241: 89-98.

- BGS. (2013). "RD2 BGS 15 m rockdrill | Marine operations and engineering | Science facilities | Our services | British Geological Survey." Retrieved 18/07/2013, from http://www.bgs.ac.uk/scienceFacilities/marine_operations/15m_rockdrill.html
- Binns, R. A., F. J. A. S. Barriga, D. J. Miller and A. others (2002). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Vol. 193. Initial Reports. Anatomy of a n Active Felsic-hosted Hydrothermal System, Eastern Manus Basin, Ocean Drilling Program.
- Blackburn, J., S. Hanrahan, P. Jankowski, E. Heymann, P. Chwastiak, A. See, P. Munro, I. Lipton. (2010). "NAT005 Solwara 1 Offshore Production System Definition and Cost Study." Nautilus Minerals: 1-275.
- Blandin, J. and J. F. Rolin (2005). "An array of sensors for the seabed monitoring of geohazards - A versatile solution for the long-term real-time monitoring of distributed seabed parameters." *Sea Technology* 46(12): 33-+.
- C.L.B. (1976). Two ship C.L.B. Test Program. C.L.B. Syndicate Project Group, Rapport final, 6 volumes, Juillet 1975-Septembre 1976.
- Cannat, M., P. Sarradin, J. Blandin, J. Escartin, A. Colaco, M.-D. S. Party, A. Michael, A. Virginie, B. Christian and B. Valérie (2011). MoMar-Demo at Lucky Strike. A near-real time multidisciplinary observatory of hydrothermal processes and ecosystems at the Mid-Atlantic Ridge. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Chase, R. (1985). "Hydrothermal vents on an axis seamount of the Juan de Fuca ridge."
- Chevaldonne, P. and D. Jollivet (1993). "Videoscopic study of deep-sea hydrothermal vent alvinellid polychaete populations - biomass estimation and behavior." *Marine Ecology Progress Series* 95(3): 251-262.
- Chung, J. S. (1996). "Deep-ocean mining: Technologies for manganese nodules and crusts." *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 6(4).
- Colaco, A., D. Desbruyeres, T. Comtet and A. M. Alayse (1998). "Ecology of the Menez Gwen hydrothermal vent field (Mid-Atlantic Ridge Azores Triple Junction)." *Cahiers De Biologie Marine* 39(3-4): 237-240.
- Colaco, A., J. Blandin, M. Cannat, T. Carval, V. Chavagnac, D. Connelly, M. Fabian, S. Ghiron, J. Goslin, J. M. Miranda, G. Reverdin, J. Sarrazin, C. Waldmann and P. M. Sarradin (2011). "MoMAR-D: a technological challenge to monitor the dynamics of the Lucky Strike vent ecosystem." *Ices Journal of Marine Science* 68(2): 416-424.
- Contreira-Pereira, L., M. Yücel, D. Omanovic, J.-P. Brulport and N. Le Bris (2013). "Compact autonomous voltammetric sensor for sulfide monitoring in deep sea vent habitats." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 80: 47-57.
- Copley, J. T. P., H. C. Flint, T. J. Ferrero and C. L. Van Dover (2007). "Diversity of meiofauna and free-living nematodes in hydrothermal vent mussel beds on the northern and southern East Pacific Rise." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87(5): 1141-1152.
- Copley, J. T. P., P. A. Tyler, B. J. Murton and C. L. VanDover (1997). "Spatial and interannual variation in the faunal distribution at Broken Spur vent field (29 ° N, Mid-Atlantic Ridge)." *Marine Biology* 129(4): 723-733.
- Copley, J., P. Jorgensen and R. Sohn (2007). "Assessment of decadal-scale ecological change at a deep Mid-Atlantic hydrothermal vent and reproductive time-series in the shrimp *Rimicaris exoculata*." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87(04): 859-867.

- Crassous, P., A. Khripounoff, J. La Rosa and J.-C. Miquel. (1991). Remises en suspension sédimentaires observées en Méditerranée par 2000 m de profondeur à l'aide de pièges à particules. Paris, FRANCE, Elsevier.
- Cui, W., F. Liu, Z. Hu, M. Zhu, W. Guo and C. G. Liu (2013). "On 7,000 m Sea Trials of the Manned Submersible Jiaolong." *Marine Technology Society Journal* 47(1): 67-82.
- Cuvelier, D., F. De Busserolles, R. Lavaud, E. Floc'h, M.-C. Fabri, P.-M. Sarradin and J. Sarrazin (2012). "Biological data extraction from imagery-how far can we go? A case study from the Mid-Atlantic Ridge." *Marine environmental research*.
- Cuvelier, D., J. Sarrazin, A. Colaco, J. Copley, D. Desbruyères, A. G. Glover, P. Tyler and R. S. Santos (2009). "Distribution and spatial variation of hydrothermal faunal assemblages at Lucky Strike (Mid-Atlantic Ridge) revealed by high-resolution video image analysis." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 56(11): 2026-2040.
- Cuvelier, D., J. Sarrazin, A. Colaco, J. T. Copley, A. G. Glover, P. A. Tyler, R. S. Santos and D. Desbruyères (2011). "Community dynamics over 14 years at the Eiffel Tower hydrothermal edifice on the Mid-Atlantic Ridge." *Limnology and Oceanography* 56(5): 1624-1640.
- Davis, E. E., Mottl, M.J., Fisher, A.T., et al, (1992). "Leg 139." *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports* 139.
- de Beer, D., E. Sauter, H. Niemann, N. Kaul, J. P. Foucher, U. Witte, M. Schluter and A. Boetius (2006). "In situ fluxes and zonation of microbial activity in surface sediments of the Hakon Mosby Mud Volcano." *Limnology and Oceanography* 51(3): 1315-1331.
- Desbruyères, D. (1998). "Temporal variations in the vent communities on the East Pacific Rise and Galápagos Spreading Centre: a review of present knowledge." *Cahiers de biologie marine* 39(3-4).
- Desbruyères, D., M. Biscoito, J.-C. Caprais, A. Colaço, T. Comtet, P. Crassous, Y. Fouquet, A. Khripounoff, N. Le Bris and K. Olu (2001). "Variations in deep-sea hydrothermal vent communities on the Mid-Atlantic Ridge near the Azores plateau." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(5): 1325-1346.
- Di Meo-Savoie, C. A., G. W. Luther and S. C. Cary (2004). "Physicochemical characterization of the microhabitat of the epibionts associated with *Alvinella pompejana*, a hydrothermal vent annelid." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 68(9): 2055-2066.
- Dyment, J., K. Tamaki, H. Horen, Y. Fouquet, K. Nakase, M. Yamamoto, M. Ravilly and M. Kitazawa (2005). A positive magnetic anomaly at Rainbow hydrothermal site in ultramafic environment. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Eca Robotics. <http://www.eca-robotics.com/robotique-securite-rov.htm>, consulté le 16 décembre 2016
- Escartin, J., R. Garcia, O. Delaunoy, J. Ferrer, N. Gracias, A. Elibol, X. Cufi, L. Neumann, D. J. Fornari, S. E. Humphris and J. Renard (2008). "Globally aligned photomosaic of the Lucky Strike hydrothermal vent field (Mid-Atlantic Ridge, 37 ° 18.50 ' N): Release of georeferenced data, mosaic construction, and viewing software." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 9.
- Fabri, M.-C., A. Bargain, P. Briand, A. Gebruk, Y. Fouquet, M. Morineaux and D. Desbruyères (2011). "The hydrothermal vent community of a new deep-sea field, Ashadze-1, 12 58'N on the Mid-Atlantic Ridge." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 91(1): 1-13.

Fabri, M.-C., J. Galéron, M. Larour and G. Maudire (2006). "Combining the Biocean database for deep-sea benthic data with the online Ocean Biogeographic Information System." *Marine Ecology Progress Series* 316: 215-224.

FMC Technologies.
<http://www.fmctechnologies.com/en/SchillingRobotics/Technologies.aspx>, consulté le 16 décembre 2013.

Forum_Energy_Technologies (2013). "Rovdrill." Retrieved 24/06/2013, from http://www.f-e-t.com/our_products_technologies/subsea-solutions/rovdrill-overview/

Foucher, J.-P., S. Dupré, C. Scalabrin, T. Feseker, F. Harmegnies and H. Nouzé (2010). "Changes in seabed morphology, mud temperature and free gas venting at the Håkon Mosby mud volcano, offshore northern Norway, over the time period 2003–2006." *Geo-Marine Letters* 30(3-4): 157-167.

Fouquet, Y., Zierenberg, R.A., Miller, D.J., et al, (1998). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports* 169.

Gauthier, M. A. and J. H. Marvaldi (1975). The Two-Ship CLB System for Mining Polymetallic Nodules—Characteristics and Possibilities—Brief Comparison with the Hydraulic Concept. *Oceanology International* '75.

Gauthier, O., J. Sarrazin and D. Desbruyères (2010). "Measure and mis-measure of species diversity in deep-sea chemosynthetic communities." *Marine Ecology Progress Series* 402: 285-302.

Gemmell, J. B., S. Petersen, T. Monecke, M. Hannington, K. Lackschewitz, N. Augustin, H. Gibson, K. Perrin, R. Sharpe and K. Simpson (2009). "Drilling of shallow marine sulfide-sulfate mineralisation in south-eastern Tyrrhenian Sea, Italy; Seafloor sulfides, Tyrrhenian Sea, highsulfidation; hydrothermal systems, Palinuro."

Glud, R. N., F. Wenzhöfer, A. Tengberg, M. Middelboe, K. Oguri and H. Kitazato (2005). "Distribution of oxygen in surface sediments from central Sagami Bay, Japan: In situ measurements by microelectrodes and planar optodes." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52(10): 1974-1987.

Grehan, A. J. and S. K. Juniper (1996). "Clam distribution and subsurface hydrothermal processes at chowder Hill (Middle Valley), Juan de Fuca Ridge." *Marine ecology progress series*. Oldendorf 130(1): 105-115.

Grelon, D., M. Morineaux, G. Desrosiers and S. K. Juniper (2006). "Feeding and territorial behavior of *Paralvinella sulfincola*, a polychaete worm at deep-sea hydrothermal vents of the Northeast Pacific Ocean." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 329(2): 174-186.

Gundersen, J. K., B. B. Jorgensen, E. Larsen and H. W. Jannasch (1992). "Mats of giant sulfur bacteria on deep-sea sediments due to fluctuating hydrothermal flow." *Nature* 360(6403): 454-456.

Halkyard, J. (1985). Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts. OCEANS'85-Ocean Engineering and the Environment, IEEE.

Herrouin, G., J. Lenoble, C. Charles, F. Mauviel, J. Bernard and B. Taine (1989). A manganese nodule industrial venture would be profitable: summary of a 4-year study in France. Offshore Technology Conference.

- Herzig, P. M., Humphris, S.E., Miller, D.J., and Zierenberg, R.A. (Eds.) (1998). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientifics Results 158 (College Station, TX (Ocean Drilling Program)).
- Herzig, P., S. Petersen, T. Kuhn, M. Hannington, J. Gemmell and A. Skinner (2003). "Shallow drilling of seafloor hydrothermal systems: the missing link." et al, Mineral Exploration and Sustainable Development, Millpress, Rotterdam: 103-105.
- Hessler, R. R., W. M. Smithey Jr and C. H. Keller (1985). "Spatial and temporal variation of giant clams, tube worms and mussels at deep-sea hydrothermal vents." *Bulletin of the Biological Society of Washington*(6): 411-428.
- Hessler, R. R., W. M. Smithey, M. A. Boudrias, C. H. Keller, R. A. Lutz and J. J. Childress (1988). "Temporal change in megafauna at the rose garden hydrothermal vent (Galápagos Rift - Eastern Tropical Pacific)." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 35(10-11): 1681-&.
- Hong Sup, Kim Hyung-Woo, Yeu Tae-kyeong, Choi Jong-su, Yoon Suk-min, Kim Jin-ho, Lee Chang-Ho, Min Cheon-Hong, Lee Min-Uk, Sung Ki-Young and O. Jae-Won. (2013). "Pilot Mining Robot for Polymetallic Nodules." 42nd Underwater Mining Institute · 21-29 October 2013.
- Hourdez, S., J. Lamontagne, P. Peterson, R. E. Weber and C. R. Fisher (2000). "Hemoglobin from a deep-sea hydrothermal-vent copepod." *The Biological Bulletin* 199(2): 95-99.
- Humphris, S. E., P. Herzig, D. Miller, J. Alt, K. Becker, D. Brown, G. Brugmann, H. Chiba, Y. Fouquet and J. Gemmell (1995). "The internal structure of an active sea-floor massive sulfide deposit."
- Huvenne, V. A., W. Bailey, P. Shannon, J. Naeth, R. Di Primio, J. Henriot, B. Horsfield, H. De Haas, A. Wheeler and K. Olu-Le Roy (2007). "The Magellan mound province in the Porcupine Basin." *International Journal of Earth Sciences* 96(1): 85-101.
- Ito, M., M. Tsunekawa, E. Yamaguchi, K. Sekimura, K. Kashiwaya, K. Hori and N. Hiroyoshi (2008). "Estimation of degree of liberation in a coarse crushed product of cobalt-rich ferromanganese crust/nodules and its gravity separation." *International Journal of Mineral Processing* 87(3-4): 100-105.
- Jerosch, K., A. Ludtke, M. Schluter and G. T. Ioannidis (2007). "Automatic content-based analysis of georeferenced image data: Detection of Beggiatoa mats in seafloor video mosaics from the Halkon Mosby Mud Volcano." *Computers & Geosciences* 33(2): 202-218.
- Jerosch, K., M. Schluter and R. P esch (2006). "Spatial analysis of marine categorical information using indicator kriging applied to georeferenced video mosaics of the deep-sea Hakon Mosby Mud Volcano." *Ecological Informatics* 1(4): 391-406.
- Jerosch, K., M. Schlüter, J.-P. Foucher, A.-G. Allais, M. Klages and C. Edy (2007). "Spatial distribution of mud flows, chemoautotrophic communities, and biogeochemical habitats at Håkon Mosby Mud Volcano." *Marine Geology* 243(1): 1-17.
- Johnson, K. S., J. J. Childress, R. R. Hessler, C. M. Sakamotoarnold and C. L. Beehler (1988). "CHEMICAL AND BIOLOGICAL INTERACTIONS IN THE ROSE GARDEN HYDROTHERMAL VENT FIELD, GALAPAGOS SPREADING CENTER." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 35(10-11): 1723-1744.
- Jollivet, D. (1993). Distribution et évolution de la faune associée aux sources hydrothermales profondes à 13°N sur la dorsale du Pacifique oriental: le cas particulier des polychètes Alvinellidae.

- Juniper, S. K., M. Matabos, S. Mihály, R. S. Ajayamohan, F. Gervais and A. O. V. Bui (2013). "A year in Barkley Canyon: A time-series observatory study of mid-slope benthos and habitat dynamics using the NEPTUNE Canada network." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 92(0): 114-123.
- Kaufman, R., J. Latimer, D. Tolefson and S. Senni (1985). *The Design and Operation of a Pacific Ocean Deep-Ocean Mining Test Ship: R/V Deepsea Minner 2*. Offshore Technology Conference.
- Khripounoff, A., A. Vangriesheim, P. Crassous, M. Segonzac, A. Colaco, D. Desbruyères and R. Barthelemy (2001). "Particle flux in the Rainbow hydrothermal vent field (Mid-Atlantic Ridge): Dynamics, mineral and biological composition." *Journal of Marine Research* 59(4): 633-656.
- Khripounoff, A., P. Crassous, N. Lo Bue, B. Dennielou and R. S. Jacinto (2012). "Different types of sediment gravity flows detected in the Var submarine canyon (northwestern Mediterranean Sea)." *Progress in Oceanography* 106: 138-153.
- Kim, H.-W., C.-H. Lee, S. Hong, T.-K. Yeu and J.-S. Choe. (2013). "A Study on Steering Characteristics of Pilot Mining Robot(MineRo II) on Extremely Cohesive Soft Soil." 42nd Underwater Mining Institute · 21-29 October 2013.
- Knodt Steffen, Kleinen Torsten, Postnov Alexey and Ø. N. Højen (2013). "Deep Sea Mining Concept for Manganese Nodules." 42nd Underwater Mining Institute · 21-29 October 2013.
- Le Bris N., L. Contreira-Pereira, M. Yücel (2012). In situ chemical sensors for benthic marine ecosystem studies in *Sensors for Ecology*, In *Towards integrated knowledge of ecosystems*. J.-F. Le Galliard, J.-M. Guarini, F. Gaill Eds., CNRS Edition. CNRS Editions. (2012). PP185-208.
- Le Bris, N., M. Zbinden and F. Gaill (2005). "Processes controlling the physico-chemical micro-environments associated with Pompeii worms." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52(6): 1071-1083.
- Le Bris, N., P. M. Sarradin and S. Pennec (2001). "A new deep-sea probe for in situ pH measurement in the environment of hydrothermal vent biological communities." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 48(8): 1941-1951.
- Le Bris, N., P. M. Sarradin, D. Birot and A. M. Alayse-Danet (2000). "A new chemical analyzer for in situ measurement of nitrate and total sulfide over hydrothermal vent biological communities." *Marine Chemistry* 72(1): 1-15.
- Legendre, P. and L. Legendre (2012). *Numerical ecology*, Elsevier.
- Lessard-Pilon, S. A., E. L. Podowski, E. E. Cordes and C. R. Fisher (2010). "Megafauna community composition associated with *Lophelia pertusa* colonies in the Gulf of Mexico." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 57(21-23): 1882-1890.
- Lessard-Pilon, S., M. D. Porter, E. E. Cordes, I. MacDonald and C. R. Fisher (2010). "Community composition and temporal change at deep Gulf of Mexico cold seeps." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 57(21-23): 1891-1903.
- Lipton, I. (2008). "Mineral Resource Estimate Solwara 1 Project Bismarck Sea Papua New Guinea." Technical Report NI-43-101 -Prepared by Golder Associates for Nautilus Minerals Inc 227p.

- Lipton, I. (2012). Mineral Resource Estimate, Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report NI-43-101, SL01-NSG-RPT-7020-001 Rev 1 – Golder Resource Report: 240 p.
- List, B. P. Retrieved 24/06/2013, from <http://www.benthic.com/index.php/projects/projects-list>
- Liu, F., W. Cui and X. Li (2010). "China's first deep manned submersible, JIAOLONG." *Science China Earth Sciences* 53(10): 1407-1410.
- Luther, G. W., C. E. Reimers, D. B. Nuzzio and D. Lovalvo (1999). "In situ deployment of voltammetric, potentiometric. and amperometric microelectrodes from a ROV to determine dissolved O₂, Mn, Fe, S(-2), and pH in porewaters." *Environmental Science & Technology* 33(23): 4352-4356.
- Luther, G.W., G. W., B. T. Glazer, S. Ma, R. E. Trouwborst, T. S. Moore, E. Metzger, C. Kraiyya, T. J. Waite, G. Druschel and B. Sundby (2008). "Use of voltammetric solid-state (micro) electrodes for studying biogeochemical processes: Laboratory measurements to real time measurements with an *in situ* electrochemical analyzer (ISEA)." *Marine Chemistry* 108(3): 221-235.
- Luther, M. E., S. A. Gilbert, M. Tamburri and T. Alliance For Coastal (2008). "Status of sensors for physical oceanographic measurements." *Marine Technology Society Journal* 42(1): 84-92.
- Marcon, Y., H. Sahling, C. Borowski, C. dos Santos Ferreira, J. Thal and G. Bohrmann (2013). "Megafaunal distribution and assessment of total methane and sulfide consumption by mussel beds at Menez Gwen hydrothermal vent, based on geo-referenced photomosaics." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*.
- Marcus, J., V. Tunnicliffe and D. A. Butterfield (2009). " Post-eruption succession of macrofaunal communities at diffuse flow hydrothermal vents on Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, Northeast Pacific." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 56(19-20): 1586-1598.
- Marum (2013). " Marum - Sea floor drill rig (MeBo)." Retrieved 24/06/2013, from http://www.marum.de/Sea_floor_drill_rig_MeBo.html
- Masuda, Y., M. Cruickshank and J. Mero (1971). Continuous bucket-line dredging at 12,000 feet. Offshore Technology Conference.
- Matabos, M., et al, (sous presse). "Seafloor observatories." *Biological Sampling in the Deep Sea*. M. C. M Clarke. Oxford, Willey-Blackwell.
- Matabos, M., J. Aguzzi, K. Robert, C. Costa, P. Menesatti, J. B. Company and S. K. Juniper (2011). "Multi-parametric study of behavioural modulation in demersal decapods at the VENUS cabled observatory in Saanich Inlet, British Columbia, Canada." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 401(1-2): 89-96.
- Mero, J. (1965). The mineral resources of the sea, Access Online via Elsevier.
- Metaxas, A. (2004). "Spatial and temporal patterns in larval supply at hydrothermal vents in the northeast Pacific Ocean." *Limnology and Oceanography* 49(6): 1949-1956.
- Miranda, J., J. Luis, N. Lourenço and F. Santos (2005). "Identification of the magnetization low of the Lucky Strike hydrothermal vent using surface magnetic data." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 110(B4).

- Mottl, M. J., Davis, E.E., Fisher, A.T., and Slack, J.F. (Eds.) (1994). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientifics Results 139*: College Station, TX (Ocean Drilling Program). doi:10.2973/odp.proc.sr.139.1994.
- Nakamura, K., T. Toki, N. Mochizuki, M. Asada, J.-i. Ishibashi, Y. Nogi, S. Yoshikawa, J.-i. Miyazaki and K. Okino (2013). "Discovery of a new hydrothermal vent based on a n underwater, high-resolution geophysical survey." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 74: 1-10.
- Nees, H. A., T. S. Moore, K. M. Mullaugh, R. R. Holyoke, C. P. Janzen, S. Ma, E. Metzger, T. J. Waite, M. Yucel, R. A. Lutz, T. M. Shank, C. Vetriani, D. B. Nuzzio and G. W. Luther (2008). "Hydrothermal vent mussel habitat chemistry, pre- and post-eruption at 9 ° 50 ' North on the East Pacific Rise." *Journal of Shellfish Research* 27(1): 169-175.
- Oceaneering. Consulté le 16 décembre. <http://www.oceaneering.com/rovs/>
- Olu, K., S. Lance, M. Sibuet, P. Henry, A. Fiala-Médioni and A. Dinet (1997). "Cold seep communities as indicators of fluid expulsion patterns through mud volcanoes seaward of the Barbados accretionary prism." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(5): 811-841.
- Olu-Le Roy, K., R. von Cosel, S. Hourdez, S. L. Carney and D. Jollivet (2007). "Amphi-Atlantic cold-seep *Bathymodiolus* species complexes across the equatorial belt." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 54(11): 1890-1911.
- Ondréas, H., K. Olu, Y. Fouquet, J.-L. Charlou, A. Gay, B. Dennielou, J.-P. Donval, A. Fifis, T. Nadalig and P. Cochonat (2005). "ROV study of a giant pockmark on the Gabon continental margin." *Geo-Marine Letters* 25(5): 281-292.
- Ondréas, H., M. Cannat, Y. Fouquet, A. Normand, P.-M. Sarradin and J. Sarrazin (2009). "Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10(2).
- Opderbecke, J., P. Simeoni, A. G. Allais, C. Eddy and H. Bisquay (2004). High resolution swath bathymetric sea-bed mapping with the ROV Victor 6000. *Proceedings of the Fourteenth. T. Matsui, J. S. Chung, J. L. Michel and H. Allersma. Cupertino, International Society Offshore & Polar Engineers*: 394-400.
- Ozturgut, E., J. Lavelle and R. Burns (1981). "Impacts of manganese nodule mining on the environment: results from pilot-scale mining tests in the north equatorial Pacific." *Elsevier Oceanography Series* 27: 437-474.
- Petersen, J. M., F. U. Zielinski, T. Pape, R. Seifert, C. Moraru, R. Amann, S. Hourdez, P. R. Girguis, S. D. Wankel and V. Barbe (2011). "Hydrogen is an energy source for hydrothermal vent symbioses." *Nature* 476(7359): 176-180.
- Petersen, S., P. M. Herzig, T. Kuhn, L. Franz, M. D. Hannington, T. Monecke and J. B. Gemmell (2005). "Shallow drilling of seafloor hydrothermal systems using the BGS rockdrill: Conical seamount (New Ireland fore-arc) and PACMANUS (Eastern Manus Basin), Papua New Guinea." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(3): 175-193.
- Petersen, S., T. Monecke, N. Augustin, A. De Benedetti, A. Esposito, A. Gärtner, A. Gardeler, J. Gemmell, H. Gibson and G. He (2008). "Drilling submarine hydrothermal systems in the Tyrrhenian Sea, Italy." *InterRidge News* 17: 21-23.
- Plant, J. N., K. S. Johnson, S. E. Fitzwater, C. M. Sakamoto, L. J. Coletti and H. W. Jannasch (2010). "Tidally oscillating bisulfide fluxes and fluid flow rates observed with in situ

chemical sensors at a warm spring in Monterey Bay, California." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 57(12): 1585-1595.

Podowski, E. L., S. Ma, G. W. Luther III, D. Wardrop and C. R. Fisher (2010). "Biotic and abiotic factors affecting distributions of megafauna in diffuse flow on andesite and basalt along the Eastern Lau Spreading Center, Tonga." *Marine Ecology Progress Series* 418: 25-45.

Podowski, E. L., T. S. Moore, K. A. Zelnio, G. W. Luther Iii and C. R. Fisher (2009). "Distribution of diffuse flow megafauna in two sites on the Eastern Lau Spreading Center, Tonga." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56(11): 2041-2056.

Remotely Operated Vehicles Committee of the Marine Technology Society. Consulté le 16 décembre 2013. <http://www.rov.org/index.cfm>

Ritt, B., C. Pierre, O. Gauthier, F. Wenzhofer, A. Boetius and J. Sarrazin (2011). "Diversity and distribution of cold-seep fauna associated with different geological and environmental settings at mud volcanoes and pockmarks of the Nile Deep-Sea Fan." *Marine Biology* 158(6): 1187-1210.

Robert K. and Juniper S.K. (2012). "Quantifying megafaunal surface bioturbation using cameras on the NEPTUNE Canada cabled-observatory: Observational protocol development and Bayesian modeling." *Marine Ecology Progress Series*, 453:137-149.

Robert, K. and S. K. Juniper (2012). "Surface-sediment bioturbation quantified with cameras on the NEPTUNE Canada cabled observatory." *Marine Ecology Progress Series* 453: 137-149.

Rona, P. A. (1978). "Magnetic signatures of hydrothermal alteration and volcanogenic mineral deposits in oceanic crust." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 3(1): 219-225.

Ruhl, H. A., M. Andre, L. Beranzoli, M. N. Cagatay, A. Colaco, M. Cannat, J. J. Danobeitia, P. Favali, L. Geli, M. Gillooly, J. Greinert, P. O. J. Hall, R. Huber, J. Karstensen, R. S. Lampitt, K. E. Larkin, V. Lykousis, J. Mienert, J. M. Miranda, R. Person, I. G. Priede, I. Puillat, L. Thomsen and C. Waldmann (2011). "Societal need for improved understanding of climate change, anthropogenic impacts, and geo-hazard warning drive development of ocean observatories in European Seas." *Progress in Oceanography* 91(1): 1-33.

SAAB SeaEye. "SeaEye ROV Comparison Chart". Consulté le 16 décembre 2013. <http://www.rov.com/comparerovs.html>

Santos, R., A. Colaço and S. Christiansen (2003). "Planning the Management of Deep-sea hydrothermal Vent Fields MPA in the Azores triple junction (Proceedings of the workshop). Arquipélago." *Life and Marine Sciences. Supplement* 4.

Sarradin, P. M., K. O. Leroy, H. Ondreas, M. Sibuet, M. Klages, Y. Fouquet, B. Savoye, J. F. Drogou, J. L. Michel, Ieee and Ieee (2002). Evaluation of the first year of scientific use of the French ROV Victor 6000. New York, Ieee.

Sarradin, P. M., M. Waeles, S. Bernagout, C. Le Gall, J. Sarrazin and R. Riso (2009). "Speciation of dissolved copper within an active hydrothermal edifice on the Lucky Strike vent field (MAR, 37 ° N)." *Science of the Total Environment* 407(2): 869-878.

Sarradin, P.-M., D. Lannuzel, M. Waeles, P. Crassous, N. Le Bris, J. C. Caprais, Y. Fouquet, M. C. Fabri and R. Riso (2008). "Dissolved and particulate metals (Fe, Zn, Cu, Cd, Pb) in two habitats from an active hydrothermal field on the EPR at 13 N." *Science of the Total Environment* 392(1): 119-129.

- Sarrazin, J. and S. K. Juniper (1999). "Biological characteristics of a hydrothermal edifice mosaic community." *Marine Ecology Progress Series* 185: 1-19.
- Sarrazin, J., C. Levesque, S. Juniper and M. Tivey (2002). "Mosaic community dynamics on Juan de Fuca Ridge sulphide edifices: substratum, temperature and implications for trophic structure." *CBM-Cahiers de Biologie Marine* 43(3-4): 275-279.
- Sarrazin, J., S. K. Juniper, G. Massoth and P. Legendre (1999). "Physical and chemical factors influencing species distributions on hydrothermal sulfide edifices of the Juan de Fuca Ridge, northeast Pacific." *Marine Ecology Progress Series* 190: 89-112.
- Sarrazin, J., V. Robigou, S. K. Juniper and J. R. Delaney (1997). "Biological and geological dynamics over four years on a high-temperature sulfide structure at the Juan de Fuca Ridge hydrothermal observatory." *Marine Ecology Progress Series* 153: 5-24.
- Scalabrin, C., C. Marfia and J. Boucher (2009). "How much fish is hidden in the surface and bottom acoustic blind zones?" *Ices Journal of Marine Science* 66(6): 1355-1363.
- Seafloor_Geotec (2013). "Seafloor Drill." Retrieved 24/06/2013, from <http://www.seafloor.com/seafloordrill>
- Sen, A., E. L. Becker, E. L. Podowski, L. N. Wickes, S. Ma, K. M. Mullaugh, S. Hourdez, G. W. Luther III and C. R. Fisher (2013). "Distribution of mega fauna on sulfide edifices on the Eastern Lau Spreading Center and Valu Fa Ridge." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*.
- Shank, T. M., D. J. Fornari, K. L. Von Damm, M. D. Lilley, R. M. Haymon and R. A. Lutz (1998). "Temporal and spatial patterns of biological community development at nascent deep-sea hydrothermal vents (9 50' N, East Pacific Rise)." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 465-515.
- Simeoni, P., J. Sarrazin, H. Nouze, P.-M. Sarradin, H. Ondreas, C. Scalabrin and J.-M. Siquin (2007). Victor 6000: New high resolution tools for deep sea research. «Module de Mesures en Route». OCEANS 2007-Europe, Ieee.
- Stechler, B. G. and J. T. Nicholas (1972). *Deep ocean minerals and mining. Resources of the World's Oceans*. H. R. Frey, New York Instit. of Ocean Resources: 221-267.
- Szitkar, F., Dymont, J., Fouquet, Y. & Choi, Y., (2014a). "What Causes Low Magnetization at Basalt-Hosted Hydrothermal Sites? Insights from Inactive Site Krasnov (MAR 16°38'N)." *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15, DOI:10.1002/2014GC005284.
- Szitkar, F., J. Dymont, Y. Fouquet, C. Honsho, and H. Horen (2014b). "Magnetic signature of ultramafic-hosted hydrothermal sites." *Geology*, in press.
- Teixido, N., A. Albajes-Eizagirre, D. Bolbo, E. Le Hir, M. Demestre, J. Garrabou, L. Guigues, J. M. Gili, J. Piera, T. Prelot and A. Soria-Frisch (2011). "Hierarchical segmentation-based software for cover classification analyses of seabed images (Seascape)." *Marine Ecology Progress Series* 431: 45-+.
- Tengberg, A. (2006). "Use of meteorological and oceanographic harbor systems - MetOcean systems used for safety, environmental monitoring, science and recreational needs." *Sea Technology* 47(5): 37-+.
- Tivey, M. A. and H. P. Johnson (2002). "Crustal magnetization reveals subsurface structure of Juan de Fuca Ridge hydrothermal vent fields." *Geology* 30(11): 979-982.

- Tivey, M. A. and J. Dymant (2010). "The magnetic signature of hydrothermal systems in slow spreading environments." *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*: 43-66.
- Tivey, M. A., P. A. Rona and H. Schouten (1993). "Reduced crustal magnetization beneath the active sulfide mound, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge at 26 N." *Earth and planetary science letters* 115(1): 101-115.
- Tsurumi, M. and V. Tunnicliffe (2001). "Characteristics of a hydrothermal vent assemblage on a volcanically active segment of Juan de Fuca Ridge, northeast Pacific." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(3): 530-542.
- Tunnicliffe, V. (1990). "Observations on the effects of sampling on hydrothermal vent habitat and fauna of Axial Seamount, Juan de Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* 95(B8): 12961-12966.
- Tunnicliffe, V., R. W. Embley, J. F. Holden, D. A. Butterfield, G. J. Massoth and S. K. Juniper (1997). "Biological colonization of new hydrothermal vents following an eruption on Juan de Fuca Ridge." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(9): 1627-1644.
- Tyler, P., C. German and V. Tunnicliffe (2005). "Biologists do not pose a threat to deep-sea vents." *Nature* 434(7029): 18-18.
- Urcuyo, I. A., G. J. Massoth, D. Julian and C. R. Fisher (2003). "Habitat, growth and physiological ecology of a basaltic community of *Ridgeia piscesae* from the Juan de Fuca Ridge." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 50(6): 763-780.
- Vertino, A., A. Savini, A. Rosso, I. Di Geronimo, F. Mastrototaro, R. Sanfilippo, G. Gay and G. Etiope (2010). "Benthic habitat characterization and distribution from two representative sites of the deep-water SML Coral Province (Mediterranean)." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 57(5): 380-396.
- Vertut J. (1977). *Développements récents dans le domaine du ramassage des nodules - Applications à un chantier de ramassage industriel. OCEANEXPO.*
- Vine, F. J. and D. H. Matthews (1963). "Magnetic anomalies over oceanic ridges." *Nature* 199(489): 947-&.
- Von Cosel, R. and K. Olu (2008). "A new genus and new species of Vesicomysidae (Mollusca, Bivalvia) from cold seeps on the Barbados accretionary prism, with comments on other species." *Zoosystema* 30(4): 929-944.
- Vuillemin, R., D. Le Roux, P. Dorval, K. Bucas, J. Sudreau, M. Hamon, C. Le Gall and P. Sarradin (2009). "CHEMINI: A new in situ CHEMical MINIaturized analyzer." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56(8): 1391-1399.
- Wankel, S. D., L. N. Germanovich, M. D. Lilley, G. Genc, C. J. DiPerna, A. S. Bradley, E. J. Olson and P. R. Girguis (2011). "Influence of subsurface biosphere on geochemical fluxes from diffuse hydrothermal fluids." *Nature Geoscience* 4(7): 461-468.
- Welling, C. (1981). *An advanced design deep sea mining system. Offshore Technology Conference.*
- Wiendiek K. (1972). *Technical design study for vehicles to operate on the sea bed. Marine Technology.* 3: 41-48.
- Williamson_&_Associates (2013). "Drills." Retrieved 24/06/2013, from <http://www.wassoc.com/ocean-engineering/drills>

- Yasui J. (1978). Comments on the success of manganese nodule mining test. 3RD International Ocean Symposium, Tokyo.
- Yeu, T.-K., S.-M. Yoon, S. Hong, J.-H. Kim, H.-W. Kim, J.-S. Choi and C.-H. Min (2013). Operating System of KIOST Pilot Mining Robot in Inshore Test. Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Yoon, C. H., K. S. Kwon, S. K. Kwon, D. K. Lee, Y. C. Park, O. K. Kwon and W. M. Sung (2001). An experimental study on the flow characteristics of solid-liquid two-phase mixture in a flexible hose. Cupertino, International Society Offshore & Polar Engineers.
- Yucel, M., P. E. Galand, S. K. Fagervold, L. Contreira-Pereira and N. Le Bris (2013). "Sulfide production and consumption in degrading wood in the marine environment." *Chemosphere* 90(2): 403-409.
- Zhu, J., J. Lin, Y. J. Chen, C. Tao, C. R. German, D. R. Yoerger and M. A. Tivey (2010). "A reduced crustal magnetization zone near the first observed active hydrothermal vent field on the Southwest Indian Ridge." *Geophysical Research Letters* 37(18).
- Zierenberg, R. A., Fouquet, Y., Miller, D.J., and Normark, W.R. (Eds.), (2000). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 169*: College Station, TX (Ocean Drilling Program).

Chapitre 4

Biodiversité, milieux et écosystèmes

Pilote scientifique :

François Lallier
Nadine Le Bris

Contributeurs :

Sophie Arnaud-Haond
Gaëtan Burgaud
Nolwenn Callac
Marie-Anne Cambon-Bonavita
Mathilde Cannat
Richard Cosson
Coralie Coumert
Yannis Cuypers
Anne Godfroy
Stéphane Hourdez
Didier Jollivet
Cécile Konn
François Lallier
Franck Lartaud
Nadine Le Bris
Marjolaine Matabos
Lenaïck Menot
Marie Morineaux
Marie Portail
Florence Pradillon
Olivier Rouxel
Sarah Samadi
Pierre-Marie Sarradin
Jozée Sarrazin
Eric Thiébaud
Daniela Zeppilli

Table des matières du chapitre 4

Chapitre 4. Biodiversité, milieux et écosystèmes	372
4.1. Introduction	372
4.2. Analyse bibliométrique	374
4.2.1. Objectifs de l'analyse	374
4.2.2. Méthodologie de la recherche	374
4.2.3. Résultats de l'analyse bibliométrique	376
4.2.3.1. Evolution de l'effort de recherche sur les écosystèmes marins profonds potentiellement impactés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines	377
4.2.3.2. Les pays acteurs de la recherche	378
4.2.3.3. Les principales thématiques de la recherche sur les vingt-deux dernières années.	382
4.2.4. Résultats de l'analyse bibliométrique sur l'écologie des environnements liés aux ressources minérales marines.	384
4.2.4.1. Développement de la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines	385
4.2.4.2. Les pays acteurs de la recherche	387
4.2.4.3. Les principales thématiques de recherche	391
4.3. Description des écosystèmes profonds directement impactés	391
4.3.1. Nodules polymétalliques	391
4.3.1.1. Structure des peuplements	392
La mégafaune	392
La macrofaune	395
La méiofaune	397
Les communautés microbiennes	398
4.3.1.2. Fonctionnement des écosystèmes	402
4.3.1.3. Dynamique des écosystèmes	403
4.3.2. Encroûtements cobaltifères	404
4.3.2.1. Mégafaune et macrofaune	407
4.3.2.2. Méiofaune des monts sous-marins à encroûtements	409
4.3.2.3. Microbiologie des monts sous-marins à encroûtements	410
4.3.3. Sulfures hydrothermaux	411
4.3.3.1. Microbiologie des sources hydrothermales profondes	411
Structure des communautés microbiennes	412
Fonctionnement et dynamique des communautés microbiennes	415

Colonisation microbienne et interactions micro-organismes minéraux	426
4.3.3.2. Faune des sources hydrothermales profondes	432
Ride médio-atlantique	433
Océan Indien	442
Pacifique Ouest (WP)	450
Pacifique Est : EPR & NEP	460
4.3.3.3. Dynamique temporelle (MAR, NEP et EPR)	469
Variation temporelle à l'échelle des organismes ou de l'assemblage	470
Variation temporelle des communautés à l'échelle d'un site	471
Etudes temporelles liées à une éruption	471
Etudes temporelles sur des sites actifs	474
TAG	476
Lucky Strike	478
Tour Eiffel	478
4.4. Facteurs gouvernant la dynamique des écosystèmes et les relations avec d'autres écosystèmes ou compartiments de la biosphère	479
4.4.1. Habitats	479
4.4.1.1. Propriétés du milieu et relations espèces – habitats	479
Nature du substrat	479
Hétérogénéité de l'habitat	480
Propriétés chimiques des masses d'eau profondes	484
Propriétés des interfaces et cycles biogéochimiques	486
Enrichissement de l'habitat en métaux et processus de biominéralisation	488
Diversité des sources d'énergie alimentant l'écosystème	491
Disponibilité d'habitats de nature différente pour les espèces chimiosynthétiques	494
4.4.1.2. Stabilité des habitats	496
4.4.1.3. Interactions espèces-habitats	499
4.4.2. Populations et communautés	503
4.4.2.1. Connectivité des populations	503
4.4.2.2. Espèces clés	506
4.4.3. Transfert de matière et d'énergie	507
4.4.3.1. Réseaux trophiques	507
4.4.3.2. Relations avec les écosystèmes adjacents	510
Mélange vertical des masses d'eau profondes	510
Observations de la circulation océanique profonde à mésoéchelle	512

Effets de l'hydrodynamique sur les écosystèmes	514
4.4.3.3. Influences directes et indirectes sur le cycle du carbone océanique	516
Sources de carbone à l'océan	517
Influence sur le bilan océanique de fer	518
Fixation chimioautotrophe du CO ₂ en dehors des zones hydrothermales actives	519
4.5 Conclusion	521
Acronymes	523
Bibliographie	524

Liste des figures du chapitre 4

Figure 4-1	Synthèse des résultats de la bibliographie sur les vingt-deux dernières années.	377
Figure 4-2	Evolution temporelle du nombre de publications relatives aux écosystèmes potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.	378
Figure 4-3	Implication des pays représentant les principaux acteurs de la recherche sur les écosystèmes profonds potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines.	379
Figure 4-4	Nombre annuel de publications référencées pour chacun des pays investis dans la recherche sur les écosystèmes profonds associés aux ressources minérales marines.	382
Figure 4-5	Principaux domaines scientifiques des publications relatives aux écosystèmes potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes de 1990 à 2012.	383
Figure 4-6	Répartition des publications explicitement liées aux impacts potentiels de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales marines profondes, en fonction des types de ressources, de 1990 à 2012.	384
Figure 4-7	Nombre annuel de publications de la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.	385
Figure 4-8	Nombre annuel de publications sur les écosystèmes profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines en fonction du type de ressource.	387
Figure 4-9	Implication des principaux pays dans la recherche sur les écosystèmes profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.	388
Figure 4-10	Implication spécifique des pays dans la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes en fonction du type de ressources.	390
Figure 4-11	Distribution par domaine des publications parues sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines.	391
Figure 4-12	Mégafaune abyssale des zones à nodules © Ifremer, campagne Nodinaut (2004).	393
Figure 4-13	Composition taxonomique de la mégafaune abyssale associées aux zones à nodules dans le Pacifique Nord et le Pacifique Sud, d'après Bluhm (1994).	394
Figure 4-14	Composition taxonomique et densités de la macrofaune abyssale en fonction du taux de couverture en nodule (Facies 0 : pas de nodule, Facies B : couverture élevée) et le long d'un gradient longitudinale (Facies 0/B : 130°W, Zone W : 150°W) dans la zone de Clarion-Clipperton, d'après Menot (2005).	396
Figure 4-15	Meio- et macrofaune abyssale des zones à nodules. © Ifremer/BGR, campagne BIONOD (2012).	396
Figure 4-16	Photographie de microscopie électronique à transmission (Burnett and Nealson 1981).	399

Figure 4-17	Photographie de microscopie électronique à transmission à haute résolution mettant en évidence les deux morphologies de structure ressemblant à des micro-organismes, morphotypes coque (co) et bâtonnet (ro) (Wang et al, 2009).	399
Figure 4-18	Diversité microbiennes des zones à nodules.	401
Figure 4-19	Quelques espèces caractéristiques de la mégafaune des monts sous-marins.	405
Figure 4-20	Monts sous-marins pour lesquels des données faunistiques sont recensées dans la base de Seamounts Online. Figure issue de Clark et al 2010.	407
Figure 4-21	Répartition taxonomique de la mégafaune des monts sous-marins de l'archipel hawaïien, d'après les données de Clark et al, 2011.	408
Figure 4-22	Analyse des taxons associés à des sites potentiellement cobaltifères ou non, d'après les données de Clark et al, 2011.	409
Figure 4-23	Schéma illustrant le mélange entre le fluide hydrothermal réduit, riche en gaz dissous (H_2S , H_2 , CH_4) et en métaux (Fe, Mn) et l'eau de mer oxygénée qui contient des sulfates et des nitrates. © N. Callac 2013.	415
Figure 4-24	Cycle du Fer et souches (hyper)thermophiles isolées d'environnements hydrothermaux, impliqués dans ce cycle © N. Callac, 2013.	418
Figure 4-25	Principales réactions du cycle biogéochimique du soufre modifié d'après Madigan et Martinko, 2002 (Madigan & Martinko, 2007) © N. Callac, 2013.	419
Figure 4-26	Cycle de l'azote, d'après Jetten (<i>Jetten, 2008</i>) © Byrne 2008	422
Figure 4-27	Principales réactions du cycle du Carbone d'après Brock Chapitre 19 (Madigan and Martinko, 2007) © N. Byrne, 2008.	424
Figure 4-28	Comparaison statistique des communautés microbiennes du Sud de la fosse des Mariannes; illustration modifiée de Kato et al, 2010.	429
Figure 4-29	Réseau global de la diversité faunistique des sources hydrothermales établi à partir de la distance de Jaccard entre les zones (reproduit de Moalic et al, 2012; publication à consulter pour la méthode d'obtention de ce réseau).	432
Figure 4-30	Positionnement et contexte géologique des neufs champs hydrothermaux connus de la partie Nord de la dorsale médio-atlantique (Fabri et al, 2011).	433
Figure 4-31	Assemblages caractéristiques de l'édifice Tour Eiffel (Cuvelier et al, 2011).	435
Figure 4-32	Histogramme représentant le pourcentage des mesures de température pour chaque assemblage (Cuvelier et al, 2009).	439
Figure 4-33	Modèle conceptuel du réseau trophique des communautés hydrothermales de la MAR. (Colaço et al, 2002).	440
Figure 4-34	Composition isotopique en carbone et azote pour les invertébrés des cheminées hydrothermales du champ Kairei sur la dorsale Indienne Centrale (Van Dover, 2002).	448
Figure 4-35	Localisation des arcs, bassins et dépressions dans l'Ouest Pacifique (adapté de Hessler et Lonsdale, 1991 dans Desbruyères et al, 2006).	453
Figure 4-36	Rapports isotopiques de la faune des sites hydrothermaux du volcan NW Eifuku (Limen and Juniper, 2006).	459
Figure 4-37	Aperçu des principaux champs hydrothermaux où ont été effectuées les études temporelles. Tiré de la thèse de D. Cuvelier (2011).	470
Figure 4-38	Mosaïque photographique du site ATOS 10 sur le champ hydrothermal Menez Gwen (Dorsale médio-atlantique) identifiant les sorties de fluides	

	et la distribution des bivalves qui domine la mégafaune de cet habitat (Marcon et al, 2013).	481
Figure 4-39	Mosaïques verticales d'assemblages de sources hydrothermales de la Scotia Ridge créées en utilisant des captures d'images de vidéos HD (Marsh et al, 2012).	482
Figure 4-40	Foraminifères colonisant les parois des nodules (Veillette et al, 2007).	483
Figure 4-41	Crinoïdes de substrat dur dé couverts sur deux monts sous-marins Antarctique abritant des assemblages considérés comme des «fossiles vivants» (Bowden et al, 2011).	484
Figure 4-42	Concentrations annuelles moyennes d'oxygène et de nitrate dans l'océan global à 1500m de profondeur (Garcia et al, 2009; 2010).	485
Figure 4-43	Schéma des différents métabolismes microbiens suggérés par l'analyse de la diversité microbienne et les propriétés géochimiques des sédiments du mont de sulfure TAG (Müller et al, 2010).	487
Figure 4-44	Schéma de la formation de nodules polymétalliques à partir de micronodules (Wang and Müller, 2009).	489
Figure 4-45	Schéma proposant la formation d'un dépôt minéral d'origine biogénique sur la surface des micro-organismes (Wang et al, 2009).	489
Figure 4-46	Concentrations en métaux dans l'environnement de la faune hydrothermale sur trois sites de la dorsale médio-atlantique (Kadar et al, 2005).	491
Figure 4-47	Energie disponible pour différents métabolismes microbiens chimioautotrophes dans différents habitats de six champs hydrothermaux de l'arc des Mariannes (Takai et Nakamura 2011).	493
Figure 4-48	Représentation des sources d'énergie disponibles dans des différents types d'écosystèmes océaniques de grande profondeur (Bach et al, 2006).	494
Figure 4-49	Ecosystèmes 'hot-spots' sur les fonds marins de grande profondeur. Census of Marine Life 2010.	495
Figure 4-50	Sites profonds ayant fait l'objet d'un suivi temporel de l'écosystème à long terme (Glover et al, 2010).	496
Figure 4-51	Variabilité des assemblages de faune sur une cheminée hydrothermale (Sarrazin et al, 1997).	498
Figure 4-52	Estimation du mélange vertical (Kz (m^2/s)) le long de la section OVIDE (Atlantique Nord) (Kokoszka, 2012)	511
Figure 4-53	Estimation du mélange vertical ($\log_{10}(Kz(m^2/s))$) le long de la section BOUM en Méditerranée (Cuypers et al, 2012)	511
Figure 4-54	Simulation des courants de fond générés par des structures tourbillonnaires formées par un forçage atmosphérique cyclonique au large de la côte Ouest du Mexique (Adams et al, 2011).	512
Figure 4-55	Courants moyens à 1000 (a) et 1500 m (b) obtenus par interpolation des mesures acquises par des flotteurs ARGO (Cravatte et al, 2012).	513
Figure 4-56	Carte des courants zonaux dans la région de Papouasie Nouvelle Guinée (fonds inférieurs à 1000 m en grisé).	513
Figure 4-57	Schéma des structures hydrodynamiques associées aux monts sous-marins (Mullineaux and Mills, 1997).	514
Figure 4-58	Profils d'hélium à grande échelle traçant les émissions hydrothermales issues de la dorsale Pacifique, illustrant l'étendue des panaches hydrothermaux dans l'océan. (German and Von Damm, 2004)	516
Figure 4-59	Carte des anomalies en fer dans les sédiments du Pacifique (German and Von Damm, 2004).	517

Figure 4-60 Schéma des différents régimes de circulation de fluides de la croûte océanique (Edwards et al, 2005). 520

Liste des tableaux du chapitre 4

Tableau 4-1 Métabolismes microbiens connus et suspectés, associés aux sources hydrothermales océaniques. Adapté de Karl, 1995; Madigan et Martinko, 2002 et Orcutt et al, 2011.	416
Tableau 4-2 Champs hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique.	433
Tableau 4-3 Champs hydrothermaux du Pacifique Ouest.	450
Tableau 4-4 Champs hydrothermaux du Pacifique Est.	460

Chapitre 4. Biodiversité, milieux et écosystèmes profonds

4.1. Introduction

Ce chapitre a pour vocation de décrire l'état de l'art des connaissances concernant **la biodiversité, les milieux et les écosystèmes** qui seraient potentiellement impactés par une exploitation des ressources minières dans l'océan profond.

La notion de biodiversité se décline en diversité des espèces, diversité des habitats, et diversité des écosystèmes eux-mêmes, et intègre l'ensemble des interactions entre les organismes et leur milieu (voir encadré).

D'une manière générale, il faut être conscient que **les connaissances sur les caractéristiques biologiques et physico-chimiques de l'océan profond sont encore extrêmement parcellaires**. Ceci résulte de l'importance de ce biotope (plus de 60% de la surface du globe), de son exploration récente et de la difficulté à y accéder. Pour la majeure partie des fonds océaniques, seules des opérations à partir de navires de surface, par dragage, chalutage ou carottage ont été réalisées depuis 150 ans, permettant une connaissance très fragmentée de la biodiversité abyssale. Longtemps limitée à la mégafaune et à la grande macrofaune, ce n'est que depuis une cinquantaine d'années que l'on explore la biodiversité incluant la méiofaune et le compartiment microbien, mais encore rarement de façon relativement systématique. Ce n'est qu'avec la connaissance de tous ces compartiments, associée à des analyses des caractéristiques physico-chimiques de l'habitat, que l'on peut commencer à comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes profonds et les relations qu'ils entretiennent entre eux. Encore faut-il y ajouter une dimension temporelle, et donc *a minima* répéter les observations d'un même lieu dans le temps à défaut de pouvoir suivre la diversité et les propriétés du milieu en continu, pour espérer comprendre la dynamique et l'évolution de ces écosystèmes, que celles-ci soient naturelles ou perturbées par des actions anthropiques telles que l'exploitation minière envisagée dans cette expertise.

L'observation directe, par submersible ou caméra tractée, n'existe que depuis une cinquantaine d'années, et les possibilités d'échantillonnage ciblé, couplé à des analyses physico-chimiques à haute résolution spatiale et temporelle, ne sont réellement opérationnelles que depuis le début des années 1980.

Ces circonstances, liées à la difficulté d'accès du milieu abyssal, aux progrès techniques récents permettant leur exploration systématique et à l'intérêt scientifique, expliquent en grande partie le caractère très hétérogène des connaissances que nous avons aujourd'hui de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes d'intérêt dans cette étude. Elles sont très limitées en ce qui concerne les encroûtements cobaltifères, plus fournies pour les champs de nodules polymétalliques, et assez abondantes pour les sites hydrothermaux. Encore que, dans ce dernier cas, nos connaissances ne concernent quasi-exclusivement que les sites actifs et leur périphérie immédiate qui ne sont pas directement ciblés par les projets miniers. Ces derniers sont cependant directement liés aux dépôts de sulfure, du fait de leur proximité.

Les liens étroits entre les communautés d'organismes et **un environnement physico-chimique fortement hétérogène dans le temps et l'espace** apparaissent comme des facteurs déterminants de la dynamique des écosystèmes profonds concernés par l'exploitation des ressources minérales. Cette hétérogénéité est le fait de contraintes hydrodynamiques qui s'exercent de l'échelle décimétrique (panaches de sources diffuses, nodules, terriers et agrégations de faune) à l'échelle de plusieurs kilomètres (circulation autour des flancs de monts sous-marins et de dorsales, export de panaches hydrothermaux...). Reflétant ces contraintes, la colonisation des habitats est caractérisée par une **distribution très structurée des espèces dans l'espace et dans le temps**.

Les échelles temporelles caractéristiques diffèrent nettement entre sulfures minéraux, croûtes de manganèse ou nodules, tant pour la formation d'habitats spécifiques que pour la recolonisation des deux compartiments de substrats durs ou meubles qui les composent. À l'inverse, des caractères génériques comme la topographie du fond (dorsale, mont sous-marin) et son effet sur les courants marins, ou encore l'importance des métaux dans l'environnement (cycles du fer, du manganèse et leur effet sur l'environnement, en particulier sur la toxicité de certains 'métaux lourds' associés) doivent être reconnus comme des propriétés fondamentales à étudier.

Ce chapitre débute (4.2) par une **analyse bibliométrique** de la littérature sur laquelle repose l'expertise.

La partie 4.3 de ce chapitre s'attache à décrire l'état de l'art sur la **description** de la faune et du compartiment microbien associés aux environnements dans lesquels sont rencontrés les trois types de ressources que sont les nodules polymétalliques, les encroûtements cobaltifères et les sulfures hydrothermaux, ainsi que des données sur leur structuration et leur dynamique spécifiques.

La dernière partie du chapitre (4.4) est consacrée aux connaissances que nous avons des **processus** qui gouvernent le fonctionnement et la dynamique de ces écosystèmes, tant au niveau de l'habitat local que de l'évolution des populations et communautés et des interactions avec les écosystèmes adjacents.

Encadré : Biodiversité, milieux et écosystèmes: quelques définitions

Le terme biodiversité, apparu dans les années 1980, est défini précisément dans l'article 2 de la Convention sur la Diversité Biologique (Rio, 1992) comme la « variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes. »

La biodiversité, c'est donc tout d'abord la diversité biologique naturelle des organismes vivants telle qu'on l'observe autour de nous. Elle s'apprécie en considérant la diversité des espèces, de leurs habitats ou milieux, et celle des écosystèmes qui résultent de leurs interactions. Mais c'est aussi la diversité des gènes, dans l'espace et dans le temps, qui définit des populations distinctes susceptibles d'évoluer en espèces.

La richesse spécifique, ou diversité alpha, est une première approche de la biodiversité, consistant à dénombrer les espèces d'un habitat donné (aspect qualitatif), en estimant aussi leur abondance (aspect quantitatif). On parle également de diversité bêta, une mesure des différences et similitudes entre habitats, et de diversité gamma lorsque l'on considère tout un ensemble d'habitats reliés entre eux, au sein d'un écosystème par exemple.

La notion de biodiversité est en réalité beaucoup plus complexe car elle intègre les interactions qui existent entre les différents organismes précités, tout comme les interactions entre ces organismes et avec leurs milieux de vie, pour former des écosystèmes. Ainsi les interactions métaboliques en microbiologie et les réseaux trophiques entre organismes participent à la structuration écologique de ces écosystèmes, engendrant des flux de matière et d'énergie ou cycles biogéochimiques.

Ces activités biologiques peuvent à leur tour modifier le milieu, entraînant des modifications telles qu'elles induisent une dynamique temporelle de la biodiversité. Evidemment, des activités anthropiques, comme l'exploitation des ressources minières, en modifiant les habitats ou les cycles biogéochimiques, engendrent elles aussi des changements de biodiversité.

4.2. Analyse bibliométrique

4.2.1. Objectifs de l'analyse

L'analyse bibliométrique a été menée sur la littérature scientifique internationale, à partir d'articles référencés dans la base Web of Science. Cette analyse avait trois objectifs :

- donner un aperçu de l'évolution temporelle de l'effort de recherche sur les écosystèmes profonds, cibles potentielles de l'exploration et l'exploitation des ressources minérales, et préciser les principaux pays impliqués dans cette recherche et les domaines scientifiques concernés;
- identifier dans ce corpus les publications qui font précisément le lien avec les ressources minérales marines profondes intéressant cette expertise, à savoir les nodules polymétalliques, les sulfures polymétalliques et les encroûtements cobaltifères;
- établir un corpus de publications de référence permettant un inventaire des connaissances fondamentales sur la diversité et le fonctionnement des écosystèmes potentiellement concernés, en privilégiant les articles fondateurs, les synthèses et les travaux récents dans le domaine.

4.2.2. Méthodologie de la recherche

Les références prises en considération dans cette analyse sont uniquement des articles, des synthèses, des lettres publiées dans des journaux à comité de lecture et des chapitres de livres. Nous avons en effet considéré que, dans les domaines concernés, les résumés publiés dans les actes de conférences étaient généralement publiés ultérieurement dans des articles. Ce choix permet d'éviter les redondances et de limiter la base à des informations ayant fait l'objet d'une sélection par les pairs. La recherche a été construite par le croisement de trois groupes de mots clés : ceux qui concernent "les ressources", "l'environnement" et "les écosystèmes et la biodiversité".

Concernant les **ressources**, les mots clés retenus ont d'abord identifié toutes les publications se rapportant au sens large aux nodules polymétalliques, aux sulfures polymétalliques et aux encroûtements cobaltifères, en incluant les synonymes désignant ces ressources. Afin de mieux cibler l'exploration et l'exploitation des ressources, nous avons ajouté les terminologies utilisées dans les contrats d'exploration et d'autres expressions se rapportant à l'exploitation des ressources, utilisées par l'Autorité Internationale des Fonds Marins.

Les noms des métaux concernés n'ont pas été conservés car ils renvoient à de trop nombreuses publications sans rapport avec les ressources minérales (chirurgie dentaire, expérimentation animale, toxicologie, électrochimie, sciences agricoles et sciences de l'environnement, etc...). De la même manière, le terme « rare earth » n'a pas été conservé, les terres rares étant utilisées comme traceurs en géologie et identifiées comme mots-clés dans de très nombreuses publications.

Pour déterminer la liste des **environnements** concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, nous avons établi une liste de mots-clés génériques des environnements concernés, complétée par des mots-clés faisant référence aux cartes de l'AIFM et de toutes les localisations mentionnées dans les publications issues des premières interrogations de la base.

La sélection, parmi les publications obtenues, des articles relatifs à la **biodiversité et aux écosystèmes** a été réalisée sur la base d'une liste de mots-clés génériques ou ciblant plus spécifiquement certaines composantes de la biodiversité et fonctions ou propriétés qui caractérisent les écosystèmes des milieux concernés.

La liste des mots-clés retenus est la suivante :

Ressources marines minérales :

“deep-sea mining” OR “deep seabed mining “ OR “deep-sea prospecting” OR “exploration contracts“ OR “polymetallic nodule*” OR “*manganese nodule*” OR “ocean nodule*” OR “sea nodule*” OR “deep-sea nodule*” OR “micronodules” OR “ferromanganese nodule*” OR “polymetallic sulphide*” OR “massive sulphide*” OR “polymetal sulphide*” OR “polymetal sulfide*” OR “massive sulfide*” OR “polymetallic sulfide*” OR “cobalt crust*” OR “Co-rich crust*” OR “iron-manganese crust*” OR “ferromanganese crust*” OR “Co-rich ferromanganese crust*” OR “Fe-Mn crust*” OR “MN crust*” OR “Cobalt-enriched crust*” OR “cobalt-rich manganese crust” OR “cobaltiferous crust*” OR “iron oxyhydroxide crusts” OR “precious metals” OR “hydrothermal manganese deposits” OR “metalliferous deposits” OR “marine minerals” OR “mineral resource*” OR “precious metals” OR “hydrothermal manganese deposits” OR “metalliferous deposits” OR “metalliferous sediment” OR “metalliferous sediments” OR “metalliferous mud” OR “metalliferous muds” OR “metalliferous clays” OR “metalliferous clay” OR “metalliferous carbonates” OR “Fe-Mn oxydes” OR “manganese oxydes” OR “Fe oxydes” OR “red clays”

Environnements :

"abyssal plain" OR “deep-sea brine*” OR “deep-sea vent*” OR “deep-sea hydrothermal system*” OR “hydrothermal plume*” OR “hydrothermal vent*” OR “inactive vent*” OR “hydrothermal chimney*” OR “hydrothermal mound*” OR “hydrothermal field*” OR “hydrothermal fluid*” OR “hydrothermal environment*” OR “hydrothermal area*” OR “hydrothermal seep*” OR “inactive vent*” OR “seamount*” OR “hydrothermal smoker*” OR “polymetallic nodule” OR “nodule province*” OR “manganese nodule area” OR “nodule field*” OR “ocean nodule*” OR “serpentinite-hosted system” OR “serpentinized ultramafic rock” OR “brine lake*” OR “hypersaline basin*” OR “mid-ocean ridge*” OR “ridge segment” OR “submarine canyon*” OR “submarine volcano” OR “sulfide mound*” OR “Mid-Atlantic Ridge” OR “East Pacific Rise” OR “East-Pacific Rise” OR “Indian Ocean nodules” OR “Central Indian Basin” OR “Clarion-Clipperton Zone” OR “Clarion-Clipperton Province” OR “ferromanganese nodules” OR “Mn nodule exploitation in the northeast equatorial Pacific” OR “Clarion-Clipperton region of the northeastern tropical Pacific” OR “Juan de Fuca ridge” OR “Juan-de-fuca-ridge” OR “Aleutian margin” OR “Atlantis II” OR “Atlantis-II-Deep” OR “Bauer Deep” OR “Blanco Fracture Zone” OR “Guaymas Basin” OR “Kebrit Deep” OR “Izu-Ogasawara Arc” OR “Lau Basin” “Loihi-seamount” OR “Manus basin” OR

“Manus back-arc basin” OR “Nereus Deep” OR “Shaban Deep” OR “Solwara” OR “SW Pacific Bare Zone” OR “Thetys Deep”

Ecosystèmes et biodiversité :

“*ecosystem*” OR “biodiversity” OR “biological diversity” OR “species richness” OR “*community*” OR “*biological communities*” OR “*fauna*” OR “*faunal*” OR “invertebrate*” OR “metazoan” OR “eucaryot*” OR “microbial” OR “microbe*” OR “protozoan” OR “prokaryot*” OR “benthos” OR “benthic” OR “deep water corals” OR “cold water corals” OR “bacteria*” OR “bacterium” OR “fungal” OR “fungi” OR “archaea” OR “microbiolog*” OR “animal*” OR “endemism” OR “biomass” OR “eco* dynamics” OR “conservation” OR “adaptat*” OR “*colonisation*” OR “*colonization*” OR “larv* settlement” OR “settle” OR “settling” OR “biogeography” OR “biogeographic” OR “phylogeograph*” OR “life cycle” OR “dispersal” OR “distribution species” OR “larvae” OR “larval” OR “organism-environment interaction*” OR “biotic interaction*” OR “key species” OR “mineral-microbe interactions” OR “biosynthesis” OR “epibiosis” OR “*symbio*” OR “epibiotic” OR “chemosynthe*” OR “chemolithoautotroph*” OR “chemoautotroph*” OR “*thermophil*” OR “piezophil*” OR “biological assemblage*” OR “faunal assemblage*” OR “connectivity*” OR “*habitat*” OR “tubeworm*” OR “ecolog*” OR “trophic” OR “predator*” OR “prey*” OR “predation” OR “feeder*” OR “grazer*” OR “carnivore*” OR “scavenger*” OR “food supply” OR “food-supply” OR “food limitation*” OR “nutrient supply” OR “organic matter supply” OR “food availability” OR “food source*” OR “nutrition*” OR “nutrient” OR “food chain*” OR “food web*” OR “feeding behavior” OR “feeding behaviour” OR “primary produc*” OR “degradation of organic matter” OR “DISCOL” OR “environmental impact” OR “*organism*” OR “deep subsurface biosphere” OR “deep biosphere” OR “biotope*” OR “ecotype*” OR “bathymodiol*” OR “vestmentifer*” OR “riftia” OR “siboglinid*” OR “alvinell*” OR “tevnia” OR “zoarcid*” OR “calyptogena” OR “vesycomid*” OR “rimicaris” OR “bresilid*” OR “bythograeid*”

4.2.3. Résultats de l'analyse bibliométrique

Cette première requête a permis de lister 5 659 publications, tous formats confondus, et après élimination des articles visiblement « hors champ » 5 329 références. Il restait dans cette liste, des publications relatives à certains environnements continentaux, notamment d'eaux douces, et à des environnements marins peu profonds, et d'autres faisant référence à des environnements du passé en géologie, paléo-océanographie, etc. Celles-ci ont été éliminées par exclusion des journaux thématiques hors champ puis publication par publication, permettant la sélection fine de **4619 articles, synthèses ou chapitres de livres, traitant directement ou indirectement de questions qui intéressent la présente expertise, dont 201 explicitement liées aux ressources minérales, de 1990 à 2012.**

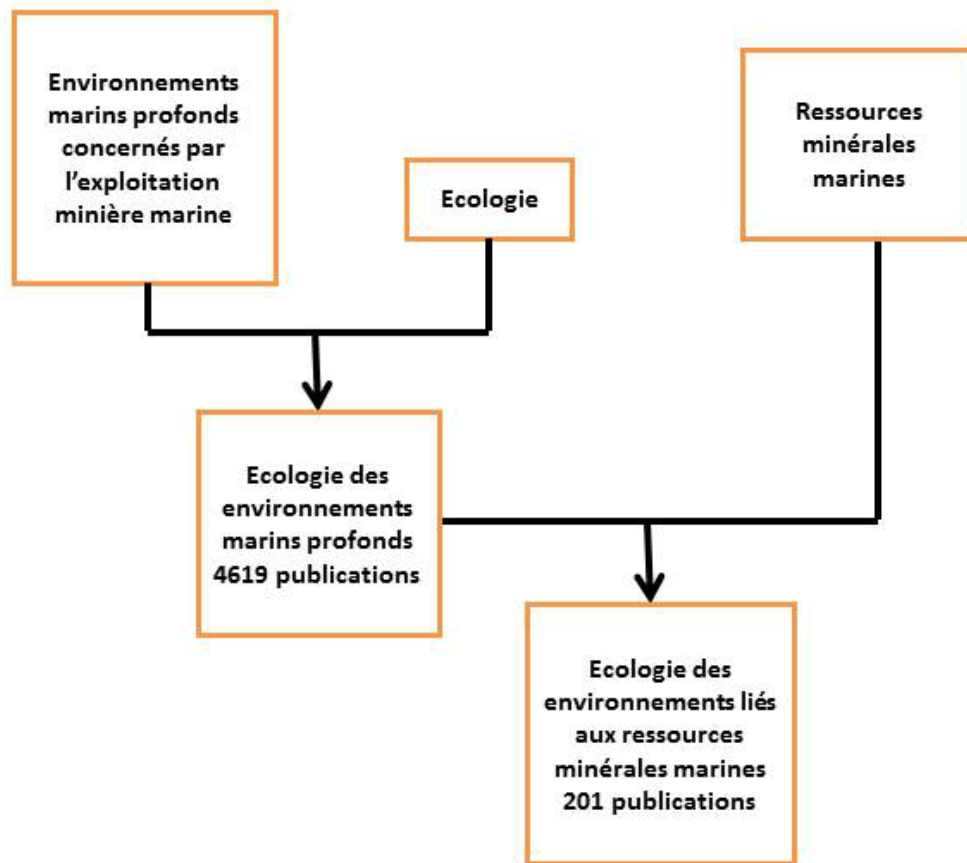


Figure 4-1 Synthèse des résultats de la bibliographie de 1990 à 2012.

4.2.3.1. *Evolution de l'effort de recherche sur les écosystèmes marins profonds potentiellement impactés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines*

Les plus anciennes publications remontent aux années 60 mais c'est sur les 22 dernières années que la recherche sur les écosystèmes marins profonds s'est principalement développée, représentant 96,3% des références listées sur le sujet.

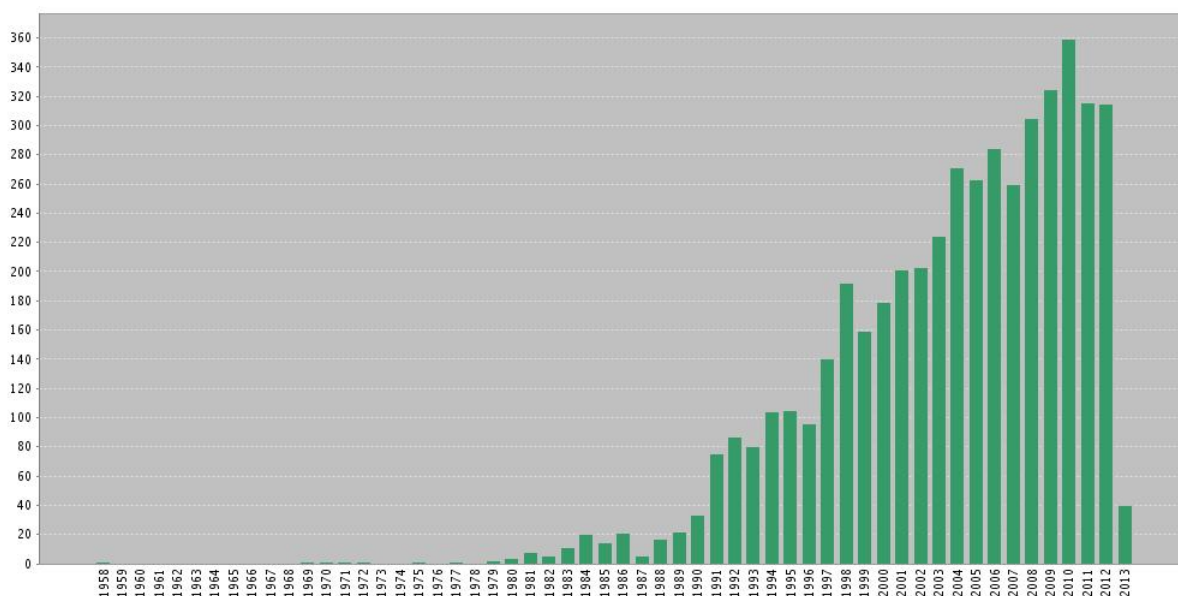


Figure 4-2 Evolution temporelle du nombre de publications relatives aux écosystèmes potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Ce graphe prend en compte toutes les publications parues jusqu'au mois de mars 2013, date à laquelle la présente analyse a été faite.

Pour une question de pertinence, nous avons choisi de limiter l'analyse aux vingt-deux dernières années, soit **de 1990 à 2012 inclus**. Cela correspond à **4 619 références**.

4.2.3.2. Les pays acteurs de la recherche

Au total, 88 pays sont impliqués dans la recherche sur les écosystèmes marins profonds potentiellement impactés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales, parmi lesquels **10 pays** représentent à eux seuls les **trois quart** de la littérature scientifique sur le sujet : les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, l'Angleterre, le Japon, le Canada, la Russie, le Portugal, l'Espagne et l'Australie.

Les Etats-Unis, les pays de l'UE et le Japon se révèlent les plus productifs. Les Etats-Unis ont produit 40,4% de la littérature scientifique sur le sujet. La France 18,64%, l'Allemagne 12,65% et l'Angleterre 10,3%. Le Japon suit avec 9%, le Canada avec 6,75%, la Russie avec presque 5,8%, le Portugal avec 4,57%, l'Espagne avec 4,2% et l'Australie avec 3,6%. La Chine se place en 12^e position dans la liste avec 2,7%, la Nouvelle-Zélande en 13^e avec 2,66%, la Norvège en 17^e avec 2%, l'Inde en 18^e avec presque 2% des articles et chapitres publiés. La Corée du Sud et le Brésil arrivent en 27^e et 28^e position avec environ 0,7% de la production scientifique considérée dans cette étude.

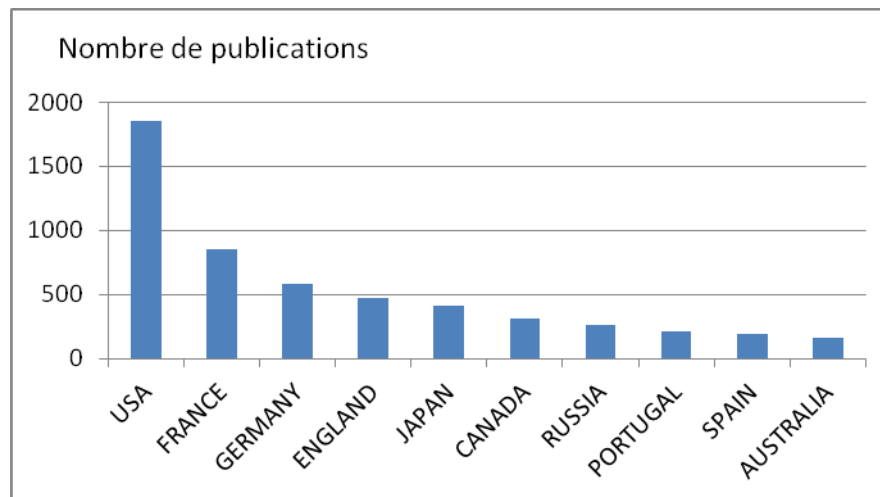


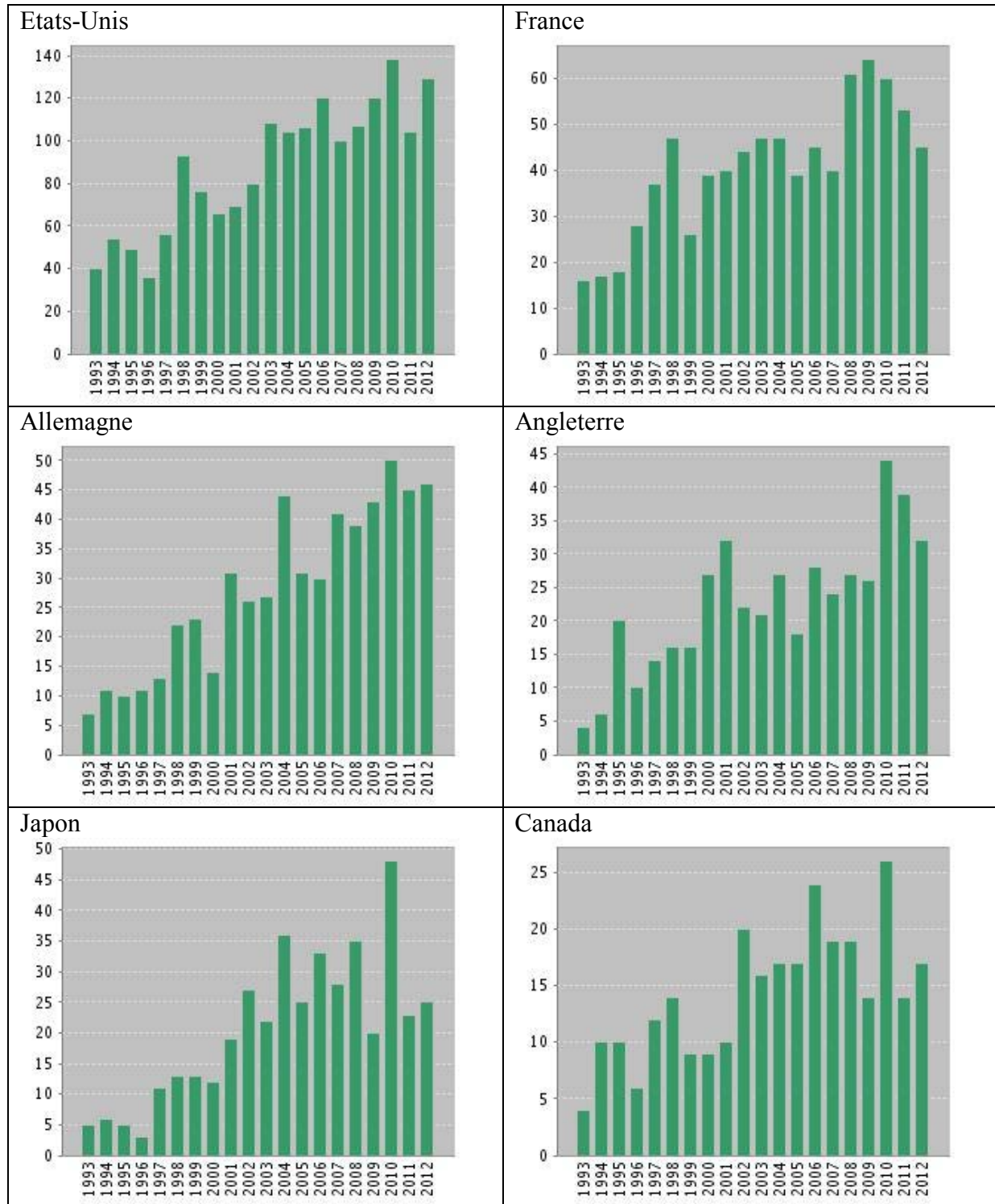
Figure 4-3 Implication des pays représentant les principaux acteurs de la recherche sur les écosystèmes profonds potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines.

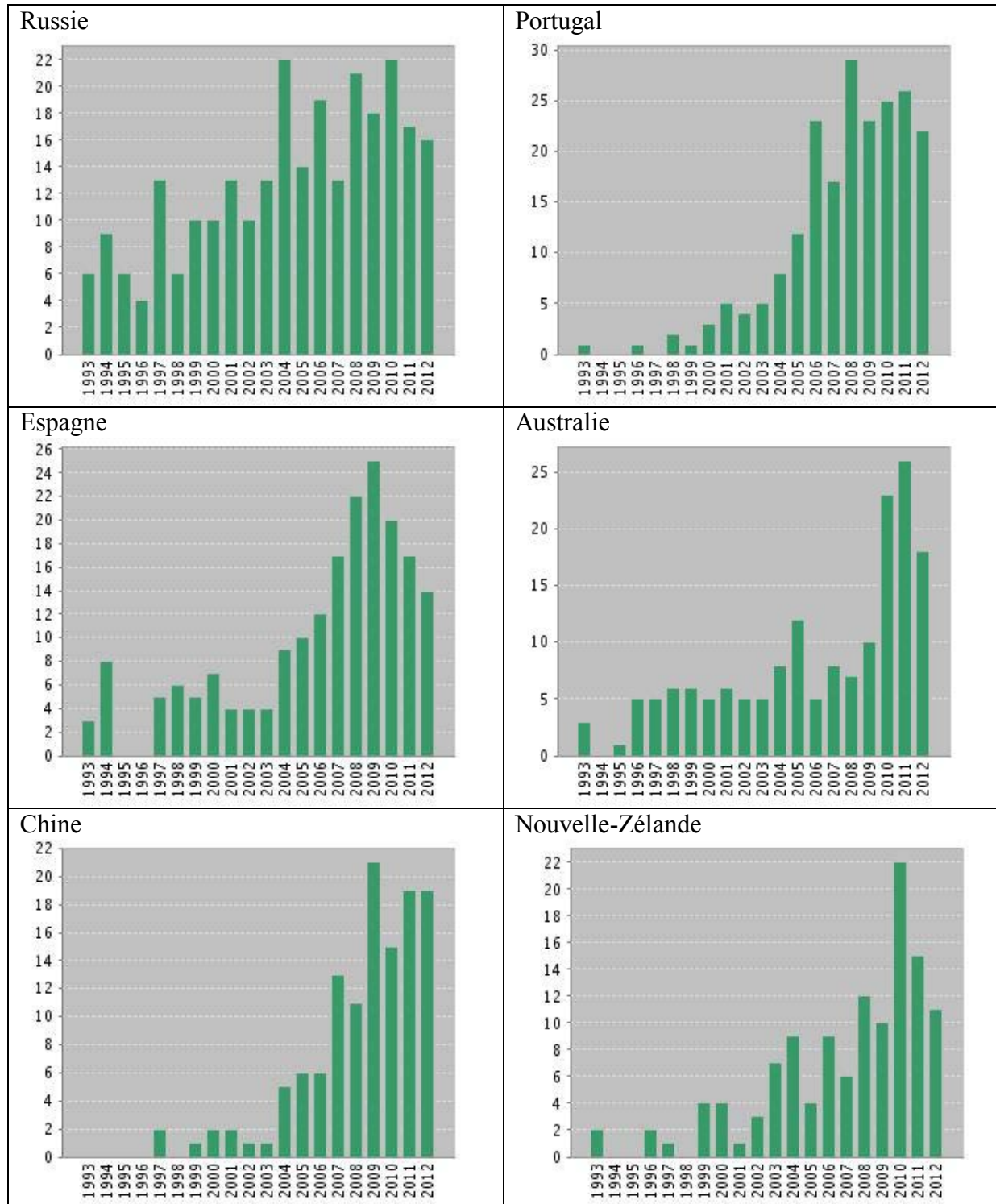
Dans les années 1990, ce sont surtout les Etats-Unis, la France, l'Allemagne et l'Angleterre, qui s'étaient investis dans ce type de recherche, et dans une moindre mesure le Canada, la Russie et l'Australie. La production américaine est très largement supérieure à celle des autres pays¹⁵, et atteint 138 publications en 2010. La France, l'Allemagne, l'Angleterre et le Japon ont des productions comparables, avec des maxima entre 45 et 60 publications. Depuis 1990, la France a une production supérieure à dix publications par an, cette production double à partir de 1996 et double encore à partir de 2000-2001. L'Allemagne suit un rythme semblable : environ 10 publications ou un peu plus à partir de 1994, puis plus de 20 à partir de 1998 et régulièrement environ 40 à 50 à partir de 2007. L'Angleterre présente le même schéma, légèrement plus tardif avec deux pics à 44 publications en 2010 et 39 publications en 2011. Le Japon à partir de 2001 a produit annuellement plus de 15 publications par an.

Le Canada produit régulièrement entre 15 et 26 publications par an depuis 2002 et la Russie entre 10 et 22 publications depuis 2002. L'Australie a surtout publié sur les trois dernières années, entre 18 et 26 publications (moins de 12 les années précédentes). La production de l'Espagne s'est développée principalement depuis 2007, avec entre 15 et 25 publications par an. Le Portugal publie également entre 17 et 29 articles depuis 2006. La Chine a publié 21 publications en 2009 et poursuivi sa production à un rythme comparable les années suivantes. La Norvège n'a publié sur les écosystèmes profonds potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines qu'à partir de 1998, généralement moins de 10 publications par an, sauf en 2008 (22 publications) et 2012 (15 publications). La Nouvelle-Zélande également, a produit moins de 10 publications par an sauf en 2010 (22 publications) et 2011 (15 publications). Enfin, la Corée du Sud et le Brésil apparaissent comme des acteurs récents du domaine, surtout depuis 2003 pour la Corée du Sud et 2007 pour le Brésil.

Le maximum de publication par an est atteint pour la plupart des pays dans les cinq dernières années (2008-2012), sauf l'Inde qui a connu une production maximale de 15 publications en 2005, alors que sa moyenne se situe aux alentours de sept publications par an sur les dix dernières années.

¹⁵Cependant, si l'on considère l'ensemble des pays de l'Union Européenne, la production est tout à fait comparable, voire supérieure, à celle des Etats-Unis.





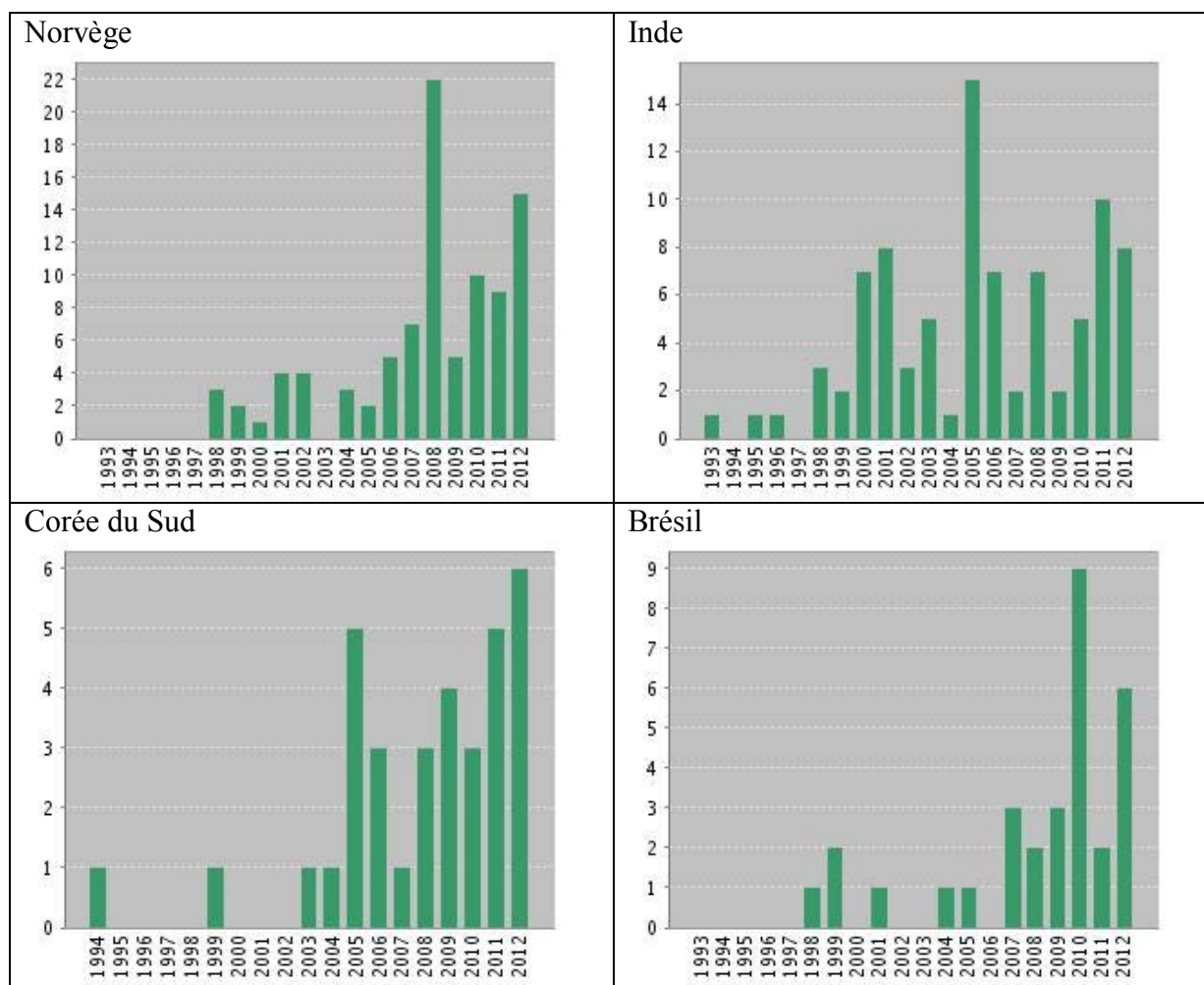


Figure 4-4 Nombre annuel de publications référencées pour chacun des pays investis dans la recherche sur les écosystèmes profonds associés aux ressources minérales marines.

4.2.3.3. Les principales thématiques de la recherche sur les vingt-deux dernières années.

Les références bibliographiques ont été classées selon les catégories d'analyse par domaine de la base Web of Science. Parmi les 56 domaines référencés, ceux qui dominent le classement sont l'océanographie (25,5% des publications), la biologie marine et d'eau douce (25,1%), la microbiologie (19,165%), l'écologie (9,8%), la microbiologie appliquée aux biotechnologies (6,6%), la zoologie (6,45%) et la biologie moléculaire et biochimie (5,2%). Un certain nombre de publications sont également classées en géochimie-géophysique (6,9%), en géosciences multidisciplinaires (7%) et en sciences multidisciplinaires (5,5%).

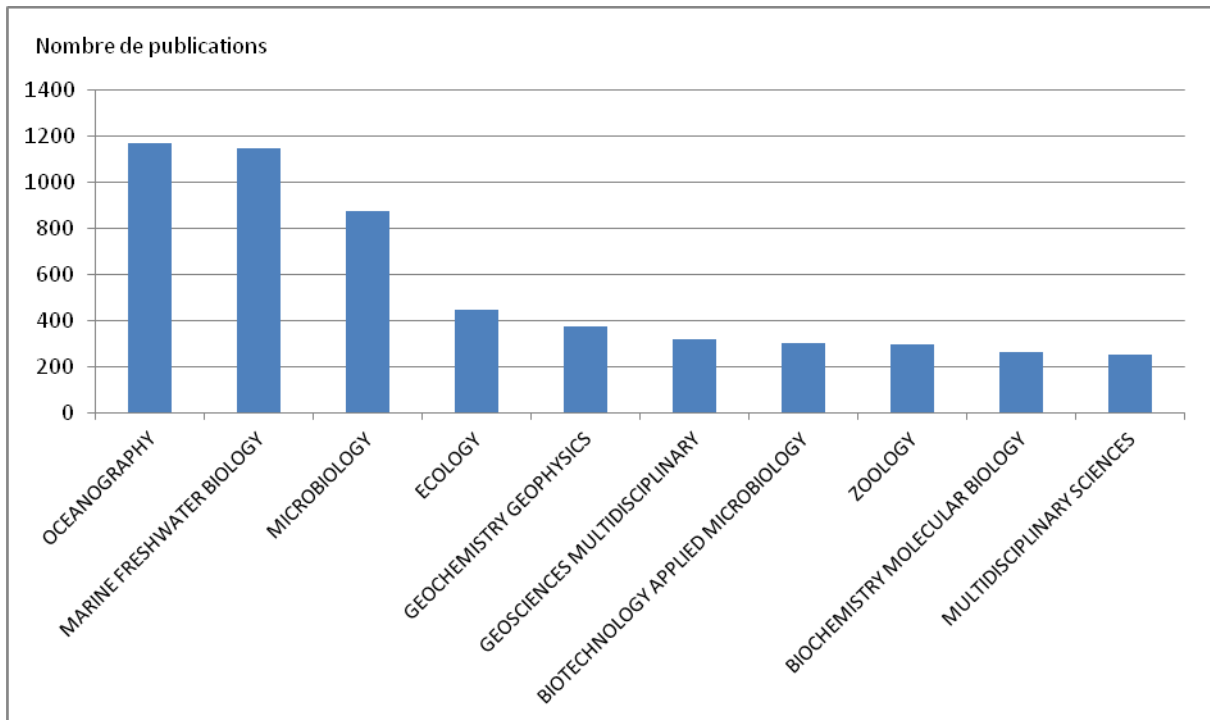


Figure 4-5 Principaux domaines scientifiques des publications relatives aux écosystèmes potentiellement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes de 1990 à 2012.

4.2.4. Résultats de l'analyse bibliométrique sur l'écologie des environnements liés aux ressources minérales marines.

Dans le cadre de l'ESCo, nous nous intéressons plus précisément au fonctionnement et aux capacités des écosystèmes à répondre aux perturbations de leur environnement. Il ressort, comme on peut le voir dans la figure 4-6 qu'à peine 4,2 % des publications semblent traiter de ces questions, en termes de mots-clés.

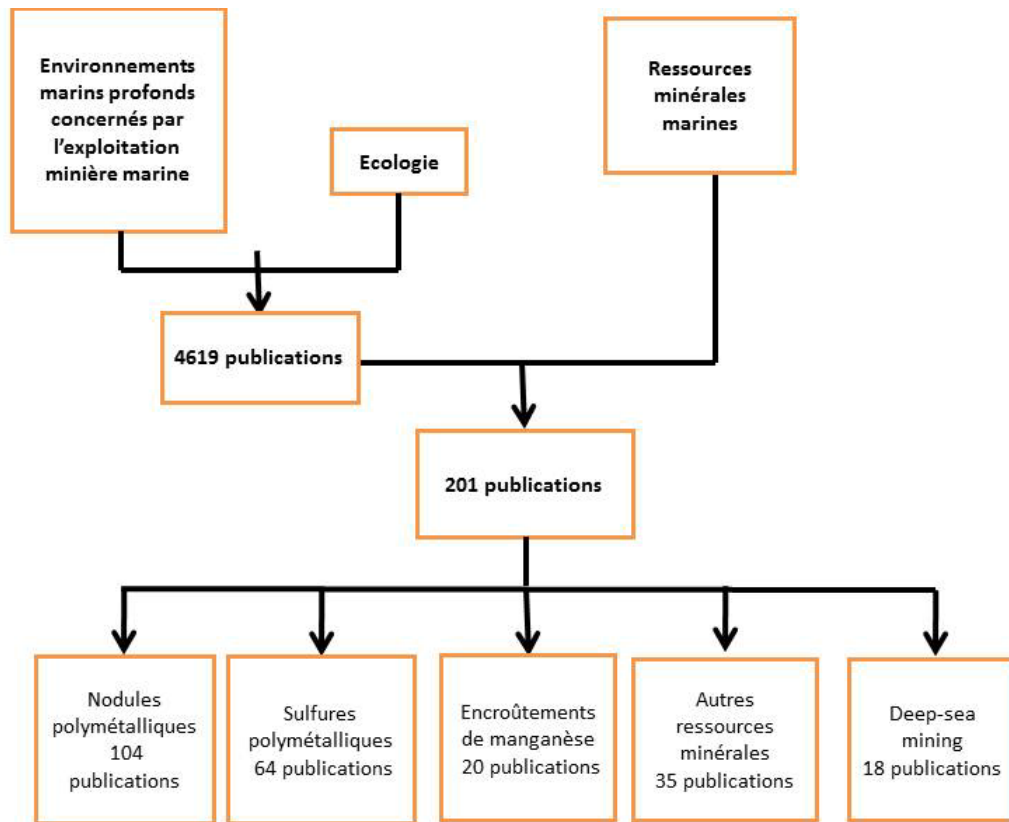


Figure 4-6 Répartition des publications explicitement liées aux impacts potentiels de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales marines profondes, en fonction des types de ressources, de 1990 à 2012.

Les nodules polymétalliques sont les plus représentés dans la base bibliométrique, avant les sulfures et les encroûtements cobaltifères. Un nombre significatif d'articles sont des "position papers" qui discutent des impacts potentiels et de la nécessité pour la communauté scientifique de se mobiliser sur cette question.

4.2.4.1. *Développement de la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines*

La proportion de publications par type d'écosystème reflète la chronologie de l'intérêt porté aux ressources minérales marines elles-mêmes. On peut noter cependant que l'intérêt porté aux écosystèmes associés est plus récent et date des années 1990, alors que l'on a commencé à s'intéresser aux nodules dès le XIX^{ème} siècle (1868), aux sulfures dès 1979 et aux encroûtements cobaltifères dès 1980, date de la plus ancienne publication identifiée dans la recherche bibliométrique à partir du Web of Science.

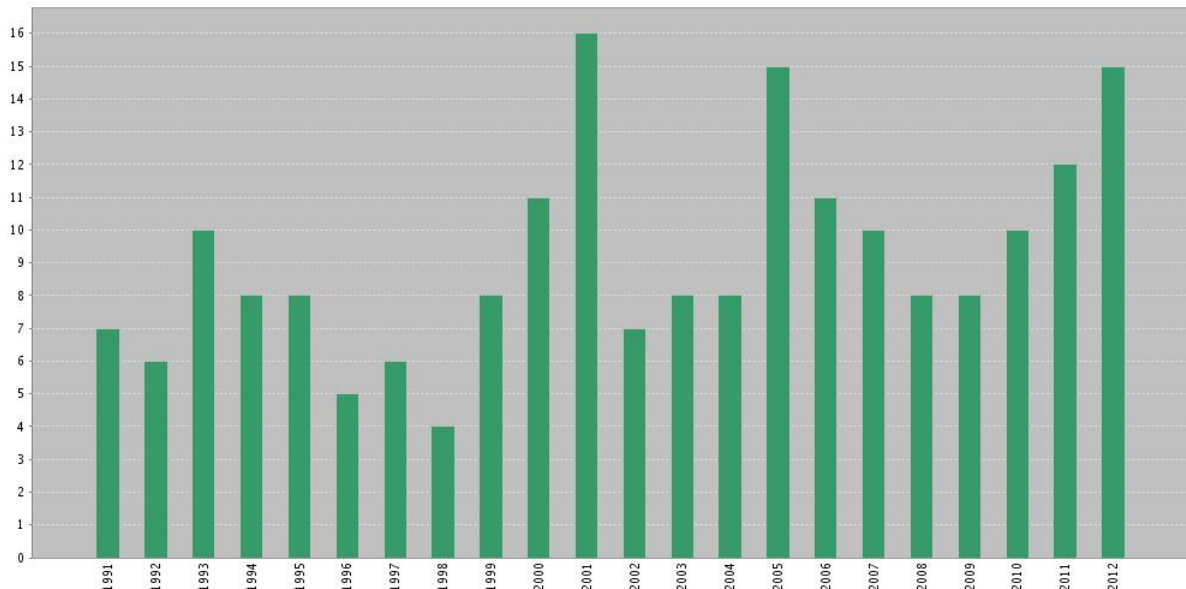
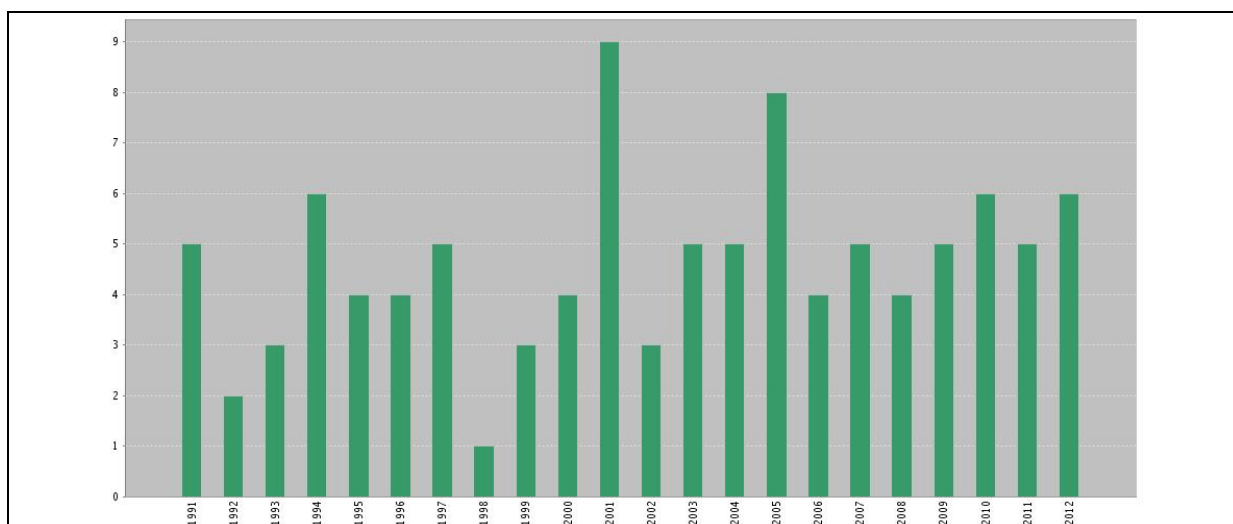
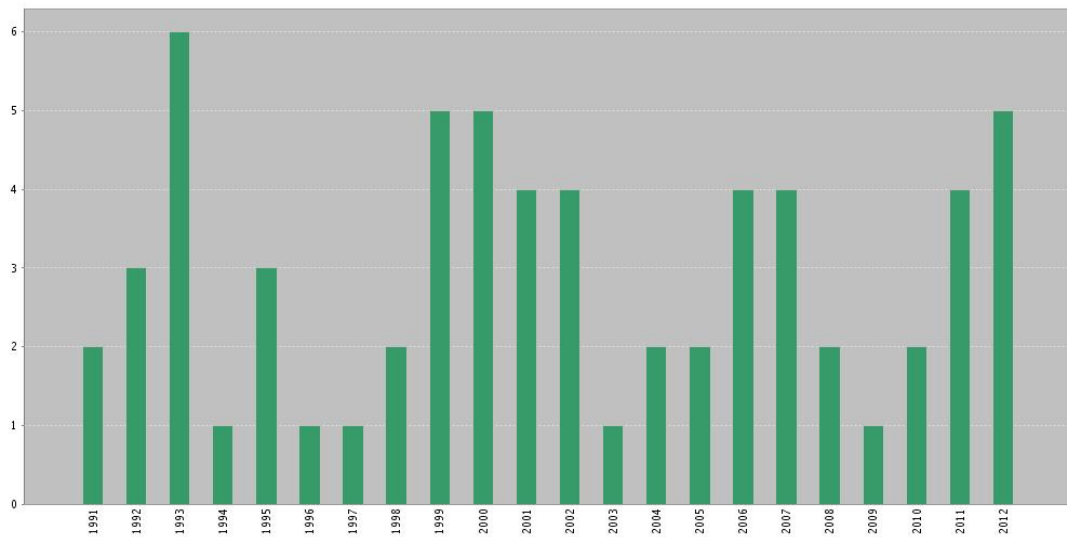


Figure 4-7 Nombre annuel de publications de la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

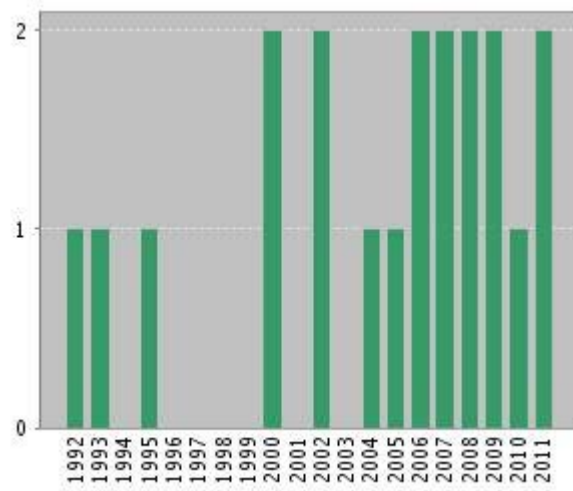
Le maximum annuel de publication en 2001 est vraisemblablement en rapport avec l'adoption par l'AIFM d'un « règlement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques » en 2000 et d'un règlement semblable pour l'exploration et l'exploitation des sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères la même année (Source : brochures de l'AIFM, <http://www.isa.org.jm/files/document>).



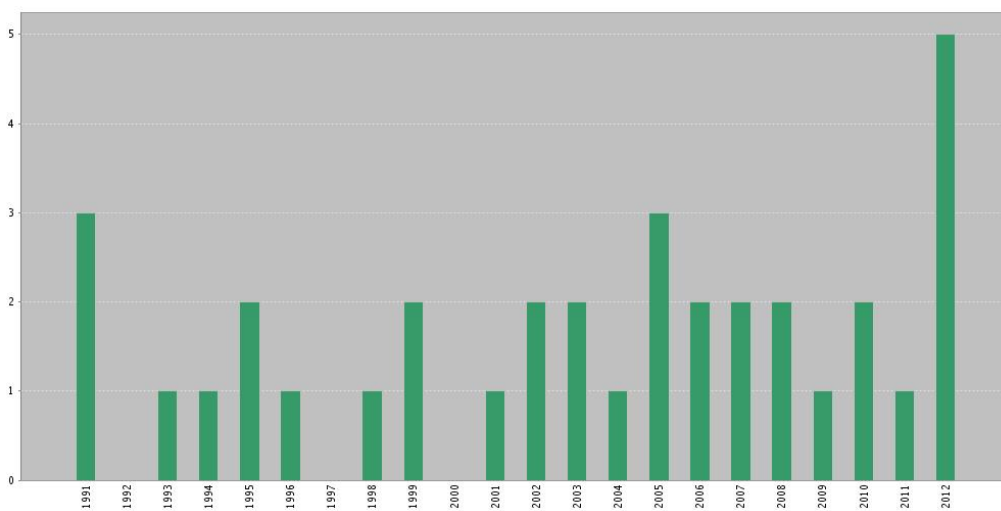
A : Nodules polymétalliques



B : Sulfures polymétalliques



C : Encroûtements cobaltifères



D : Autres ressources métallifères

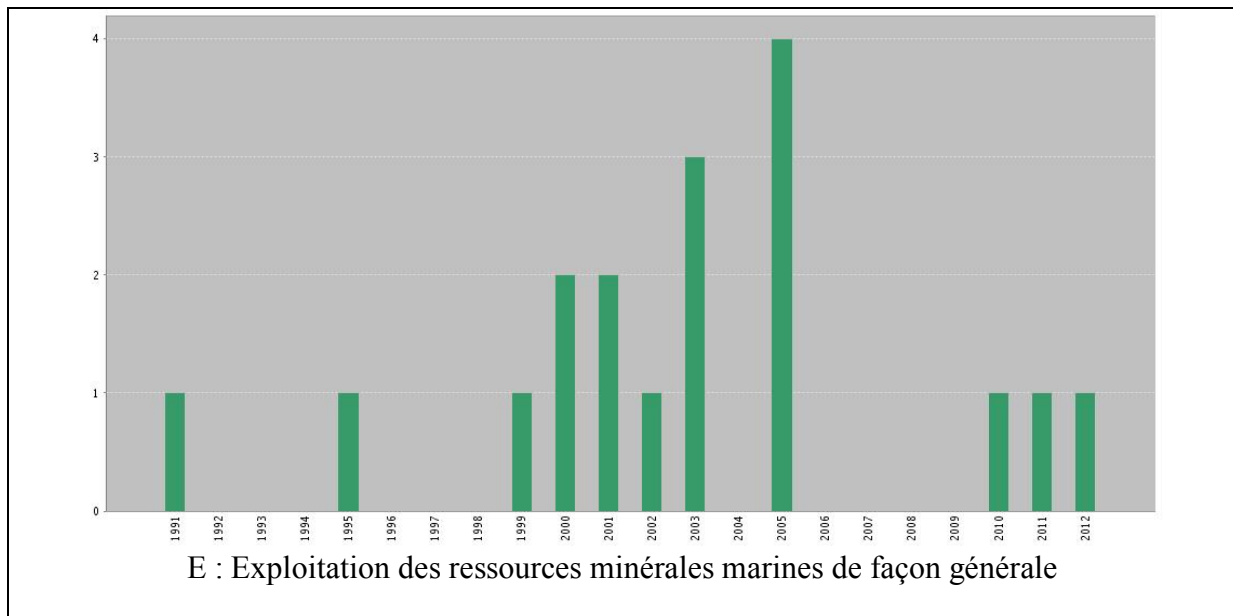


Figure 4-8 Nombre annuel de publications sur les écosystèmes profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines en fonction du type de ressource.

4.2.4.2. Les pays acteurs de la recherche

L'implication des différents pays dans cette production bibliographique plus ciblée diffère de celle établie précédemment pour la recherche menée sur les écosystèmes concernés de manière générale. Sur 33 pays identifiés, on retrouve en tête les Etats-Unis (32,34%), mais ce sont l'Allemagne (16,42%) et l'Inde (14,43%) qui se positionnent respectivement en deuxième et troisième position, devant la France (12,9%) et l'Angleterre (12,4%), et la Chine (9,95%). On retrouve ensuite le Canada (8,46%), la Russie (8,46% également), l'Australie (5,47%) et le Japon (4,975%) dans les 10 pays les plus actifs. La Norvège (3,48%), l'Espagne (2,49%) et l'Italie (1,99%) suivent en 11^e, 12^e et 13^e positions. La Corée du Sud arrive en 17^e avec 1,49% des publications publiées, le Portugal (environ 1%) en 22^e et la Nouvelle-Zélande (0,5%) en 29^e.

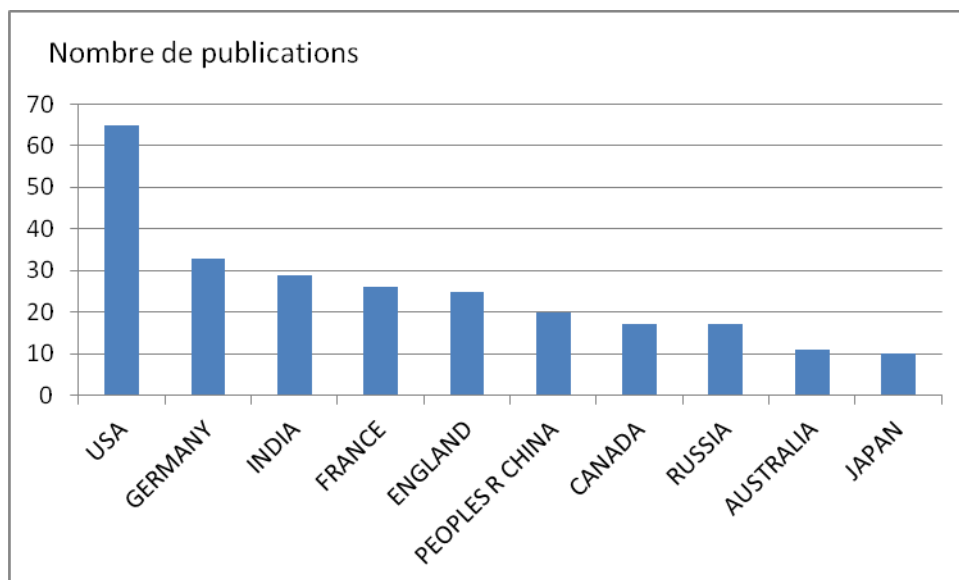
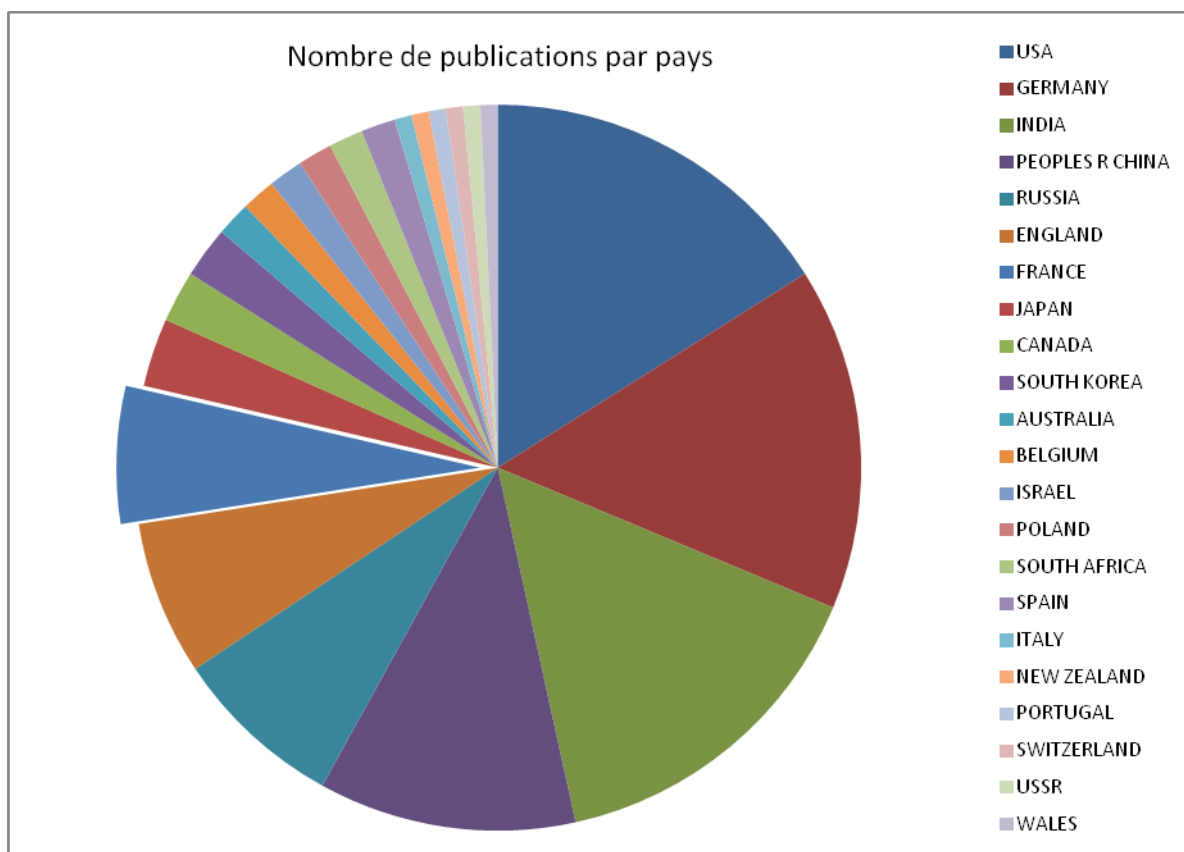
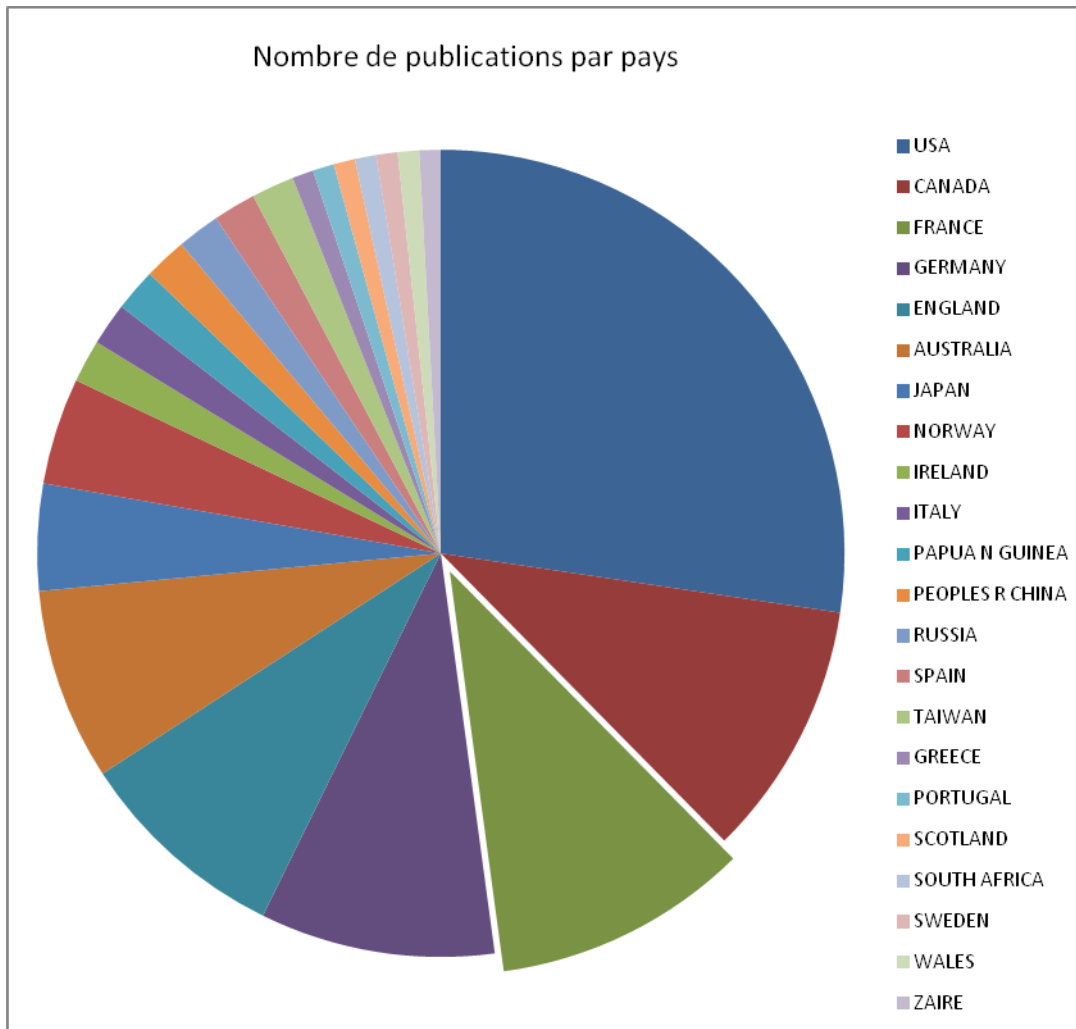


Figure 4-9 Implication des principaux pays dans la recherche sur les écosystèmes profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

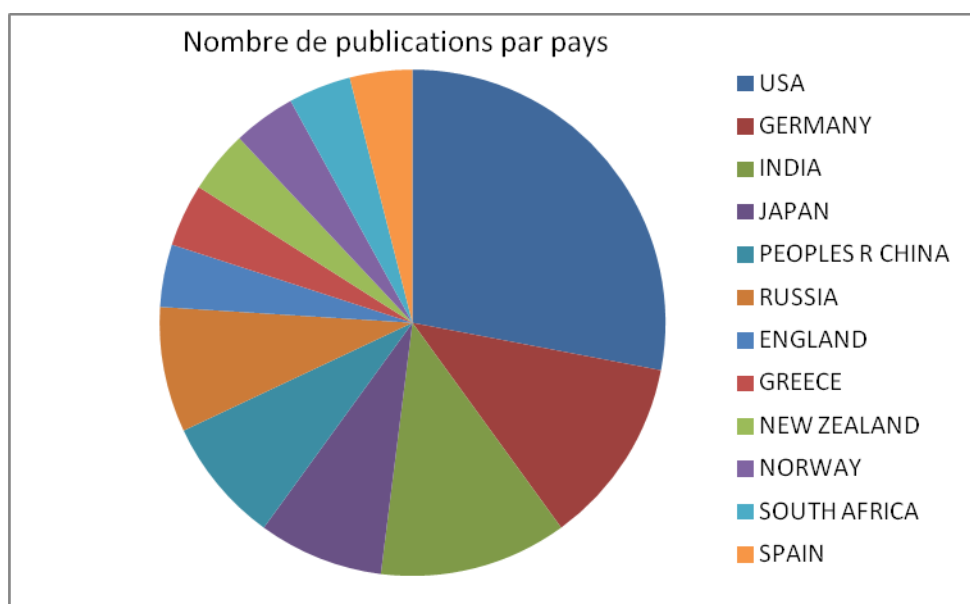
Par ailleurs, des tendances spécifiques se dégagent selon les ressources exploitées.



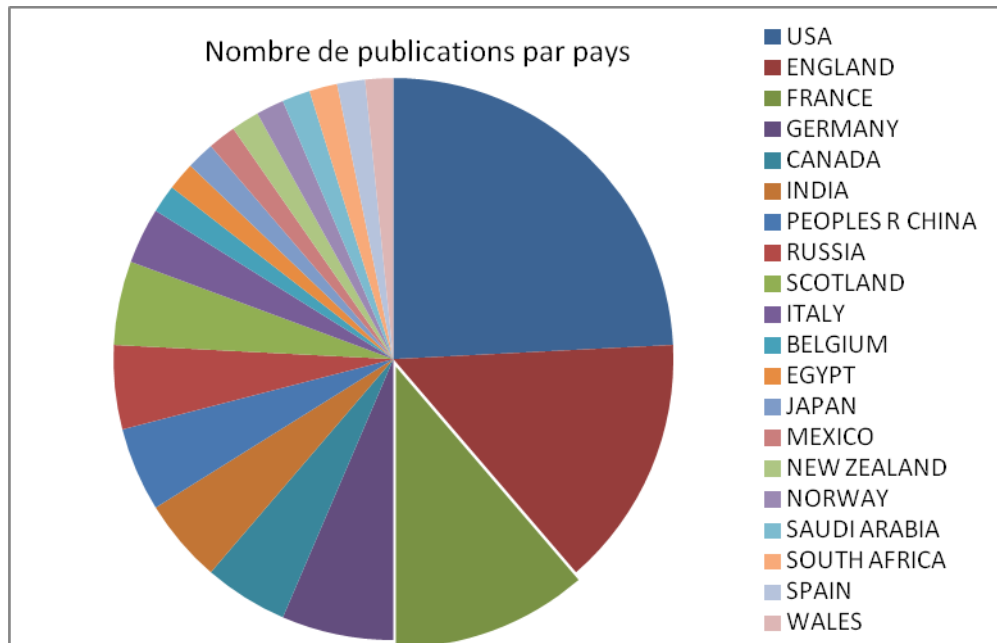
A : Nodules polymétalliques



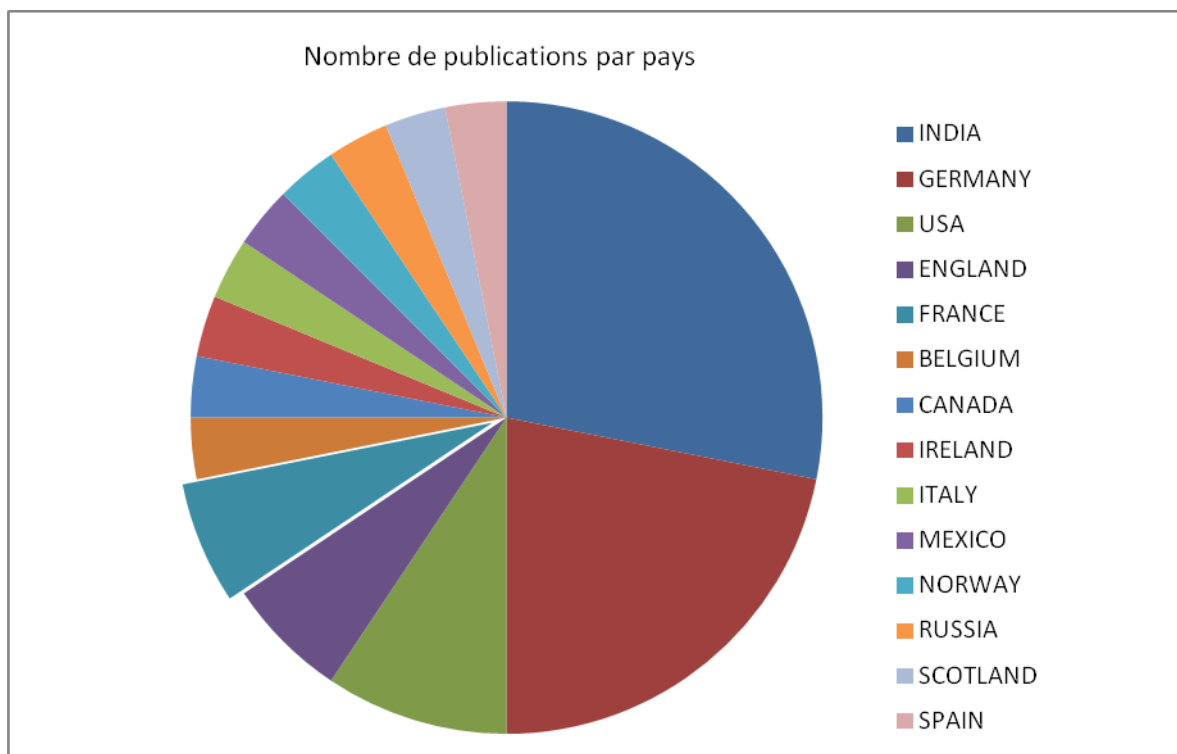
B : Sulfures polymétalliques



C : Encroûtements cobaltifères



D : Autres ressources métallifères



E : Deep-sea mining en général

Figure 4-10 Implication spécifique des pays dans la recherche sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes en fonction du type de ressources.

4.2.4.3. Les principales thématiques de recherche

Les publications référencées se distribuent entre les domaines de la biologie, des géosciences et de l'ingénierie : 32,34% en océanographie, 24,9% en géosciences, 16,9% en géosciences multidisciplinaires, 11,4% en procédés miniers, 9,95% en ingénierie marine, 8,96% en ingénierie géologique, 8,96% en microbiologie, 8,46% en biologie marine et d'eau douce, 5,97% en sciences multidisciplinaires et 5,47% en microbiologie appliquée aux biotechnologies. La figure 4-11 illustre les 10 domaines les plus représentés.

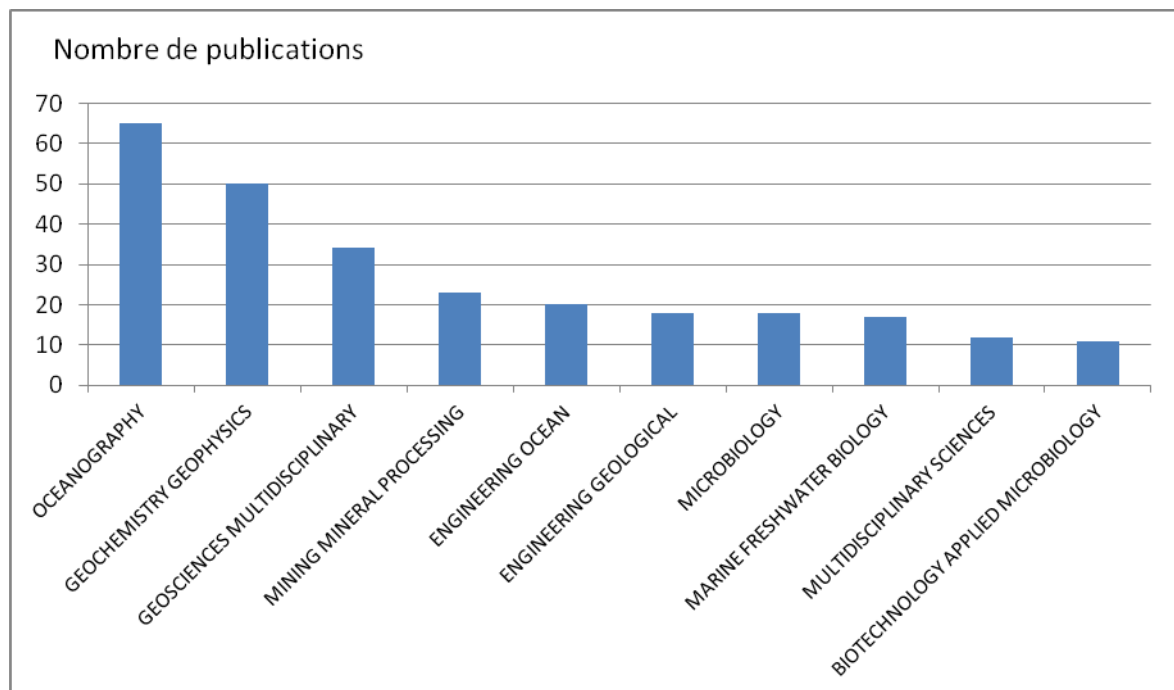


Figure 4-11 Distribution par domaine des publications parues sur les écosystèmes marins profonds directement concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines.

4.3. Description des écosystèmes profonds directement impactés

4.3.1. Nodules polymétalliques

Les études portant sur la faune abyssale associée aux zones à nodules ont été principalement motivées par l'évaluation des risques environnementaux liés à une exploitation potentielle de cette ressource en tant que minerais. Elles se sont focalisées sur trois zones géographiques : le bassin du Pérou dans le cadre des projets allemands DISCOL (Thiel and Shriever, 1990) puis ATESEPP (Thiel et al, 2001); le bassin central indien dans le cadre du projet INDEX (Sharma, 2001) et la zone des fractures de Clarion-Clipperton dans le Pacifique nord oriental. Pour cette dernière, de nombreux programmes d'étude ont été entrepris, pilotés par la NOAA aux Etats-Unis (Spiess et al, 1987) ou par des organismes des 12 pays ayant contracté un permis d'exploration dans la zone tels que l'InterOceanMetal Joint Organization (IOM) en Pologne (Radziejewska, 2002) ou l'Ifremer en France (ex. Menot, 2005). Cependant, **les résultats de ces travaux ont, pour l'essentiel, été publiés dans la littérature grise.**

4.3.1.1. Structure des peuplements

La faune abyssale des zones à nodule est classiquement divisée en trois classes de taille, correspondant à trois entités fonctionnelles distinctes : la mégafaune, la macrofaune et la méiofaune (Gage and Tyler, 1991). Leurs densités et leurs biomasses décroissent de manière exponentielle avec la profondeur mais à des taux variables suivant les groupes fonctionnels (Rex et al, 2006). Au-delà de 4000 m de profondeur en moyenne, la méiofaune tend à dominer le compartiment benthique, tant en densité qu'en biomasse. Les ordres de grandeur des densités et biomasses de la mégafaune/macrofaune/méiofaune, à 4500 m de profondeur, sont respectivement de $10^{-2}/10^2/10^5$ ind.m⁻² et $5.10^{-3}/5.10^{-2}/10^{-1}$ gC.m⁻².

La mégafaune

En environnement profond la mégafaune est définie de manière pragmatique par la faune reconnaissable sur image (Grassle et al, 1975). Compte-tenu des densités très faibles en milieu abyssal, l'évaluation quantitative des abondances, de la composition et de la distribution de la mégafaune s'appuie en effet principalement sur des radiales photographiques ou vidéos. Dans les zones à nodules, l'échantillonnage, au chalut ou à la drague, est en outre compliqué par les nodules eux-mêmes qui endommagent les spécimens prélevés. Les connaissances acquises sur la mégafaune sont donc contraintes par la stratégie d'acquisition des données, en particulier :

- l'estimation des densités, de la composition taxinomique et de la diversité taxinomique est dépendante de la méthodologie d'acquisition de l'image (altitude et vitesse de prises de vue, résolution des images);
- la résolution taxinomique des identifications faunistiques est faible, des morphotypes ou unités taxinomiques opérationnelles (UTO), assimilées à des espèces, sont parfois définies mais les déterminations au niveau spécifique sont impossibles.

Compte-tenu de ces contraintes, les possibilités de comparaison et d'intégration de données acquises de manières indépendantes sont limitées. Quelques patrons ressortent néanmoins. La richesse taxinomique est élevée. Dans la zone de Clarion-Clipperton, Tilot (1992) recensait 159 UTO pour une aire totale de près de 90 000 m² et Bluhm (1994) 80 UTO pour une aire totale explorée d'à peine 500 m². Dans le Pacifique sud-est, les estimations sont du même ordre de grandeur soit 110 UTO/34 000 m² (Bluhm, 1994). Dans le bassin central Indien, 12 taxa ont été recensés à une résolution taxinomique variant du phylum à la classe (Rodrigues et al, 2001; Sharma and Rao, 1992) et 15 morphotypes appartenant à la classe des Holothuroidea (Rodrigues et al, 2001). Les holothuries ont fait l'objet d'une attention particulière dans les zones à nodules, compte-tenu de leur abondance et de la diversité de leur forme (voir Figure 4-12). Bluhm et Gebruk (1999) ont ainsi décrit 28 morphotypes dans le bassin du Pérou sur la base de critères morphologiques identifiables sur images, tandis que Tilot (1992) en recensait 31 dans la zone de Clarion-Clipperton. Dans l'océan Pacifique comme dans l'océan Indien, quatre taxons d'invertébrés dominent la mégafaune des zones à nodules : les échinodermes, les porifères (éponges), les actiniaires (anémones) et les crustacés (Bluhm, 1994; Rodrigues et al, 2001) (quelques espèces sont illustrées Fig. 4-12).

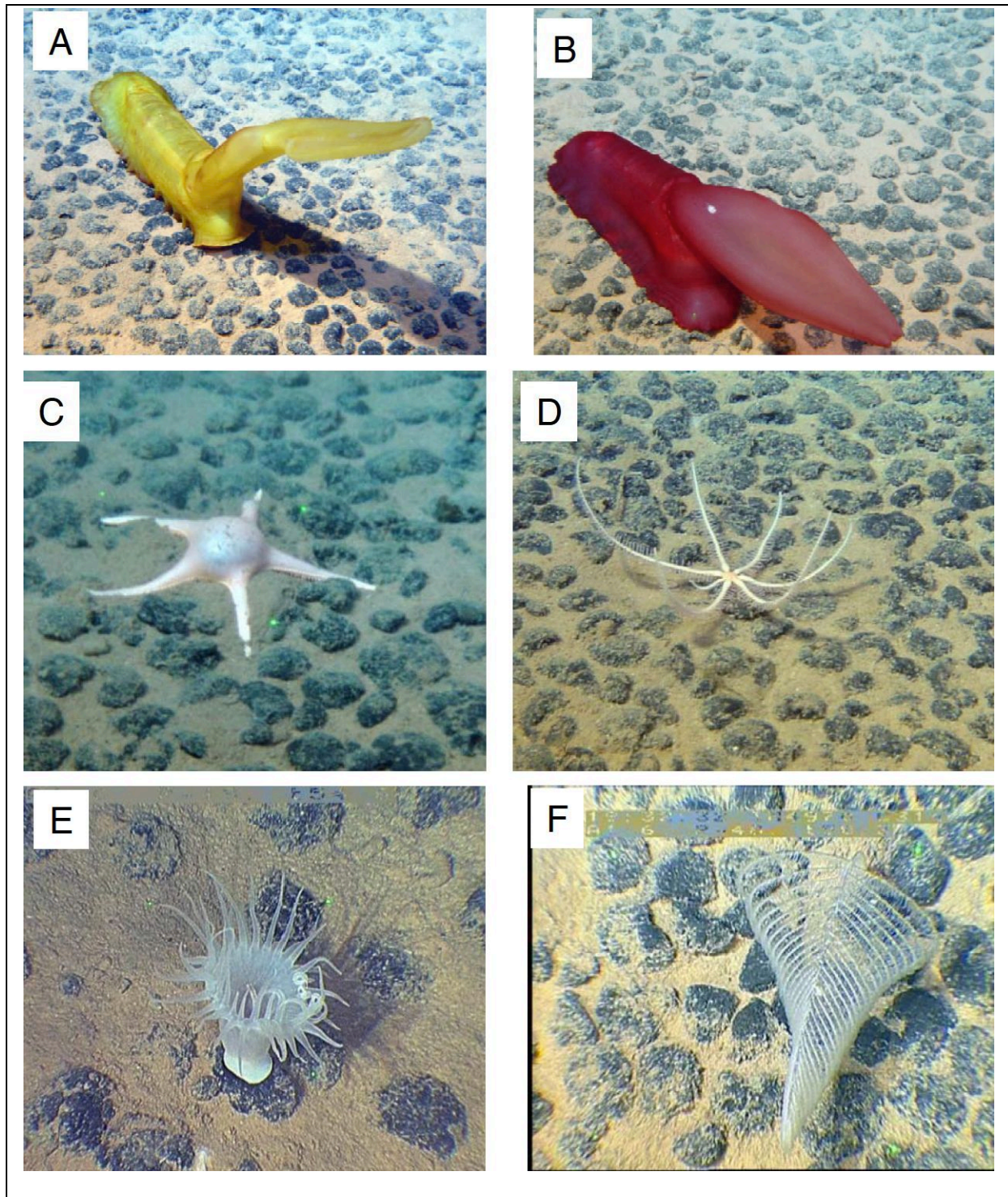


Figure 4-12 Méga-faune abyssale des zones à nodules © Ifremer, campagne Nodinaut (2004).

A) *Holothurie (Psychropotes cf. longicauda)*, B) *Holothurie (Psychropotes cf. semperina)*, C) *Etoile de mer (Hyphalaster sp.)*, D) *Etoile de mer (Freyella sp.)*, E) *Anémone (Actiniaria)*, F) *Corail noir (Antipatharia)*.

La structure des assemblages de méga-faune varie aux échelles régionales et locales. Le long d'une radiale est/ouest dans la zone de Clarion-Clipperton, Morgan et coll. (1993) notaient une réduction des densités de méga-faune, ainsi que de la part relative des échinodermes au profit des actiniaires. A l'échelle locale, la présence et le taux de couverture en nodules semblent influencer les densités ainsi que la richesse et la composition taxonomique de la méga-faune (Foell et al, 1989; Tilot, 1992).

Les substrats meubles sont dominés par une faune majoritairement mobile composée d'holothuries, d'étoiles de mer, d'ophiures et de crustacés tandis que les substrats durs favorisent la dominance d'une faune sessile, en particulier des anémones, des éponges et des coraux (Bluhm, 1994) (Figure 4-13). Foell et coll. (1989) ont rapporté des densités et des richesses taxonomiques faibles sur des faciès à petits nodules très compacts, et élevées sur des faciès à gros nodules plus clairsemés où coexistent faunes de substrats dur et meuble. Tilot (1992) identifie des préférendums écologiques taxon-spécifiques en fonction de la morphologie et du taux de couverture en nodules. Dans cette étude, si la proportion relative d'éponges (Porifera) et de coraux et d'anémones (Cnidaria) reste sensiblement constante, ce n'est pas le cas des concombres de mer (Holothuroidea), dont la proportion décroît du Nord au Sud, ou celle des Crustacés, qui varie à l'inverse.

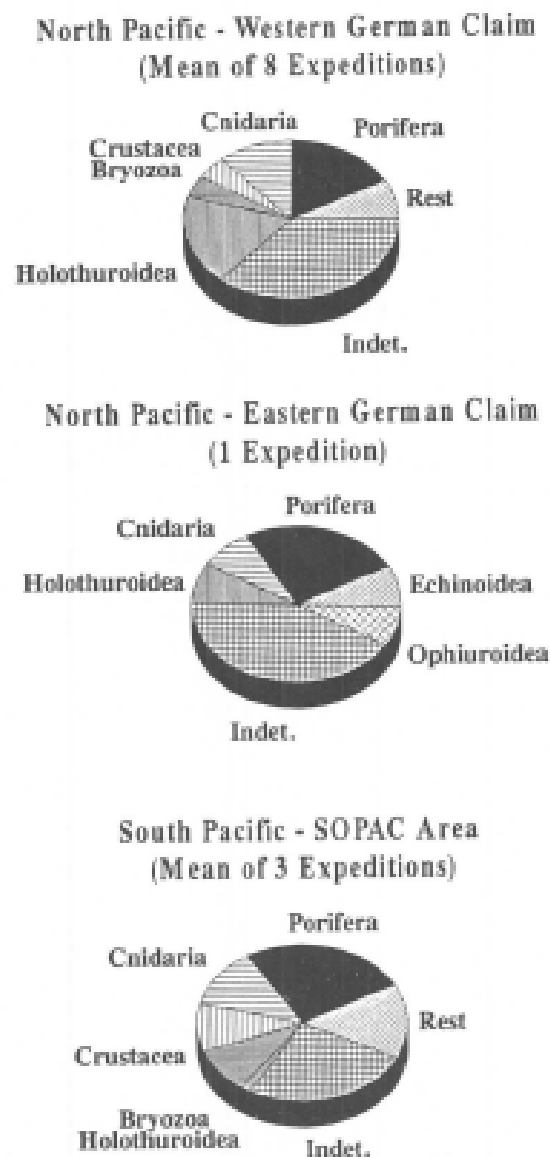


Figure 4-13 Composition taxonomique de la mégafaune abyssale associées aux zones à nodules dans le Pacifique Nord et le Pacifique Sud, d'après Bluhm (1994).

La macrofaune

La macrofaune *sensu stricto* est la faune retenue par un tamis de maille égale à 250µm ou 300µm, à l'exception des taxons appartenant à la méiofaune permanente, tels que les nématodes, les copépodes ou les ostracodes (Dinet et al, 1988).

Dans les zones à nodules se distinguent les assemblages de macro-endofaune, vivant dans les sédiments, et de macro-épifaune vivant à la surface des nodules. L'épifaune des nodules a paradoxalement reçu bien moins d'attention que l'endofaune (Mullineaux, 1987). **Les quelques études entreprises sur la faune inféodée aux nodules eux-mêmes montrent que celle-ci est dominée, à près de 90%, par des protistes (eucaryotes unicellulaires), en particulier des foraminifères**, habituellement associés à la méiofaune (Mullineaux, 1987; Veillette, Sarrazin et al, 2007). La macro-endofaune a été particulièrement bien étudiée dans le Pacifique Nord-Est (Glover et al, 2002; Hessler and Jumars, 1974; Spiess, 1987). Dans le Pacifique Sud-Est, un effort d'échantillonnage conséquent a été consenti dans le cadre du projet DISCOL, mais les échantillons ont été tamisés sur 500 µm et la macrofaune n'a été identifiée qu'à une faible résolution taxonomique, à l'exception des polychètes, identifiés au niveau de la famille, voire de l'espèce pour quelques espèces cibles (Borowski and Thiel, 1998). Dans l'Océan Indien, un effort d'échantillonnage plus limité a été consenti dans le cadre du programme INDEX et la résolution taxonomique n'excède pas l'ordre (Ingole et al, 2001).

A l'instar de la mégafaune, la diversité de la macrofaune est élevée dans le Pacifique Nord-Est et se caractérise par un long cortège d'espèces rares. Sur la station CLIMAX II, au nord d'Hawaii, Hessler et Jumars (1974) recensaient 108 espèces dont 67 singletons (1 seul individu récolté), pour un effort d'échantillonnage total de 2,5 m². Sur la station ECHO1, dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton, 257 espèces dont 125 singletons étaient identifiées sur une surface cumulée de 3,75 m² (Spiess, 1987). **Une grande majorité de ces espèces est nouvelle pour la science.** Dans une étude incluant un transect latitudinal entre 0° et 9°N, à une longitude de 140°W (projet EqPac), ainsi que la station HOT 23°N au large d'Hawaii (projet JGOF), Glover et coll. (2002) identifiaient 177 espèces de polychètes dont plus de 90% d'espèces nouvelles.

Les vers annélides polychètes dominent les assemblages de macrofaune (Fig. 4-14), représentant de l'ordre de 50% des abondances, suivis par les crustacés tanaidacés (13-20%) et isopodes (6-18%), puis les bivalves (5-9%) (Borowski and Thiel, 1998; Hessler and Jumars, 1974; Menot, 2005; Spiess, 1987). Quelques espèces sont illustrées Figure 4-15. Dans le Pacifique Nord-Est, l'abondance tend à décroître et la composition taxonomique des assemblages de polychètes tend à varier d'est en ouest et du sud au nord, le long des principaux gradients décroissants de production primaire de surface (Glover et al, 2002; Menot, 2005), tandis que les patrons de diversité à l'échelle régionale semblent indépendants des apports trophiques (Glover et al, 2002). A l'échelle locale, Menot (2005) observait des variations d'abondance et de composition taxonomique en fonction du taux de couverture en nodules. Ces variations, cependant, n'étaient pas statistiquement significatives. **Compte-tenu des faibles densités ainsi que de l'occurrence de nombreux singletons, la puissance des tests statistiques est limitée, au point que la détection d'un effet d'amplitude majeure (i.e. >50%, (Cohen, 1977)) nécessiterait un effort d'échantillonnage sans précédent à l'échelle locale (Jumars, 1981; Menot, 2005).**

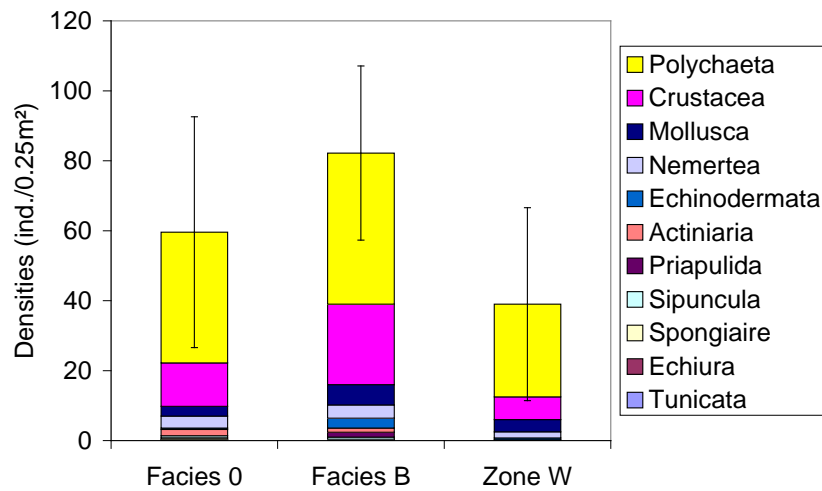


Figure 4-14 Composition taxonomique et densités de la macrofaune abyssale en fonction du taux de couverture en nodule (Facies 0 : pas de nodule, Facies B : couverture élevée) et le long d'un gradient longitudinale (Facies 0/B : 130°W, Zone W : 150°W) dans la zone de Clarion-Clipperton, d'après Menot (2005).

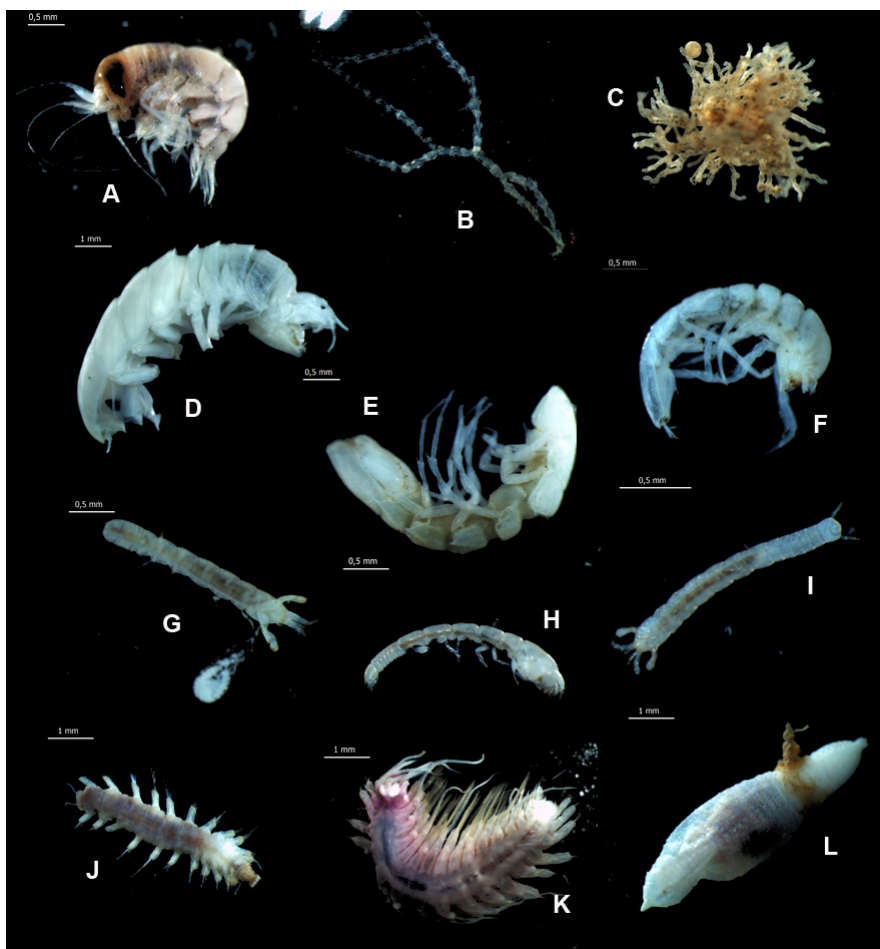


Figure 4-15 Meio- et macrofaune abyssale des zones à nodules. © Ifremer/BGR, campagne BIONOD (2012).

A) Crustacé Amphipode; B) Bryozoaire; C) Komokiacea; D-F) Crustacés Isopodes, D) *Eurycope* sp. (fam. Munnopsidae); E) *Macrostylis* sp. (Macrostylidae); F) *Thaumastosoma* sp. (Desmosomatidae); G-I) Crustacés Tanaidacés, G) *Leptognathia* sp.; H) Tanaidacé indéterminé; I) *Parafilitanais* sp.; J-L) Annélides Polychètes, J) *Braniella* cf. *palpata*; K) *Macellicephalo* sp.; L) *Kesun* sp.

La méiofaune

La méiofaune est la faune passant à travers un tamis de 1 mm et retenue par un tamis de vide de maille compris entre 20µm et 63µm, les tailles de tamis les plus fréquemment utilisées dans les études portant sur la méiofaune des zones à nodules étant comprises entre 40µm et 63µm (ex. Hessler and Jumars, 1974; Renaud-Mornant and Goubault, 1990).

La méiofaune se concentre généralement dans les deux premiers centimètres de sédiment (Ansari, 2000; Bussau et al, 1995). Dans l'océan Pacifique, elle est dominée à près de 80% par les nématodes et 10% par les copépodes (Ahnert and Schriever, 2001; Radziejewska, 2002; Renaud-Mornant and Goubault, 1990). Les patrons de dominance sont inchangés mais les proportions relatives de ces taxons sont sensiblement différentes dans l'océan Indien où les nématodes contribuent pour 55% à 70% et les copépodes pour 22% à 28% des abondances de la méiofaune (Ingole et al, 2000; Parulekar et al, 1982). Dans le Pacifique Nord-Est, les patrons de diversité et de composition taxonomique des nématodes sont similaires à ceux des polychètes.

La diversité est élevée à l'échelle locale. Sur les sites d'études des projets EqPac et JGOF, Lamshead et coll. (2003) identifiaient 200 espèces pour 3320 spécimens. Dans la zone de Clarion-Clipperton, et en particulier sur un site du permis d'exploration français, Renaud-Mornant et Goubault (1990) reportaient 45 espèces de nématodes (780 spécimens) et Miljutina et coll. (2010), bénéficiant d'un effort d'échantillonnage plus important (2175 spécimens), 325 espèces. Des valeurs de diversité similaires étaient également observées dans le bassin du Pérou, soit 325 espèces pour 2623 spécimens (Bussau et al, 1995). **Dans tous les cas, une grande majorité des espèces rencontrées étaient nouvelles pour la science et jusqu'à présent moins d'une vingtaine d'espèces a fait l'objet d'une description taxonomique complète** (Miljutin and Miljutina, 2009 a et b; Miljutina and Miljutin, 2012).

Si la diversité locale des assemblages de nématodes est comparable entre bassins et plaines abyssales du Pacifique Est, les abondances tendent à décroître le long des gradients de production primaire latitudinaux et longitudinaux (Lamshead et al, 2003; Miljutina et al, 2010). Les genres dominants ou leurs abondances relatives varient également suivant les mêmes gradients (Lamshead et al, 2003; Miljutina et al, 2010).

A l'échelle locale, les abondances totales des nématodes ainsi que les abondances relatives des genres dominants semblaient varier en fonction de la présence ou de l'absence de nodules (Miljutina et al, 2010). Les nodules eux-mêmes forment un habitat pour une faune typiquement sédimentaire. Thiel et coll. (1993) rapportaient ainsi l'existence, dans les sédiments remplissant les anfractuosités des nodules, d'une faune particulière. Celle-ci, dominée par les nématodes, s'apparente à la méiofaune des sédiments environnants. La composition générique et spécifique des nématodes diffère néanmoins. **Des genres et espèces rares ou absents dans les sédiments dominant la méiofaune interstitielle des nodules** (Bussau et al, 1995; Thiel et al, 1993). Les études portant sur les assemblages de copépodes harpacticoides, second taxon dominant la méiofaune métazoaire, sont beaucoup plus rares. Radziejewska, Drzycimski et coll. (2001) recensaient 57 genres sur une station localisée à l'est de la zone de Clarion-Clipperton et Ahnert et Schriever (2001) 19 familles de copépodes dans le bassin du Pérou. **Les patrons de diversité et de distribution aux échelles régionales et locales ne sont pas connus.**

Une fraction importante mais généralement méconnue de la faune benthique abyssale est constituée de protistes, appartenant en particulier à l'embranchement des foraminifères. Bien qu'ils soient unicellulaires, la taille de ces organismes couvre la totalité de la gamme de taille de la faune benthique. Ainsi, là où leurs abondances ont été évaluées, les études montrent que les xenophyophores dominent les assemblages de mégafaune dans l'océan Indien (Rodrigues et al, 2001) et dans la zone de Clarion-Clipperton (Kamenskaya, Melnik et al, 2012). Les komokiaccés compteraient parmi les groupes dominants la

macrofaune dans la zone de Clarion-Clipperton (Kamenskaya, Gooday et al, 2012; Kamenskaya, Melnik et al, 2012). Les foraminifères domineraient également la biomasse du compartiment méiobenthique (Snider et al, 1984). Les données quantitatives concernant l'abondance et la diversité des foraminifères sont cependant rares ou approximatives, dans la mesure où la proportion de fragments dépasse généralement celle des organismes complets et la différence est difficile à faire entre organismes vivants et morts (Hessler and Jumars, 1974; Kamenskaya, Gooday et al, 2012; Kamenskaya, Melnik et al, 2012; Nozawa et al, 2006; Snider et al, 1984). Dans le Pacifique Nord-Est, Hessler et Jumars (1974) identifiaient 52 morpho-espèces de foraminifères dans la fraction macrobenthique tandis que Kamenskaya, Gooday et coll. (2012) reportaient l'occurrence de 102 morpho-espèces de komokiacés et autres protistes géants. Dans la fraction méiobenthique, Nozawa et coll. (2006) recensaient 252 morpho-espèces de foraminifères dont 168 représentées par des organismes entiers. Les foraminifères dominent également la faune sessile fixée aux nodules (Mullineaux, 1987; Veillette, Sarrazin et al, 2007). Dans une étude de la faune sessile des nodules d'un site de la zone Clarion-Clipperton et de la station CLIMAXII, les protozoaires représentaient 64% à 80% des taxons et plus de 98% des abondances ou du t aux de couverture total. Dans les permis d'exploration français situés au centre et à l'ouest de la zone Clarion-Clipperton, Veillette, Sarrazin et coll. (2007) identifiaient 73 morpho-espèces de foraminifères dont 62 vivantes contre 17 espèces de métazoaires dont 5 vivantes.

Dans ces études, la richesse spécifique et les abondances de la faune associée aux nodules tendaient à décroître d'est en ouest et du sud au nord, parallèlement à une réduction des flux de carbone particulaire. La forme des nodules et, en particulier, leur irrégularité semblaient également avoir une influence sur la structure et la composition taxonomique de la faune associée (Mullineaux, 1989; Veillette, Juniper et al, 2007).

Les communautés microbiennes

La présence de micro-organismes ou plutôt de structures ressemblant à des micro-organismes (coques, bâtonnets, filaments) sur la surface des nodules polymétalliques a été mise en évidence depuis la fin des années 1970 (Figure 4-16) (LaRock and Ehrlich, 1975; Burnett and Nealson, 1981). Des cultures microbiennes à partir de nodules ont aussi permis d'enrichir (Ehrlich, 1963; Ehrlich, 1968) et d'isoler plusieurs souches bactériennes dont certaines sont capables de réduire le manganèse(IV) (par exemple la souche BIII 88 (Arcuri and Ehrlich, 1977; Trimble and Ehrlich, 1968)) ou d'oxyder le manganèse(II) (par exemple la souche BIII 39 (Arcuri and Ehrlich, 1977)). **Généralement, les micro-organismes isolés de nodules sont impliqués dans le cycle du manganèse. Ainsi, ces procaryotes pourraient avoir un rôle dans la biogenèse des nodules** (Margolis and Glasby, 1973; Monty, 1973). Toutefois, attribuer une origine exclusive des micro-organismes cultivés aux nodules est soumise à discussion, dues 1) aux méthodes de collecte des échantillons (LaRock and Ehrlich, 1975) et 2) à la rapide altération de la surface des nodules lorsque ceux-ci sont conservés à 4 °C (Ehrlich et al, 1972; LaRock and Ehrlich, 1975). Cependant, ces dernières années, le conditionnement des échantillons pour des analyses microbiologiques et d'imagerie a été réalisé en conditions aseptiques (Wu et al, 2013).

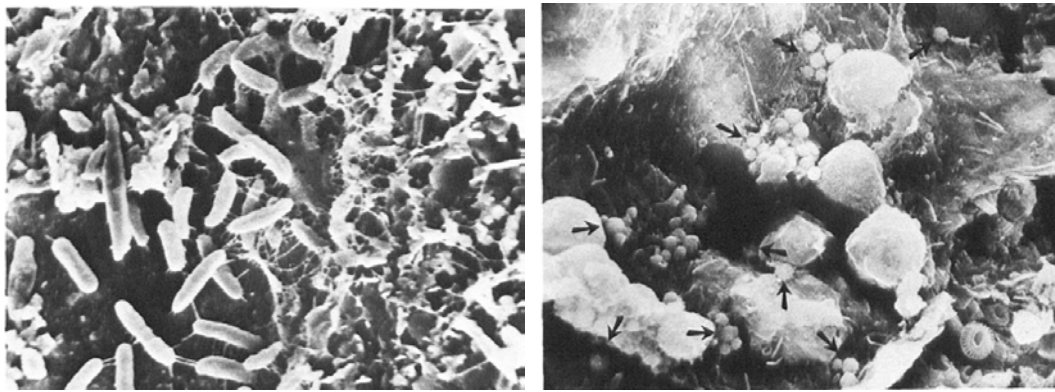


Figure 4-16 Photographie de microscopie électronique à transmission (Burnett and Nealson 1981).
 (A) Structures en forme de bâtonnets ressemblant à des micro-organismes (considérées comme des bactéries) sur la surface du nodule; (B) les flèches indiquent l'emplacement des micro-colonies sur la surface du nodule. Photographies provenant de Brunett et Nealson.

Morphologiquement, deux types de structures, des coques et des bâtonnets (Figure 4-17), ressemblant à des micro-organismes ont été identifiés dans les nodules (Wang et al, 2009; Wang and Müller 2009; Wang et al, 2009).

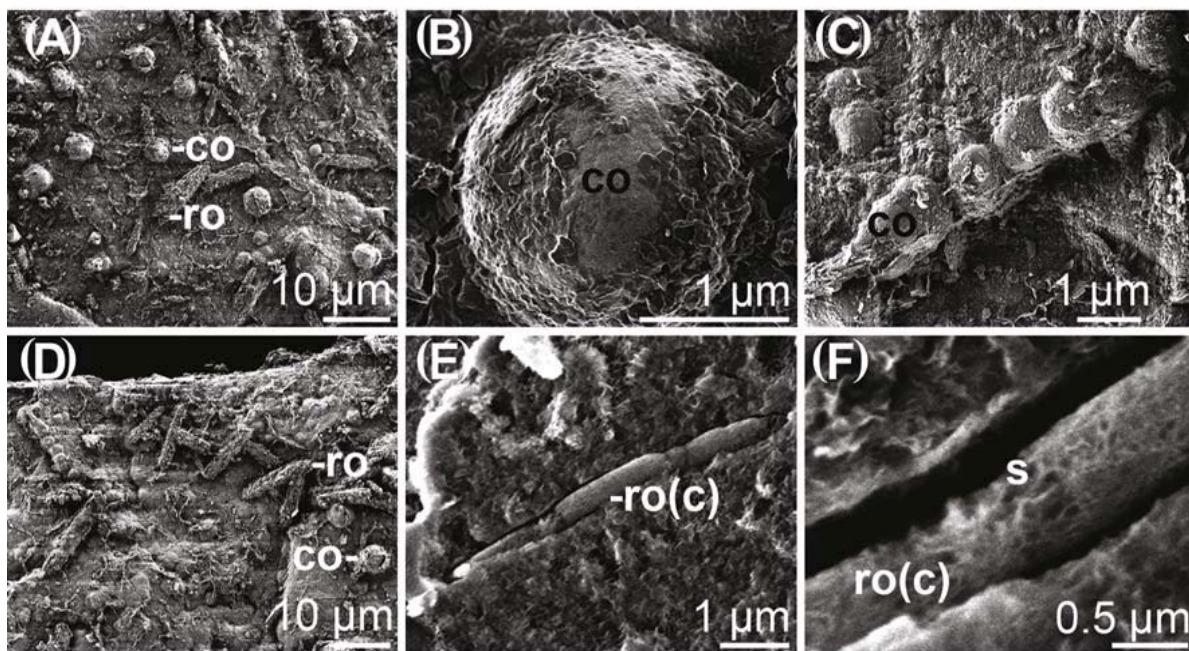


Figure 4-17 Photographie de microscopie électronique à transmission à haute résolution mettant en évidence les deux morphologies de structure ressemblant à des micro-organismes, morphotypes coque (co) et bâtonnet (ro) (Wang et al, 2009).

(A) dans les micronodules, coques et bâtonnets; (B) zoom sur une coque, sa surface lisse est couverte de plaquettes de petite taille, probablement constituées d'oxydes; (C) coques disposées en chaînettes; (D) bâtonnets et coques dans les micronodules; (E) une chaînette de bâtonnets (ro(c)); (F) alignement des bâtonnets (ro(c)).

Les structures de type « coques » et « bâtonnets » apparaissent comme étant équitablement abondantes dans les nodules, à l'intérieur des micronodules (Wang et al, 2009; Wang and Müller 2009; Wang et al, 2009). Elles forment des structures organisées sur les surfaces planes à l'intérieur des nodules (Wang et al, 2009). Les coques, de 2,5 à 4 µm de diamètre, sont parfois recouvertes de petites plaques, probablement des oxydes (Figure 4-17.B). Les bâtonnets mesurent 1,5 à 2,5 µm de long et sont épais de 0,35 à 0,45 µm (Wang et al, 2009;

Wang and Müller 2009; Wang et al, 2009). Deux formes d'organisation des bâtonnets ont été mises en évidence : 1) en forme de palissade où les bâtonnets sont reliés les uns aux autres au niveau de leur longueur ou 2) disposés linéairement (Wang et al, 2009; Wang et al, 2009). Des biofilms microbiens ont aussi été détectés par des analyses EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) à l'intérieur des nodules, sur des surfaces organiques (Wang et al, 2009).

Les données de microscopie à transmission haute résolution montrent aussi que certaines structures semblent se diviser, indiquant que ces structures sont très probablement des procaryotes (Wang and Müller 2009; Wang et al, 2009). Autre indice corroborant le fait que ces structures soient des micro-organismes : la mise en évidence par microscopie à haute définition d'une couche S, ou enveloppe extérieure des micro-organismes, autour de ces structures (Wang and Müller 2009; Wang et al, 2009).

A ce jour, seule une étude récente de 2013 traite de la diversité des micro-organismes vivant dans (et sur) les nodules (Wu et al, 2013). Une importante diversité bactérienne a été mise en évidence dans cette étude. Les bactéries les plus fréquemment détectées dans les banques de clones sont des *Proteobacteria* et principalement des *Gammaproteobacteria* (Wu et al, 2013). Des bactéries affiliées aux *Actinobacteria* et aux *Planctomycetes* sont également très souvent trouvées. Parmi les autres groupes bactériens détectés, on note la présence en faible nombre dans les banques de clones, des *Acidobacteria*, des *Bacteroidetes*, des *Chloroflexi*, des *Cyanobacteria*, des *Deferribacteres*, des *Elusimicrobia*, des *Gemmatimonades*, des *Nitrospira*, des *Spirochaetes*, des *Verrucomicrobia* et des groupes « candidat division » BRC1, OP3, OD1, BD1-5, TM6 et NPL-UPA2 (Wu et al, 2013). Les *Archaea* les plus souvent détectées sont les *Thaumarchaeota*, en particulier les MGI (Marine Group I), ainsi que des *Euryarchaeota* (Wu et al, 2013).

La formation des nodules polymétalliques est un processus non entièrement résolu à ce jour : processus chimique, microbien ou les deux. Cependant, une implication microbienne est très probable. Ainsi, l'étude des **sédiments marins environnant les zones à nodules**, notamment de diversité microbienne, pourrait fournir des informations sur la formation de ces nodules (Xu et al, 2007).

De telles études de diversité microbienne, réalisées à partir d'échantillons de sédiments collectés dans une province à nodules du Pacifique, ont mis en évidence une importante diversité bactérienne. Les communautés de *Bacteria* sont constituées de *Proteobacteria* (*Alpha-*, *Beta-*, *Delta-* et *Gammaproteobacteria*), des *Acidobacteria*, des *Actinobacteria*, des bactéries de la division *Cytophaga-Flexibacter-Bacteroidetes*, des *Chloroflexi*, des *Firmicutes*, des *Planctomycetes*, des *Gemmatimonades*, des *Nitrospira*, des *Verrucomicrobia*, des bactéries vertes non sulfureuses, des bactéries des groupes « candidat division » TM6, OP3 et des bactéries non classifiées (Xu et al, 2005; Xu et al, 2007; Wang et al, 2010; Wu et al, 2013). La diversité des *Archaea* est plus faible, seuls des *Thaumarchaeota*, en particulier les MGI (Marine Group I), ainsi que des *Euryarchaeota* ont été détectés dans les inventaires moléculaires (Xu et al, 2005; Wu et al, 2013).

Ces banques de clones ont permis de mettre en évidence qu'éventuellement, certaines bactéries des sédiments pourraient être impliquées dans le cycle des métaux, notamment les cycles du fer et du manganèse, métaux constitutifs des nodules (Wang et al, 2010).

Dans l'étude réalisée par Wu et coll. (Wu et al, 2013), il a été démontré que la diversité bactérienne des nodules et des sédiments environnants est très proche (moins de 0,03 de différence), même si une grande proportion des espèces détectées est propre aux nodules (peu d'espèces communes avec les sédiments). En effet, 16 groupes phylogénétiques (OTU) sont propres aux nodules et 10 autres sont aussi trouvés dans les sédiments (Figure 4-18). Quant à la diversité des *Archaea* des nodules, elle est plus importante que celle des sédiments, avec notamment 10 OTUs spécifiques des nodules. Toutefois, 12 groupes phylogénétiques sont communs avec les sédiments (Wu et al, 2013).

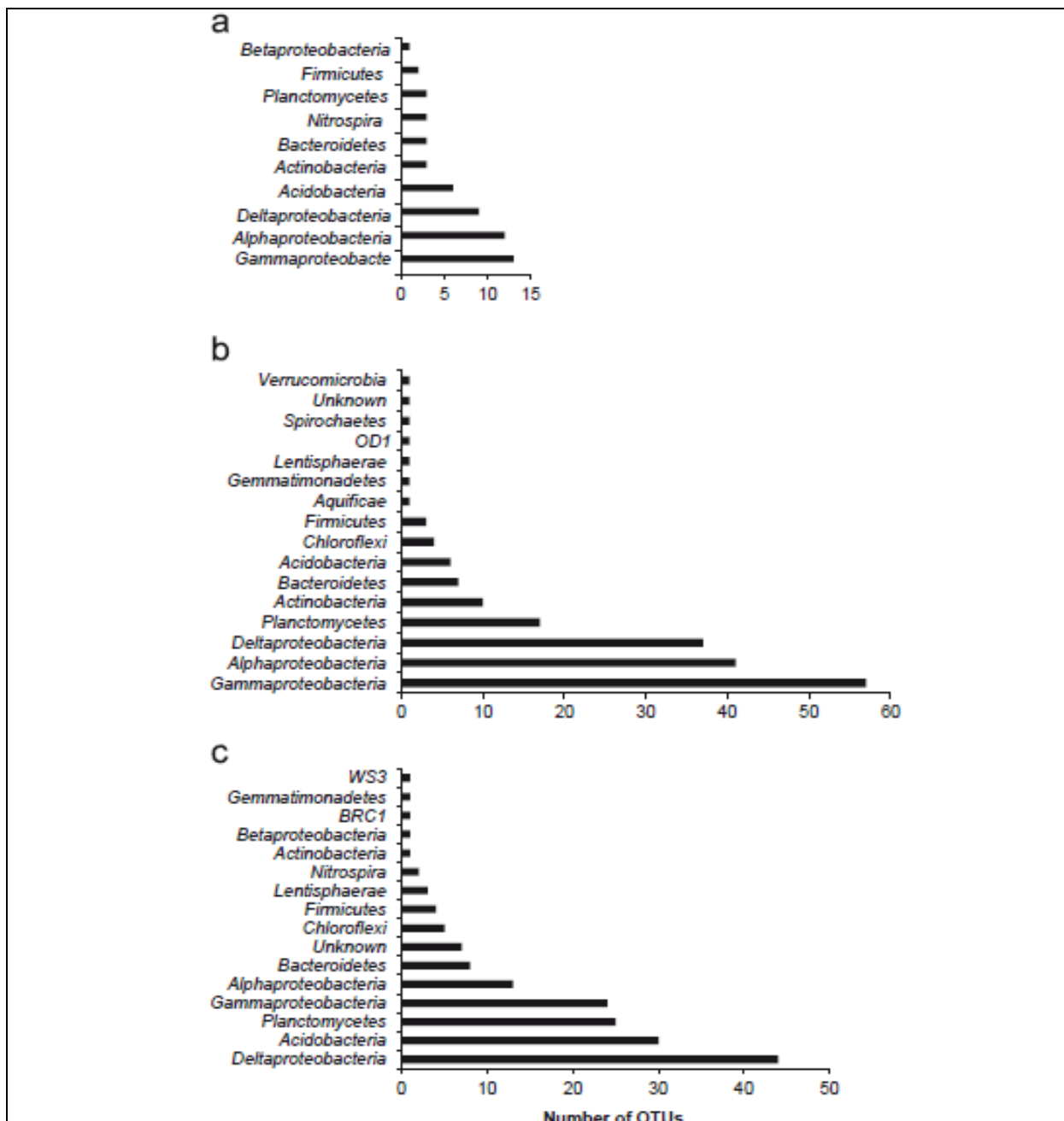


Figure 4-18 Diversité microbiennes des zones à nodules.

(a) Groupes bactériens (OTU) communs aux nodules et aux sédiments environnants; (b) Groupes bactériens propres aux nodules; (c) Groupes bactériens propres aux sédiments. (Wu et al, 2013).

4.3.1.2. *Fonctionnement des écosystèmes*

Les informations disponibles sur le réseau trophique des écosystèmes associés aux nodules sont rares. Ces écosystèmes sont alimentés par la sédimentation de particules organiques produites dans la zone euphotique (voir aussi 4.4). Le flux de carbone organique décroît de manière exponentielle avec la profondeur et ne représente plus que 0,5% à 2% de la production primaire nette à des profondeurs abyssales (Martin et al, 1987; Smith et al, 2008). **L'efficacité du transfert de carbone de la zone euphotique vers les grands fonds est influencée par la structure et le fonctionnement de l'écosystème épipélagique.** Dans le Pacifique Nord-Est, ce transfert est deux fois plus efficace en condition mésotrophique tempérée, où la production primaire est dominée par les diatomées, qu'en condition oligotrophique sub-tropicale, où la production primaire est dominée par le pico-phytoplancton (Buesseler et al, 2007). **Dans les zones à nodules telles que la zone de Clarion-Clipperton, associées à des conditions oligotrophiques en surface (Hyun et al, 1998), le transfert du carbone, et plus généralement le couplage pelagos-benthos, est donc probablement faible.**

Dans l'océan Pacifique les mesures de demande en oxygène des sédiments sont évaluées à 0,6–0,8 mmolO₂.m⁻².jour⁻¹ (correspondant à la minéralisation de 6-8 mgC.m⁻².jour⁻¹) au niveau de l'équateur, entre 2°S et 2°N, mais décroissent le long d'un gradient latitudinal pour atteindre des valeurs inférieures ou égales à 0,2 mmolO₂.m⁻².jour⁻¹ à 9°N ou dans le gyre subtropical au nord d'Hawaii (Hammond et al, 1996; Smith Jr et al, 2002). Ces variations régionales de la minéralisation de la matière organique sont globalement cohérentes avec les patrons de distribution de la biomasse benthique (Brown et al, 2001) et les taux des processus biologiques (Smith et al, 1997). Dans la zone de Clarion-Clipperton, la demande en oxygène a été évaluée sur deux stations, centrale et occidentale, les valeurs mesurées étaient respectivement de 1,0 et 0,6 mmolO₂.m⁻².jour⁻¹ (Khripunoff et al, 2006; Khripunoff, com. pers.). La biomasse benthique en milieu abyssal est dominée à plus de 90% par le compartiment microbien (Rex et al, 2006), ce qui laisserait suggérer que le fonctionnement de l'écosystème l'est également. Des expériences de traçage isotopique réalisées en milieu abyssal montrent néanmoins que, **contrairement à un environnement côtier où l'assimilation de la matière organique est rapide et dominée par des processus bactériens, l'incorporation du carbone en milieu abyssal est contrôlé en premier lieu par la méiofaune et la macrofaune** (Sweetman and Witte, 2008; Witte et al, 2003). Smith et coll. (2008) émettent l'hypothèse que, dans un environnement fortement contraint par la faiblesse des apports trophiques, les pressions de sélection ont favorisé l'émergence de stratégies d'alimentation extrêmement efficaces au sein de la faune abyssale. Ces expériences de traçage isotopique ont cependant été réalisées dans des conditions mésotrophiques tempérées dans l'Atlantique Nord-Est (Witte et al, 2003) et le Pacifique Nord-Est (Sweetman and Witte, 2008) où les processus benthiques sont fortement corrélés à la saisonnalité des apports trophiques (Smith et al, 1994 ; Witbaard et al, 2000). **Le rôle joué par la faune benthique dans le fonctionnement des écosystèmes à nodules, en condition oligotrophique, n'a jusqu'à présent pas fait l'objet d'étude dédiée.** La méiofaune et la macrofaune, protistes et métazoaires confondus, sont dominées par des espèces dépositivores (Hessler and Jumars, 1974; Miljutina et al, 2010; Nozawa et al, 2006). Au sein des assemblages de mégafaune, les taxons mobiles sont dans leur grande majorité des dépositivores de surface et les taxons sessiles des suspensivores (Tilot, 1992).

Les connaissances sur la distribution régionale des espèces en milieu abyssal en général, et dans les zones à nodules en particulier, sont encore trop fragmentaires (Smith et al, 2008;

Smith and Demopoulos, 2003). Dans le Pacifique Nord-Est, le long d'un gradient latitudinal de 0° à 23°N ou le long d'un gradient longitudinal de 125°W à 150°W, de l'ordre de 40% des espèces de polychètes sont cosmopolites (c'est-à-dire présentes sur toutes les stations le long des gradients) tandis que 10% à 40% des espèces sont uniques (c'est-à-dire présentes sur un site uniquement) (Glover et al, 2002; Paterson et al, 1998). Ainsi, **si la diversité locale des assemblages benthiques est élevée, la diversité régionale, à l'échelle du Pacifique Nord-Est, pourrait être relativement faible en comparaison.** (Lamshead et al, 2003) estiment que la diversité régionale des nématodes n'excéderait pas 400 espèces. Les premiers résultats de la campagne océanographique BIONOD (Menot et al, 2012) suggèrent néanmoins que les patrons de distribution et de dispersion sont taxa-spécifiques. Sur deux sites distants de 1300 km dans la zone de Clarion-Clipperton, ils confirment, sur la base d'identifications morphologiques et moléculaires, le caractère cosmopolite d'espèces dominantes des assemblages de polychètes mais soulignent également le caractère unique des assemblages d'isopodes (Janssen et al, 2012). **Les patrons et stratégies de dispersion de la faune abyssale demeurent à l'heure actuelle très mal connus.**

4.3.1.3. Dynamique des écosystèmes

La dynamique des écosystèmes associés aux nodules polymétalliques a été étudiée à travers le suivi d'expérimentations cherchant à évaluer l'impact potentiel d'une exploitation minière (cf. chapitre 5). L'expérimentation réalisée et suivie par l'InterOceanMetal Joint Organization (IOM) dans un secteur oriental de la zone de Clarion-Clipperton a ainsi mis en évidence l'occurrence d'un dépôt massif mais hétérogène de phytodétritus en 1997 qui a profondément affecté la structure et la composition des assemblages de mégafaune et de méiofaune (Radziejewska, 1997 et 2002; Radziejewska and Drzycimski 2001; Radziejewska, Rokicka-Praxmayer et al, 2001). Les abondances de ces groupes fonctionnels ont significativement augmenté en réponse à cet apport trophique. Les patrons de dominance et de diversité des nématodes et des copépodes ont été modifiés, ceux-ci étant dominés respectivement par des desmoscolécidés et des argestidés en 1997, de ux familles rares au cours des périodes d'échantillonnage précédant et suivant cet enrichissement chronique. Dans le bassin du Pérou, le dépôt sporadique et localisé de phytodétritus a également été observé au cours du suivi de l'expérimentation DISCOL (Borowski and Thiel, 1998) ainsi que des variations naturelles et congruentes des abondances de la méiofaune (Ahnert and Schriever, 2001), de la macrofaune (Borowski, 2001) et de la mégafaune (Bluhm, 2001). Ces deux expérimentations ont été réalisées sur des sites relativement proches du continent et encore soumis à des conditions mésotrophiques. Dans la partie centrale de la zone Clarion-Clipperton, le suivi de l'expérimentation russo-américaine BIE n'a pas révélé de fluctuation naturelle du benthos mais ce suivi était à court terme, d'une durée de moins d'un an (Trueblood et al, 1997).

En résumé, si l'étude des zones à nodule a débuté dès les années 1960, seules les dernières campagnes à partir des années 1990 ont bénéficié de l'apport des submersibles permettant une analyse des peuplements en place, à petite échelle, seule approche à même de distinguer les habitats sédimentaires (endofaune majoritaire) et ceux constitués des nodules (épifaune majoritaire), la faune de ces derniers étant nettement moins bien connue.

De façon générale, la faible résolution taxonomique, associée à une faible abondance rendent difficiles la comparaison des résultats dans l'espace (biogéographie) et dans le temps (dynamique temporelle). La méiofaune, compartiment majoritaire à ces profondeurs

($>4\ 000\ m$), est très diversifiée avec cependant quelques espèces qui semblent inféodées aux nodules eux-mêmes. A noter l'importance des protistes dans cette faune endémique, eucaryotes unicellulaires parfois de grande taille dont le rôle fonctionnel reste à préciser. La diversité microbienne, négligée dans les premières études par défaut de moyens d'analyse performants, s'est révélée élevée dans les études les plus récentes, tant dans les sédiments que sur les nodules. La microflore spécifiquement associée aux nodules semble jouer un rôle dans leur formation ou leur évolution mais on manque encore d'analyses fonctionnelles détaillées pour le préciser.

4.3.2. Encroûtements cobaltifères

Comme cela a été précisé au chapitre 2 (voir 2.3.3.2), les encroûtements de manganèse cobaltifères (ou encroûtements hydrogénétiques) – que nous dénommerons encroûtements cobaltifères dans cette partie – sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Ces reliefs sous-marins sont caractérisés par des courants importants générés par leur topographie particulière qui, lorsqu'ils se situent dans des domaines océaniques à faible taux de sédimentation, ont pour effet une absence de sédimentation pendant de très longues durées (millions d'années). La persistance d'un substrat dur affleurant sur de telles périodes de temps va favoriser l'installation d'une faune fixée à longue durée de vie, comme les coraux profonds ou les éponges, d'autant que les conditions courantologiques locales (upwelling) peuvent favoriser l'apport d'éléments nutritifs. Cette faune fixée constituée d'espèces ingénieuses (dont quelques représentants sont illustrés Figure 4-19) constitue généralement une matrice propice à l'installation de nombreuses autres espèces, y compris, lorsque la profondeur n'est pas trop importante, les espèces de poissons visées par la pêche commerciale profonde depuis le milieu des années 1970. Les monts sous-marins constituent donc des oasis de vie isolées par de grandes surfaces de plaine abyssale. **Ainsi, l'étude scientifique des monts sous-marins a été guidée à la fois par des préoccupations fondamentales d'écologie évolutive et des considérations économiques liées aux pratiques halieutiques.**

Malgré une large distribution dans tous les océans (voir la carte générale, Figure 2-4), très peu de ces structures ont été visitées et *a fortiori* étudiées de façon intégrative. La plupart des données sur la faune des monts sous-marins a été obtenue à partir de prélèvements en aveugle depuis la surface, principalement par dragage ou chalutage bathypélagique ou épibenthique profond. Cela a permis d'étudier la diversité de la mégafaune et de la macrofaune des sommets de ces structures, mais pas ou peu les compartiments de plus petite taille : méio- et microfaune. Par ailleurs, si ce type d'échantillonnage permet d'échantillonner les sommets de ces structures (plats ou de faibles pentes), il ne permet que très difficilement d'échantillonner les tombants. Les rares études utilisant des méthodes d'imagerie sous-marine montrent pourtant que ces tombants se caractérisent par des assemblages et des biomasses différentes de celles des sommets.

Au-delà des études sur la composition faunistique, peu de données sont disponibles concernant le fonctionnement et les caractéristiques écologiques de ces communautés. Quelques études intégratives centrées sur des zones ateliers sont disponibles (par exemple le mont sous-marin Condor dont l'étude intégrative fait l'objet du dernier numéro spécial de la revue Deep-Sea Research II, décembre 2013). Parmi ces études écologiques, **très peu d'études utilisent des méthodes d'observations vidéo *in situ*, et encore moins des moyens d'échantillonnage direct par submersible.** Ainsi, nos connaissances sur la structure des

communautés et le fonctionnement de ces écosystèmes, nécessitant d'intégrer les connaissances de tous les compartiments et de les étudier « en place », restent encore très limitées.

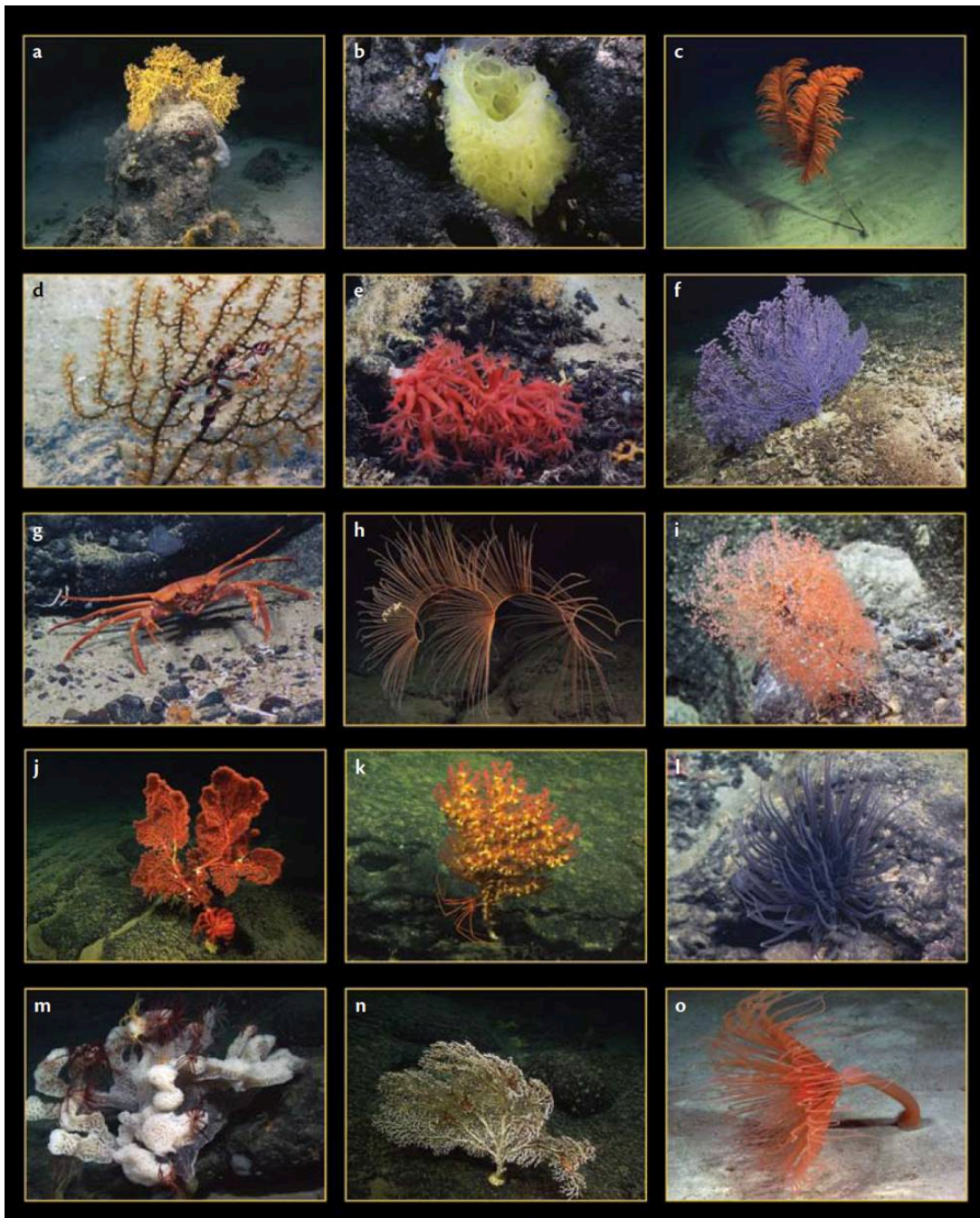


Figure 4-19 Quelques espèces caractéristiques de la mégafaune des monts sous-marins.

Espèces ingénieuses coralliennes et invertébrés associés caractéristiques de la faune des écosystèmes des monts sous-marins New-England et Corner-Rise de l'Atlantique Nord-Est (700 – 2100m (Shank, 2010) : (a) scleractiniaire *Enallopsammia* sp. (b) spongiaire *Farrea* sp (c) antipathaire *Plumapathes* sp. (d) ophiure *Asteroschema clavigera* sur l'octocoralliaire *Paramuricea biscaya* (e) corail *Anthomastus* (f) corail plexaurid violet (g) crabe Geryonidé (h) balanes *Glyptelasma* sp. sur corail *Iridogorgia magnispiralis* (i) crevettes *Bathypalaemonella serratipalma* sur octocoralliaire *Chrysogorgia* sp. (j) étoile Brisingidé et corail *Paragorgia* sp. (k) corail *Paragorgia* sp. avec des zoanthaires jaunes et un pycnogonide (l) anémone Actiniaire (m) spongiaire avec deux espèces de crinoïdes (violette et jaune) (n) corail *Paragorgia* sp. avec une ophiure *Asteroschema clavigera* (o) cérianthaire tubicole. Captures d'images vidéo haute définition acquises par le ROV Hercules (Institute for Exploration, Université de Rhode Island ; campagne DASS).

De ces études, pour la plupart centrées sur des zones singulières, des généralisations ou des hypothèses fortes ont pourtant été proposées au cours du temps. Par exemple, ces structures sont souvent décrites comme associées à une grande biodiversité (par exemple Morato et al, 2010), de fortes biomasses (Thresher et al, 2011), de fortes productivités (Genin, 2004), ou encore à de forts taux d'endémisme (Richer de Forges et al, 2000). Ces caractérisations sont souvent accompagnées d'hypothèses explicatives (isolement insulaire, effet oasis, piège à particules, etc. ...). Les débats dont la littérature se fait l'écho montrent que ces propriétés spécifiques des monts sous-marins et les hypothèses proposées pour les expliquer se fondent sur un trop petit nombre de données pour décrire correctement l'écologie des communautés associées à ces habitats et *a fortiori* la résilience ou la fragilité de ces écosystèmes face aux perturbations anthropiques. L'effort d'étude de ces structures reste largement insuffisant, notamment compte-tenu de l'hétérogénéité de leur géomorphologie et des processus océanographiques qui leur sont associés. Concernant la résilience de ces habitats, l'origine des biomasses parfois importantes du benthos mais aussi des animaux pélagiques reste une question-clé largement débattue. Si la productivité primaire non photosynthétique semble pouvoir être exclue pour les structures sans dégagements de fluides de type hydrothermal ou de suintement froids, l'hypothèse de l'augmentation de la productivité primaire de surface associée à un phénomène de piégeage n'est pas non plus vraiment validée. En effet, parmi les résultats récents, Santos et coll. (2013) montrent une variabilité temporelle forte mais qui ne diffère pas entre le sommet des monts et les domaines océaniques adjacents. La longévité des organismes filtreurs du benthos pourrait en partie également expliquer ces biomasses importantes, même si cette hypothèse reste à tester. Or **la longévité des organismes est un élément important dans l'analyse de la vitesse de restauration d'un habitat et donc pour sa résilience face aux perturbations anthropiques.**

Depuis 2001, un effort de recherche important a néanmoins été consacré à la biodiversité des monts sous-marins, notamment dans le cadre du programme Census of Marine Life (CenSeam). Le site Seamounts Online, établi en 2001 par l'Université de Californie à San Diego, a permis de réunir une partie des observations de faune réalisées sur les monts sous-marins dans tous les océans (Figure 4-20). Malheureusement la maintenance de cette base de données bibliographique semble interrompue depuis 2007, ce qui justifie, d'une façon plus générale, les recommandations qui sont formulées dans ce sens dans le cadre de cette expertise (Voir le chapitre 7, 7.3.1).

Du point de vue fondamental, biologique et écologique, les monts sous-marins sont intéressants par la biodiversité et la productivité biologique qui leur sont associées, avec des corollaires importants en biogéographie et en évolution des habitats profonds. Leur intérêt économique pour la pêche profonde et ses conséquences destructives sur ces écosystèmes ont également motivé nombre d'études sur leur résilience et leur capacité à se restaurer depuis la fin des années 1970 (Pitcher et al, 2007). L'intérêt pour les ressources minérales potentielles que recèlent les encroûtements cobaltifères est plus récent, avec quelques études dès la fin des années 1980 et un accroissement notable des publications après les années 2000.

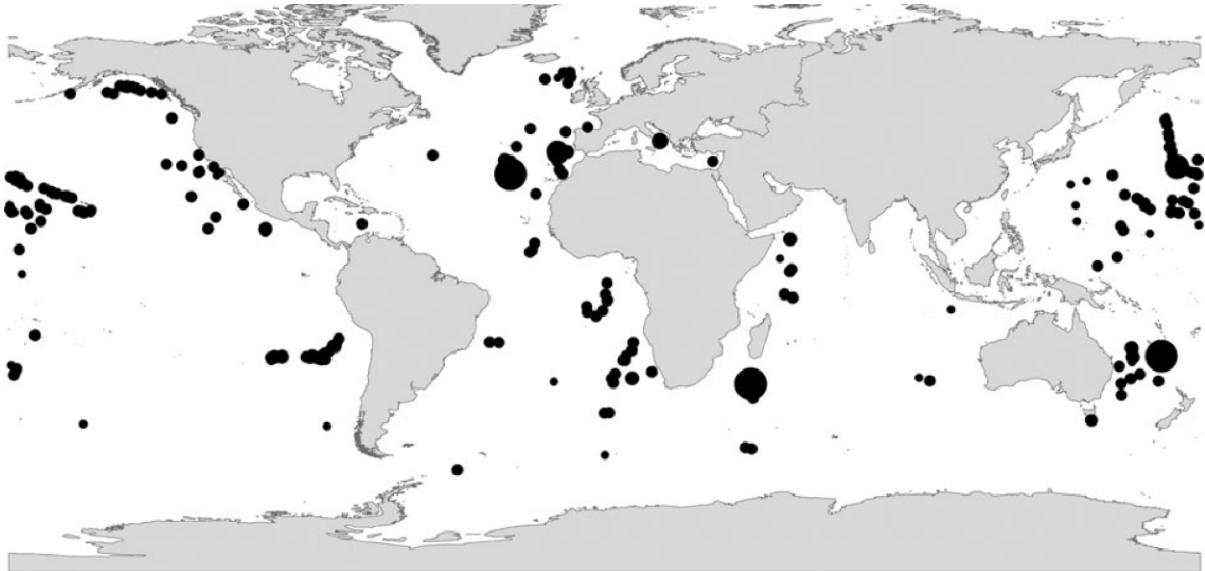


Figure 4-20 Monts sous-marins pour lesquels des données faunistiques sont recensées dans la base de Seamounts Online. Figure issue de Clark et al 2010.

La taille des cercles est proportionnelle au nombre d'espèces enregistrées sur chaque site, de 1 à 1500.

4.3.2.1. Mégafaune et macrofaune

Comme tous les habitats profonds, la composition des communautés benthiques des monts sous-marins est fortement influencée par la profondeur des structures étudiées. D'autres paramètres environnementaux interviennent, mais ils sont étroitement liés à la profondeur, comme la température, la pression, la concentration en oxygène ou l'abondance de nourriture. Cette constatation a très tôt fait émerger l'image des monts sous-marins comme des îles isolées dans le domaine profond, notamment en termes de biogéographie (Hubbs, 1959). Les monts sous-marins pourraient selon cette vision servir de relais (« stepping stones ») à travers les provinces océaniques et favoriser la dispersion des espèces à large échelle, ou au contraire favoriser un isolement biogéographique. Dans ce cas, l'endémicité de la faune des monts sous-marins devrait donc être élevée, ce que plusieurs études ont tenté d'établir, rapportant des taux d'endémicité de 15-20%, et parfois plus de 40% (Richer de Forges et al, 2000; Koslow et al, 2001; Stocks and Hart, 2007). **Mais, à mesure que l'échantillonnage se fait plus intense spatialement et taxonomiquement, plusieurs études ont fait état de taux d'endémicité plus faible qu'initialement estimé, inférieur à 10%** (ex. Samadi et al, 2006; Hall-Spencer et al, 2007; O'Hara, 2007; Castelin et al, 2011), et tout à fait comparables à ce que l'on peut trouver sur les pentes continentales adjacentes à des profondeurs équivalentes. Par exemple, plusieurs espèces de coraux profonds ou de poissons semblent avoir une distribution à très grande échelle géographique, et notamment les espèces ingénieuses de ces écosystèmes comme les coraux *Lophelia pertusa*, *Solenosmilia variabilis*, ou *Madrepora oculata* (Roberts et al, 2006). Cependant dans l'Atlantique Nord-Est, en zone tempérée, bien que présentant un faible taux d'endémisme local, les espèces des monts sous-marins se distinguent de celles trouvées sur les pentes continentales (Hall-Spencer et al, 2007).

Une des causes principales de cette disparité dans les résultats semble être l'hétérogénéité des méthodes et de l'effort d'échantillonnage, ainsi que le degré d'identification taxonomique (Clark et al 2010; Shank, 2010). Les analyses récentes pointent notamment vers le déficit d'échantillonnage des habitats profonds qui conduit à la découverte de nombreuses espèces nouvelles dans des zones géographiques peu explorées où

l'échantillonnage s'est centrée sur des structures singulières. Ce taux important de découvertes taxonomiques conduit à estimer localement de forts taux d'endémisme, que l'extension des explorations aux zones alentours conduit souvent à rejeter.

La nature du substrat, et notamment la présence d'encroûtements cobaltifères, est rarement évoquée dans la plupart de ces études. Les méthodes d'échantillonnage employées ne permettent généralement pas de relier telle ou telle espèce à la présence d'encroûtements, et encore moins à la nature cobaltifère de ceux-ci. Une étude pionnière de Pratt en 1967 précisait juste que coraux et éponges nécessitent un substrat dur pour se fixer et que peu d'organismes étaient présents sur les encroûtements cobaltifères.

Confronté à ce manque flagrant d'information, une étude a été spécifiquement commanditée par l'ISA pour déterminer si la composition faunistique des monts sous-marins était corrélée à la présence d'encroûtements cobaltifères (Clark et al, 2011). Cette étude consiste en une analyse des données de présence/absence d'espèces de la mégafaune identifiables à partir de l'analyse de vidéos prises sur une trentaine de sites de l'archipel hawaïen, situés à des profondeurs variant de 200 à 1800 m environ. Les taxons les mieux représentés étaient ceux attendus, à savoir une majorité de Cnidaires (coraux, gorgones et anémones) et beaucoup de poissons osseux, suivis par les Echinodermes, Crustacés et Eponges (Figure 4-21).

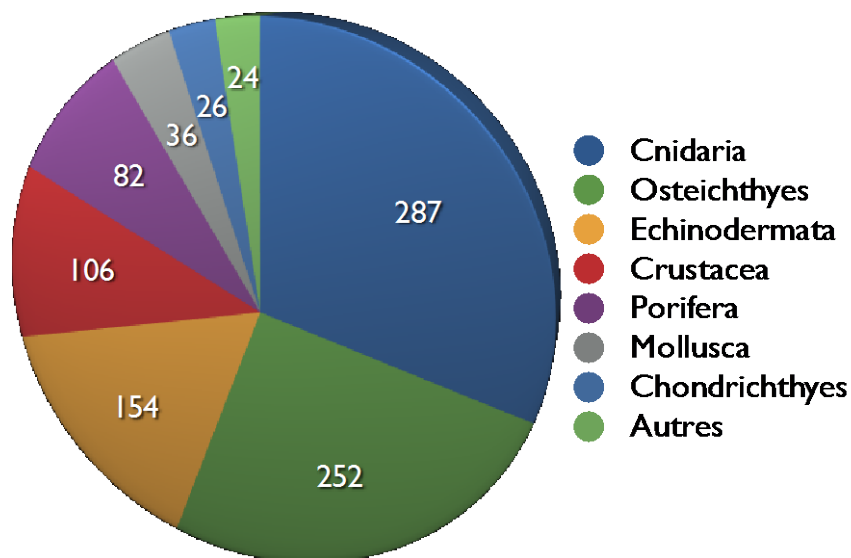


Figure 4-21 Répartition taxonomique de la mégafaune des monts sous-marins de l'archipel hawaïen, d'après les données de Clark et al, 2011.

Sur un peu moins de 1000 espèces de la mégafaune identifiées, plus de la moitié sont trouvées indifféremment sur des monts sous-marins avec ou sans encroûtements cobaltifères (Figure 4-22). La conclusion de ce rapport est qu'il n'y a pas de différence significative dans la composition des communautés de monts sous-marins avec ou sans encroûtements cobaltifères.

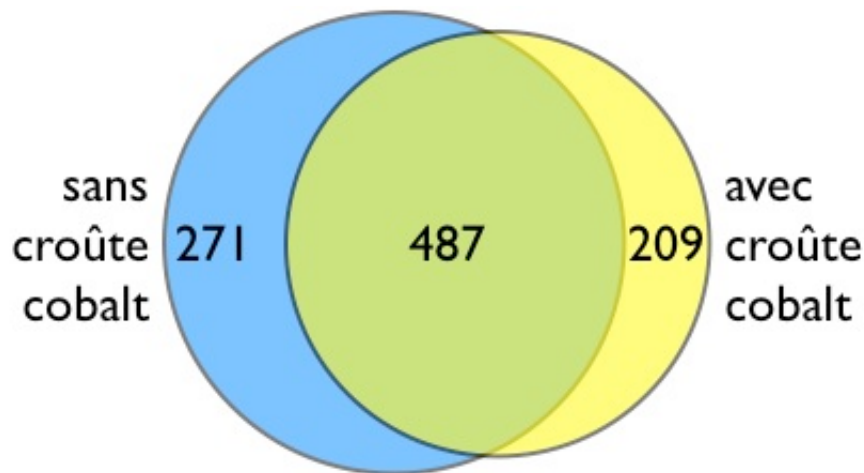


Figure 4-22 Analyse des taxons associés à des sites potentiellement cobaltifères ou non, d'après les données de Clark et al, 2011.

L'intersection montre qu'une majorité d'espèces s'établit indifféremment sur les sites, qu'ils soient potentiellement cobaltifères ou non.

Et, sans surprise, c'est la profondeur qui distingue le mieux les différentes communautés animales, rassemblant les sites peu profonds (<350m), les sites intermédiaires et les sites profonds (>750m). Mais, comme les auteurs le soulignent, une analyse plus rigoureuse devrait tenir compte de l'abondance de ces espèces, et également de la composition du substrat.

Cependant, cette vision est contredite par une étude récente (Schlacher et al, 2013). Cette étude, basée sur un suivi vidéo sur un transect comprenant des structures riches et pauvres en cobalt, montre en effet une hétérogénéité dans la composition faunistique en fonction de la richesse du substrat en cobalt mais pas d'appauvrissement. **Ce résultat montre que, contrairement à l'idée généralement admise, la définition d'aires marines protégées sur des monts sous-marins sans encroûtements n'est pas une garantie de conservation de la diversité biologique associée à ces structures particulières. Ce résultat nouveau souligne le manque de données et montre la nécessité de nouvelles campagnes d'échantillonnage dédiées avec un plan d'échantillonnage et des moyens techniques permettant de caractériser de façon appropriée ces structures en se fondant sur des jeux de paramètres complets et plus homogènes autorisant un traitement statistique adéquat.**

4.3.2.2. Méiofaune des monts sous-marins à encroûtements

Peu d'études concernent la description des assemblages de méiofaune sur les monts sous-marins et elles portent essentiellement sur les parties sédimentées des monts sous-marins, donc dépourvues d'encroûtements (ex. Thistle and Levin, 1998; Thistle et al, 1999; Gad and Schmike, 2004). Ce n'est pas surprenant quand on sait que l'étude de ce compartiment sur les substrats durs nécessite de prélever l'ensemble de la communauté animale associée aux espèces de la mégafaune et de la macrofaune. Les techniques de dragage et de chalutage impliquent un lessivage important à la remontée des échantillons qui ne permettent pas d'étude sérieuse du compartiment méiofaune. Au total, seuls huit monts sous-marins ont été explorés pour ce compartiment (George, 2013). Ces études ont mis en évidence des espèces nouvelles, et donc inconnues ailleurs, sachant qu'« ailleurs » n'a quasiment pas été exploré. La compilation de ces données suggère néanmoins une diversité plus grande sur les sommets qu'à la base de ces structures. Ce résultat est appuyé par une étude récente (Zeppilli et al, 2013) qui montre une hétérogénéité dans la richesse spécifique et l'abondance relative des espèces entre la surface, les tombants et la base du mont sous-marin « Condor ». En effet, la

diversité est plus grande au sommet alors que l'abondance est plus grande sur les flancs et à la base. Cette étude suggère que la structure spatiale serait expliquée en grande partie par la taille des particules sédimentaires qui elle-même résulte des paramètres océanographiques.

4.3.2.3. *Microbiologie des monts sous-marins à encroûtements*

Comme mentionné plus haut, la littérature scientifique spécifiquement consacrée à la microbiologie des monts sous-marins est extrêmement limitée. Moins d'une trentaine d'articles traitent véritablement de ce sujet. Et en réalité, la grande majorité de ces articles concernent les monts sous-marins actifs (Loihi, Suiyo, ...), là où une circulation hydrothermale existe. La diversité microbienne de ces sites actifs, dont les fluides sont riches en éléments réduits (méthane, sulfure, hydrogène, ...), se rapproche alors naturellement de celle des sites hydrothermaux à l'axe des dorsales. Voir par exemple le numéro spécial de *Geomicrobiology Journal*, volume 26(8) en 2009 édité par David Emerson.

Quelques volcans moins actifs, éloignés des dorsales, peuvent néanmoins conserver une circulation souterraine significative de fluides en contact avec les roches mantelliques (Wheat et al, 2004). Ces fluides pourraient alimenter des communautés de micro-organismes sur le fond ou sous la surface (Cowen et al, 2003; Huber et al, 2006). Plus localement, les conditions hydrologiques peuvent résulter en des conditions physico-chimiques particulières qui pourraient potentiellement entretenir des communautés microbiennes originales (Lavelle and Mohn, 2010). Mais leur étude nécessite une exploration, une analyse et un échantillonnage à petite échelle via des engins submersibles.

Enfin, une étude récente montre que les encroûtements cobaltifères sont associés à une diversité microbienne originale marquée par une faible diversité des archées (Liao et al, 2011). Cette analyse montre que la flore présente sur ces encroûtements est impliquée dans le cycle du soufre, de l'azote et des métaux. Comme pour les nodules polymétalliques (Wu et al, 2013), les encroûtements cobaltifères pourraient donc résulter au moins en partie de processus biogéniques (voir également 4.3.1 et 4.4).

En définitive, la connaissance de la diversité de la macro-faune des monts sous-marins a certes bien progressé ces dix dernières années, ce qui n'est pas le cas des compartiments meiofaune et microbiens dont l'étude n'est encore qu'ébauchée. Les résultats les plus récents tendent à modérer le caractère exceptionnel de ces structures en termes de biodiversité et d'endémisme. Cependant, le lien des espèces et communautés décrites avec les encroûtements cobaltifères est rarement établi, la fragmentation de ceux-ci sur les monts sous-marins – qui doit être mieux caractérisée - nécessitant une approche à petite échelle qui fait encore largement défaut.

4.3.3. Sulfures hydrothermaux

L'abondance de la littérature sur la faune et la microbiologie des sources hydrothermales profondes actives, mais aussi et surtout la différence d'approches des études faunistiques d'une part, basées sur des analyses taxonomiques et d'assemblages d'espèces sur les différents sites hydrothermaux explorés autour du globe, et des études microbiologiques d'autre part, basées sur les différents habitats et métabolismes quelle que soit la localisation géographique des sites, nous a amené à présenter l'état de l'art sur les sulfures hydrothermaux en séparant zoologie et microbiologie.

Dans la partie qui suit (4.3.3.1) la **diversité des micro-organismes procaryotes et eucaryotes** est brièvement présentée avant de détailler la diversité métabolique des micro-organismes qui sous-tend le fonctionnement microbiologique des sites de sulfures hydrothermaux, puis les aspects de colonisation microbienne et d'interactions avec les minéraux, d'un intérêt certain dans le contexte de cette étude.

La partie suivante (4.3.3.2) se focalise sur la **faune** en abordant sa **diversité**, sa **distribution spatiale** et les **facteurs structurant** ces assemblages dans les diverses zones géographiques explorées à ce jour. **Les assemblages faunistiques sont en effet très contrastés à l'échelle globale, les sources hydrothermales étant réparties en provinces biogéographiques (Van Dover et al, 2002; Bachraty et al, 2009; Moalic et al, 2012) bien caractérisées.**

La dernière partie (4.3.3.3) s'intéresse à la **dynamique temporelle** sur les quelques zones où celle-ci a pu être étudiée, que ce soit par des visites répétées ou suite à des accidents éruptifs majeurs.

En revanche, **l'immense majorité de la littérature concerne les sites actifs** sur lesquels l'attention des chercheurs s'est portée depuis leur découverte. Celle-ci, en 1977, a constitué une **véritable révolution conceptuelle en biologie et écologie fondamentales par l'originalité de la production primaire chimiosynthétique qui sous-tend ces écosystèmes.** L'endémicité importante de la faune associée a focalisé l'intérêt scientifique ces trente dernières années, aux dépens des zones périphériques inactives. Comme indiqué au chapitre 2, ce sont ces dernières qui sont identifiées comme la cible privilégiée pour une exploitation des ressources minières des sulfures hydrothermaux. On trouvera néanmoins quelques indications sur la microbiologie de ces zones inactives à la fin de la partie 4.3.3.1 et ça et là dans la partie 4.3.3.2. Pour autant, l'imbrication des zones actives et inactives peut concerner des échelles relativement restreintes et ne permet pas d'exclure que certaines communautés des zones actives soient impactées par les activités d'exploration et d'exploitation des zones inactives.

4.3.3.1. *Microbiologie des sources hydrothermales profondes*

Dès la découverte des écosystèmes hydrothermaux à la fin des années 1970, les études de microbiologie, réalisées par les équipes américaines, principalement, avaient permis d'établir le rôle des micro-organismes dans la chimiosynthèse (Jannasch, 1985) en tant que producteurs primaires notamment dans le cadre d'associations symbiotiques avec la macrofaune (Cavanaugh et al, 1981; Felbeck, 1981) et d'expliquer ainsi le développement des communautés animales de fortes densités au voisinage des émissions de fluides, malgré la présence de conditions physico-chimiques *a priori* peu propices à la vie (température élevée, présence d'éléments toxiques, faible disponibilité en oxygène).

Rapidement la recherche de micro-organismes vivant à haute (voire à très haute) température dans cet écosystème a focalisé l'attention des microbiologistes. En effet, la découverte des sources hydrothermales est contemporaine de la description de nombreux micro-organismes thermophiles isolés d'environnements chauds terrestres et littoraux. Parmi ces derniers, un grand nombre appartiennent au domaine des *Archaea* « le troisième domaine du vivant » dont la mise en évidence récente, à l'époque, était due aux travaux pionniers de Karl Woese (Woese and Fox, 1977; Woese et al, 1990). Ces travaux ont révolutionné notre compréhension du monde des procaryotes en mettant à la disposition des microbiologistes des outils de taxonomie moléculaire puissants qui allaient permettre de classer les micro-organismes selon leurs liens de parentés en utilisant la molécule d'ARN ribosomal 16S comme indicateur phylogénétique et de détecter dans les échantillons naturels (grâce au développement des techniques de biologie moléculaire) une diversité microbienne jusque-là insoupçonnée.

Ainsi, au début des années 1990, le nombre de micro-organismes isolés des écosystèmes hydrothermaux sous-marins profonds purifiés et décrits se limitait à quelques espèces sulfo-oxydantes du genre *Thiomicrospira* (Ruby et al, 1981; Ruby and Jannasch, 1982; Jannasch et al, 1985) ainsi que quelques espèces thermophiles : des *Archaea* méthanogènes isolées à partir d'échantillons du bassin de Guaymas comme *Methanococcus jannaschii* (Jones et al, 1983) et *Methanopyrus kandleri* (Burggraf et al, 1991; Huber et al, 1989; Kurr et al, 1991), des *Archaea* hétérotrophes anaérobies sulfo-réductrice comme *Staphylothermus marinus*, isolée d'une source hydrothermale de la Ride du Pacifique Oriental (Fiala et al, 1986), deux souches appartenant au genre *Desulfurococcus* (Jannasch et al, 1988) et une *Thermococcale* (Pledger and Baross, 1989).

Les autres espèces thermophiles et hyperthermophiles décrites alors provenaient essentiellement de sources hydrothermales côtières, de solfatares ou de sources thermales terrestres (Brock et al, 1972; Fiala and Stetter, 1986; Huber et al, 1986; Huber et al, 1989; Huber et al, 1989; Jannasch et al, 1988; Kawasumi et al, 1984; Lauerer et al, 1986; Miroshnichenko et al, 1989; Segerer et al, 1988; Stetter et al, 1981; Windberger et al, 1989; Zeikus and Wolfe, 1972; Zillig et al, 1983; Zillig et al, 1983; Zillig et al, 1986; Zillig et al, 1987).

Structure des communautés microbiennes

Les micro-organismes vivant dans les écosystèmes hydrothermaux océaniques profonds, sont très diversifiés en termes d'espèces, de métabolismes et de préférences physico-chimiques (thermique, de salinité et de pH). Malgré les caractéristiques intrinsèques aux systèmes hydrothermaux - instabilité des émissions de fluide, gradients physico-chimiques abrupts, variabilité intra-sites - différents types d'habitats des micro-organismes ont été identifiés (Karl, 1995). Cette typologie demeure toutefois théorique car les micro-organismes ne sont pas nécessairement inféodés à un type d'habitat. Cependant, elle permet d'orienter les stratégies d'échantillonnage et de décrire la structure spatiale des peuplements microbiens. Ces habitats sont :

- **le fluide hydrothermal** où les populations microbiennes vivent sous forme libre ou attachée aux particules émises. Selon certaines études, ces micro-organismes seraient issus d'une biosphère souterraine, présente sous les cheminées hydrothermales (Deming and Baross, 1993; Gold, 1992; Takai et al, 2004)

- **la structure minérale poreuse des édifices** où les micro-organismes peuvent vivre fixés (Harmsen et al, 1997; Schrenk et al, 2003; Takai et al, 2001)
- **la surface des édifices, des animaux ou des sédiments** exposés au fluide où les micro-organismes peuvent se développer de façon libre ou au sein de biofilm ou tapis microbiens (Gerasimchuk et al, 2010; Emerson et al, 2007; Moyer et al, 1995; Crépeau et al, 2011; McKay et al, 2012; Jannasch et al, 1989)
- **le panache**, « nuage » d'eau de mer chaude enrichie en minéraux présents dans le fluide, qui se disperse dans l'océan profond depuis une source hydrothermale et où des communautés microbiennes peuvent vivre sous forme libre ou attachée à des particules (Dick et al, 2006; Dick and Tebo, 2010; Sunamura et al, 2004; Winn et al, 1986; Sylvan et al, 2012)
- **les sédiments hydrothermaux**, au travers desquels le fluide hydrothermal diffuse; comme au niveau du bassin de Guaymas (Teske et al, 2002; Biddle et al, 2012; Bowles et al, 2012; Dhillon et al, 2003)
- et enfin, **la faune hydrothermale via la colonisation de la surface des métazoaires ou via des associations symbiotiques** (ectosymbiose ou épibiose, endosymbiose).

Les écosystèmes hydrothermaux sont ainsi constitués d'une très grande diversité d'habitats dans lesquels des micro-organismes présentant une très grande diversité de métabolismes mais également de préférendums physiologiques peuvent se développer : ainsi les micro-organismes des écosystèmes hydrothermaux pourront être classés en fonction de leur préférendums, vis-à-vis :

- de la température : des psychrophiles, mésophiles, thermophiles et hyperthermophiles
- de la pression : des piézosensibles, piézotolérants ou piézophiles obligatoires
- du pH : des acidophiles, des neutrophiles ou des alcalinophiles

Diversité des Procaryotes

De nombreuses études, menées au niveau des écosystèmes hydrothermaux, ont permis l'isolement et la description de nouvelles espèces et de nouveaux genres appartenant aussi bien aux domaines archéens que bactériens. Les tableaux des annexes 4 et 5 présentent la liste des micro-organismes procaryotes isolés et décrits des écosystèmes hydrothermaux sous-marins profonds. Pour tous ces micro-organismes, des aspects du métabolisme ont été décrits, tels que les sources de carbone, les donneurs et accepteurs d'électrons, les températures optimales de croissance...

Des études de diversité moléculaire du gène codant pour l'ARNr 16S ainsi que l'étude de certains gènes fonctionnels ont également apporté des informations complémentaires sur la structure des communautés procaryotes de ces écosystèmes. Ainsi de nombreux inventaires ont été réalisés sur des échantillons de fluides hydrothermaux, de fragments de fumeurs noirs, de diffuseurs et de sédiments provenant de sites actifs et ont révélé une diversité phylogénétique très importante. Dans l'ensemble, les analyses phylogénétiques portant sur les communautés archéennes présentes au niveau des cheminées hydrothermales ont révélé la présence d'une très importante diversité d'*Archaea* appartenant aux *Thermococcales*, *Méthanococcales*, *Méthanopyrales*, *Archaeoglobales*, *Desulfuroccales* et *Ignococcales* (Huber et al, 2002; Nercessian et al, 2004; Nercessian et al, 2003; Reysenbach et al, 2000; Schrenk et al, 2003; Takai and Horikoshi, 1999; Takai et al, 2001). Les communautés bactériennes semblent coloniser de nombreuses niches de l'écosystème hydrothermal. Les *Epsilon Proteobacteria* sont particulièrement dominantes et diverses. Elles sont détectées dans des habitats variés : les zones de mélange entre le fluide hydrothermal et l'eau de mer

(Corre et al, 2001; Huber et al, 2003; Reysenbach et al, 2000), les sédiments hydrothermaux (Teske et al, 2002) et les tapis microbiens (Longnecker and Reysenbach, 2001; Moyer et al, 1995). Des *Epsilon Proteobacteria* sont également trouvées en association épi-symbiotiques avec des métazoaires (Lopez-Garcia et al, 2002; Polz and Cavanaugh, 1995). Malgré leur présence et leur distribution importantes, la physiologie de ces micro-organismes est peu connue, de par la difficulté à les isoler en culture. Un autre groupe de chimiolithotrophes, représenté par les *Aquificales*, utilise le même couple d'accepteurs et donneurs d'électrons que les *Epsilon Proteobacteria* (Nakagawa and Fukui, 2003). La diversité bactérienne comprend également des espèces des groupes des *Firmicutes*, *Verrucomicrobia*, *Thermales* et *CFB*. Les *Verrucomicrobia* ont été détectées dans de nombreux sites hydrothermaux (Alain et al, 2002; Lopez-Garcia et al, 2002; Teske et al, 2002). Des clones de bactéries vertes non-sulfureuses ont également été trouvés dans les études de diversité (Alain et al, 2002; Lopez-Garcia et al, 2002; Teske et al, 2002). Plus récemment, plusieurs études ont montré la diversité des bactéries réduisant les sulfates (*SRB*) en utilisant des approches fonctionnelles (Dhillon et al, 2003; Hoek et al, 2003; Nakagawa et al, 2004).

Diversité des eucaryotes

Si, dans un premier temps, la microbiologie des écosystèmes hydrothermaux s'est principalement intéressée aux procaryotes, quelques études concernant les micro-organismes eucaryotes ont récemment été réalisées. La détection de séquences de gènes appartenant à différentes lignées eucaryotes a révélé des communautés complexes et a permis de formuler des hypothèses concernant les rôles écologiques des brouteurs, détritivores, symbiotes ou parasites (Edgcomb et al, 2002; Sauvadet et al, 2010). Une image aussi variée des communautés de protistes a été obtenue sur des sites hydrothermaux du Pacifique et de la dorsale médio-atlantique, où d'abondantes signatures d'eucaryotes microbiens ont été détectées dans les zones de mélange fluide/eau de mer, les sédiments hydrothermaux, et sur des dispositifs de colonisation déployés sur ces sites (Lopez-Garcia, 2003). Les Ciliés semblent être des habitants communs à un grand nombre d'environnements extrêmes, y compris les habitats hydrothermaux.

La mise en évidence de nombreuses séquences fongiques a été obtenue sur différents sites hydrothermaux (Bass, 2007), à proximité de la surface de sédiments des sources hydrothermales, prélevés dans le bassin de Guaymas (golfe de Californie) (Edgcomb, 2002) à partir d'eau de mer, de micro-colonisateurs et des échantillons de sédiments sur des sites hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique (Lopez-Garcia, 2003; Lopez-Garcia, 2007; Sauvadet, 2010). Enfin, des séquences fongiques ont été également récupérées à partir de bivalves *Bathymodiolus azoricus* et *Calyptogena magnifica* (Le Calvez, 2009; Sauvadet, 2010). Les communautés fongiques dans les sources hydrothermales semblent être dominées par les ascomycètes et les basidiomycètes. Le groupe nommé "champignons hydrothermaux et/ou anaérobie" (Lopez-Garcia, 2007) est régulièrement détecté dans les sources hydrothermales, mais ce groupe a également été détecté dans d'autres environnements, tels que les sédiments profonds (Edgcomb, 2011).

Les analyses basées sur la culture ont conduit à l'isolement d'espèces connues, mais également de nouvelles espèces de levures (Burgaud, 2009; Burgaud, 2011; Gadanho, 2005; Nagahama, 2006) et de champignons filamenteux (Burgaud, 2009). Les deux seules espèces de champignons endémiques, cultivées à partir des sources hydrothermales et décrites à ce jour, sont *Rhodotorula pacifica*, isolée à partir d'échantillons de sédiments prélevés à une profondeur de 991m au nord-ouest de l'océan Pacifique (Nagahama, 2006), et *Candida oceani*

(Burgaud, 2011) isolé à partir d'échantillons d'eau à proximité du site Menez Gwen (MAR) et de coraux prélevés à proximité du site Rainbow (MAR).

De nombreuses souches fongiques ont été cultivées à partir d'échantillons prélevés sur les sites de l'Atlantique et du Pacifique mais les conditions de culture employées ne permettent pas l'isolement des chytrides ou des représentants des « champignons hydrothermaux et/ou anaérobies » puisque seuls des ascomycètes et basidiomycètes ont été récupérés (Burgaud, 2009).

Les rôles écologiques des champignons dans les sources hydrothermales sont loin d'être résolus, mais ils pourraient avoir des modes de vie parasitaire ou saprophytique. Par exemple, les champignons isolés à partir de moules hydrothermales semblent être des parasites facultatifs (Burgaud, 2009; Van Dover, 2007). Si la présence de chytrides a été révélée en utilisant des méthodes moléculaires, aucun représentant n'a été isolé à ce jour, ce qui pourrait s'expliquer par un mode de vie parasitaire strict. Des modes de vie saprophytes pourraient également avoir lieu, car les champignons sont souvent extraits de micro-environnements riches en matière organique, comme la face interne des branchiostegites de crevettes et de l'intérieur ou de l'extérieur de moules hydrothermales (Burgaud et al, 2010).

Fonctionnement et dynamique des communautés microbiennes

A l'inverse des micro-organismes phototrophes qui utilisent la lumière comme source d'énergie, les procaryotes chimiotrophes vont, eux, utiliser des composés chimiques *via* des réactions d'oxydo-réduction comme source d'énergie. Du fait du mélange entre un fluide hydrothermal réduit, riche en gaz dissous (H_2S , H_2 , CH_4) et en métaux (Fe, Mn) et une eau de mer oxygénée contenant des sulfates et des nitrates, une grande variété de donneurs et d'accepteurs d'électrons est disponible pour alimenter divers métabolismes microbiens

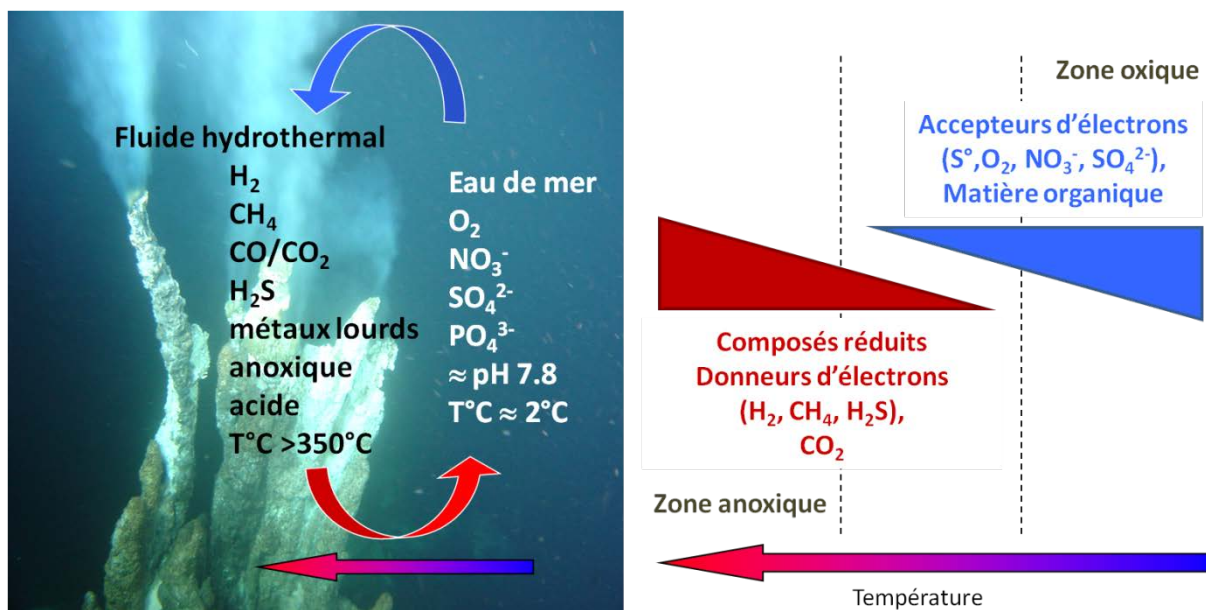


Figure 4-23 Schéma illustrant le mélange entre le fluide hydrothermal réduit, riche en gaz dissous (H_2S , H_2 , CH_4) et en métaux (Fe, Mn) et l'eau de mer oxygénée qui contient des sulfates et des nitrates. © N. Callac 2013.

Ces donneurs et accepteurs d'électrons sont disponibles pour les communautés microbiennes.

Les métabolismes microbiens connus ou susceptibles d'exister dans les écosystèmes hydrothermaux marins sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau 4-1). Seuls les métabolismes dissimilatifs énergétiques faisant intervenir le soufre, le fer, et l'azote sont présentés. Des micro-organismes impliqués dans une ou plusieurs des voies métaboliques listées ont été isolés des écosystèmes hydrothermaux à l'exception de ceux impliqués dans l'AOM (oxydation anaérobie du méthane) et dans la réaction ANAMMOX (oxydation anaérobie de l'ammonium). En effet, à ce jour, seules des signatures moléculaires (gènes codant les ARNr 16S ou gènes de fonction), l'identification de lipides spécifiques (ladderane pour l'ANAMMOX) et des mesures d'activité ont permis de détecter ces métabolismes dans divers systèmes hydrothermaux.

Tableau 4-1 Métabolismes microbiens connus et suspectés, associés aux sources hydrothermales océaniques. Adapté de Karl, 1995; Madigan et Martinko, 2002 et Orcutt et al, 2011.

Métabolisme	Donneur d'électron	Accepteur d'électrons	Source de carbone	de	Organismes	Groupes microbiens représentatifs
Respiration aérobie	[CH ₂ O] _n	O ₂	[CH ₂ O] _n		Hétérotrophes aérobie	<i>Aeropyrum</i> sp., <i>Thermus</i> sp. <i>Rhodothermus</i> sp.
Oxydation de l'hydrogène	H ₂	O ₂	CO ₂		Hydrogène-oxydants	<i>Persephonella</i> sp., <i>Proteobacteria</i> , <i>Nitrospira</i> , <i>Thaumarchaeota</i> (groupe 1a)
Nitrification	NH ₃ , NO ²⁻	O ₂	CO ₂		Nitrifiants	<i>Proteobacteria</i> , <i>Nitrospira</i> , <i>Thaumarchaeota</i> (groupe 1a)
Méthanotrophie, méthylothrophie	CH ₄ , CO et autres composés en C1	O ₂	CO ₂		Méthanotrophes, méthylothrophes	<i>Gamma-</i> (Type I) et <i>Alpha-</i> (Type II) <i>proteobacteria</i>
Oxydation de composés soufrés	HS ⁻ , S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻ , S ₄ O ₆ ²⁻	O ₂	CO ₂		Sulfo-oxydants	<i>Gamma-</i> , <i>Epsilon-proteobacteria</i> , <i>Aquificales</i> (<i>Persephonella</i>)
Oxydation du fer ferreux	Fe(II)	O ₂ , NO ₃ ²⁻	CO ₂		Fer-oxydants	<i>Zeta-</i> , <i>Alpha</i> , <i>Beta-Proteobacteria</i>
Oxydation du manganèse	Mn(II)	O ₂ , NO ₃ ²⁻	CO ₂		Manganèse-oxydants	<i>Alpha-</i> , <i>Gamma-proteobacteria</i>
Dénitrification	[CH ₂ O] _n , H ₂	NO ₃ ²⁻	CO ₂ [CH ₂ O] _n	ou	Dénitrifiants	<i>Epsilon-proteobacteria</i> , <i>Aquificales</i> , <i>Caldithrix</i> , <i>Firmicutes</i>
Oxydation anaérobie de l'ammonium	NH ₄ ⁺	NO ₃ ²⁻ (NO ²⁻ , Fe(III)?)	CO ₂		ANAMMOX	Planctomycetes ANAMMOX
Sulfo-réduction	[CH ₂ O] _n , H ₂	S ⁰	CO ₂ [CH ₂ O] _n	ou	Sulfo-réducteurs	<i>Desulfobacteriales</i> , <i>Epsilon-proteobacteria</i> , <i>Ignicoccales</i> , <i>Desulfurococcales</i>
Sulfato-réduction (Thiosulfate-réduction)	[CH ₂ O] _n , H ₂	SO ₄ ²⁻ , (S ₂ O ₃ ²⁻)	CO ₂ [CH ₂ O] _n	ou	Sulfato-réducteurs	<i>Deltaproteobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Archaeoglobus</i> sp.

Méthanogénèse		H ₂	CO ₂ , composés en C1, acétate	CO ₂	Méthanogènes	<i>Méthanoarchaea</i> (<i>Methanococcus</i> sp., <i>Methanopyrus</i> sp.)
Oxydation du méthane	anaérobie	CH ₄	SO ₄ ²⁻ , (NO ₃ ²⁻ Fe(III)?)	CO ₂ ou CH ₄	Méthanotrophes	ANME avec ou sans syntrophes
Réduction ferrique	du fer	[CH ₂ O] _n , H ₂	Fe(III) oxide	CO ₂ [CH ₂ O] _n	ou Ferri-reductrices	<i>Geoglobus</i> sp., <i>Deferribacter</i> sp., <i>Aciduliprofundum</i> sp.
Réduction manganèse	du	[CH ₂ O] _n	MnO ₂	CO ₂	Manganèse- réductrices	<i>Deferribacter</i> sp.
Fermentation		[CH ₂ O] _n	[CH ₂ O] _n	[CH ₂ O] _n	Hétérotrophes anaérobies fermentaires	et <i>Thermococcales</i> , <i>Thermotogles</i> , <i>Pyrodictium</i> sp., <i>Firmicutes</i>
Dismutation du soufre		S ⁰ dismuté en sulfure et en thiosulfate		CO ₂	Disproportionateurs	<i>Thermosulfurimonas</i> <i>dismutans</i> , <i>Dissulfuribacter</i> <i>thermophilus</i>

Parmi les principaux cycles biogéochimiques présents au niveau de l'écosystème hydrothermal, on re trouve principalement les cycles du fer, de l'azote, du carbone et du soufre. Pour chacun de ces cycles, un état des lieux des connaissances de leur fonctionnement dans l'écosystème hydrothermal et principalement à haute température est présenté.

Cycle du Fer

En contexte hydrothermal, des processus abiotiques impliquant le Fe(II) se produisent lors du mélange fluide hydrothermal-eau de mer et conduisent à la formation de précipités insolubles de FeS (Rickard, 1995; Vazquez et al, 1989; Breier et al, 2012) et de précipités d'oxyde-hydroxydes de fer (Breier et al, 2012; Statham et al, 2005; Schmidt et al, 2009). D'un autre côté, *via* des processus d'altération abiotique (eau de mer, réaction chimique) (Staudigel and Hart, 1983; Wheat and Mottl, 2000) et/ou microbien (Bach and Edwards, 2003; Rouxel et al, 2003), certains minéraux contenant du Fe(II) peuvent être altérés et ainsi libérer du fer ferreux. Ce phénomène est connu notamment au niveau des verres basaltiques de la croûte océanique. A ce jour, une seule *Archaea* hyperthermophile (optimum 85°C) anaérobie et neutrophile, *Ferroglobus placidus*, isolée d'une source hydrothermale côtière en Italie, est connue pour être capable d'oxyder le fer ferreux en utilisant les nitrates comme accepteur d'électrons (Hafenbradl et al, 1996). Elle est capable d'oxyder le fer ferreux en condition anaérobie à pH neutre et à 85°C. *Paleococcus ferrophilus*, quant à elle, requiert du fer ferreux Fe²⁺ et du soufre élémentaire S⁰ pour sa croissance mais n'utilise pas le fer ferreux comme accepteur ou donneur d'électrons (Takai et al, 2000). A de plus faibles températures (entre 10 et 30°C), Emerson et coll. ont isolé d'un tapis riche en fer du volcan sous-marin Loihi une bactérie ferro-oxydante : *Mariprofundus ferrooxydans* PV-1, première représentante du nouveau groupe des *Zetaproteobacteria* (Emerson et al, 2007; Emerson and Moyer, 2002). Elle est capable d'oxyder le Fe(II) en micro-aérophilie et à pH neutre.

Des séquences affiliés à *Ferroglobus placidus* ont aussi été détectées dans des échantillons issus d'un module de colonisation (vent cap) déployé pendant 5 jours au niveau d'un édifice hydrothermal du site Snake Pit sur la dorsale médio-atlantique (Reysenbach et al, 2000) ainsi que dans des échantillons provenant d'une culture d'enrichissement réalisée à 85°C en utilisant le fluide hydrothermal dilué comme milieu de culture et un fragment de flange

hydrothermale active collectée dans le bassin de Guaymas comme inoculum (Callac, 2013; Callac et al, 2013 soumis). Des séquences affiliées aux *Zetaproteobacteria* ont également été trouvées dans les sédiments hydrothermaux du bassin de Guaymas (Dhillon et al, 2003); dans des sédiments hydrothermaux des Tonga (Forget et al, 2010), dans des tapis microbiens d'édifices hydrothermaux des Mariannes (Kato et al, 2009) ou encore dans les zones riches en fer du volcan sous-marin Loihi (Rassa et al, 2009; Singer et al, 2013). Des études récentes ont également mis en évidence la présence de *Zetaproteobacteria* associées à des dépôts d'oxydes de fer, dans la cavité branchiale de la crevette *Rimicaris exoculata* (Jan, 2012; Jan et al, 2013 soumis). Toutefois, malgré leur présence dans les banques de clones d'environnements hydrothermaux, aucun micro-organisme ferro-oxydant thermophile n'a été isolé à ce jour (Figure 4-24).

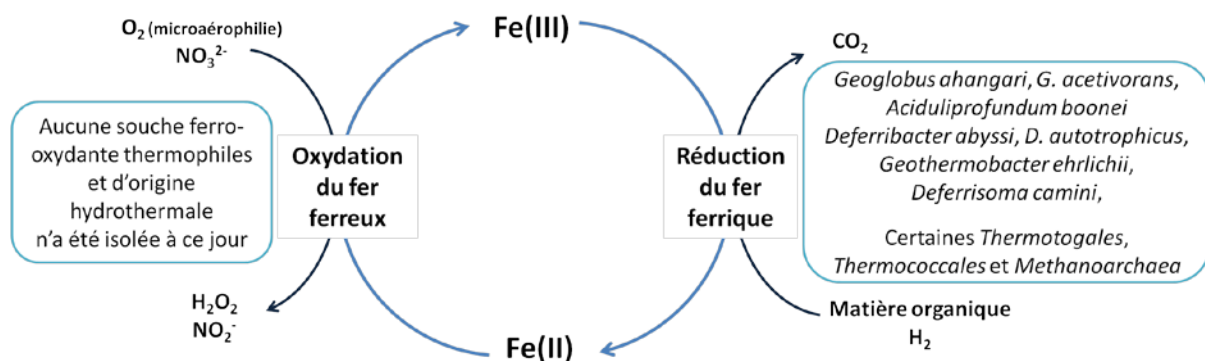


Figure 4-24 Cycle du Fer et souches (hyper)thermophiles isolées d'environnements hydrothermaux, impliqués dans ce cycle © N. Callac, 2013.

Si la réduction du Fer (III) a été mise en évidence dans les édifices hydrothermaux, notamment par l'isolement d'espèces telles que *Geoglobus*, *Deferribacter* et *Geothermobacter*, aucun micro-organisme thermophile oxydant le Fer(II) n'a été formellement détecté, décrit et isolé (Figure 4-24). Toutefois, la présence en banque de clones de séquences affiliées à *Ferroglobus placidus* (Reysenbach et al, 2000; Callac et al, 2013), seul représentant thermophile connu à ce jour capable d'oxyder en anaérobiose le fer(II), pourrait être considéré comme un indice d'oxydation microbienne anaérobie du fer ferreux. Il est aussi probable que l'oxydation du fer ait lieu à plus basse température dans les zones oxygénées de l'écosystème. Certaines espèces ferro-oxydantes psychrophiles sont également capables d'oxyder le fer en anaérobiose en utilisant le nitrate comme accepteur terminal d'électrons (Edwards et al, 2003). En contexte hydrothermal, des études récentes ont mis en évidence que des micro-organismes ferro-oxydants étaient associés à la crevette *Rimicaris exoculata*, induisant la formation de dépôts d'oxyhydroxydes de fer conséquents dans la cavité branchiale de l'animal (Corbari et al, 2008; Schmidt et al, 2008; Schmidt et al, 2009). Des travaux récents mettant en œuvre une approche de métagénomique ont montré que ces bactéries sont affiliées au groupe des *Zetaproteobacteria* (Jan, 2012) dont, à ce jour, le seul représentant cultivé, *Mariprofundus ferroxidans*, est une bactérie ferroxidante (Emerson et al, 2007).

Cycle du Soufre

Le plus grand réservoir du soufre dans la lithosphère est le sédiment (ex. schistes et évaporites), où le soufre est présent sous forme de minéraux sulfurés (principalement sous forme de pyrite), sous forme de minéraux sulfatés (gypse) ou dans la matière organique en voie de dégradation (acides aminés soufrés). De même, le plus grand réservoir de sulfate sous

forme dissoute est l'eau de mer dont il est un des principaux anions. Dans les écosystèmes hydrothermaux, le soufre se rencontre sous divers états d'oxydo-réduction et sous diverses formes dissoutes ou solides. Les cheminées hydrothermales contiennent des minéraux sulfurés tels que la pyrite, la marcasite, la chalcopyrite, la pyrrotite, la sphalérite, la galène; ou sulfatés tels l'anhydrite ou la barytine. La proportion entre ces minéraux sulfurés et sulfatés varie selon la localisation dans la cheminée - extérieur *versus* intérieur - et selon la maturité (âge) de la cheminée.

Le soufre, possède plusieurs états d'oxydo-réduction : -2, 0, +2, +4 et +6. Sa forme la plus oxydée étant représentée par le sulfate SO_4^{2-} et sa forme la plus réduite par le sulfure d'hydrogène H_2S (Figure 4-25). La réduction du sulfate en sulfure d'hydrogène implique ainsi une perte de 8 électrons. Le soufre élémentaire est stable et insoluble, sous forme S_8 cristalline ou sous forme amorphe et colloïdale S° .

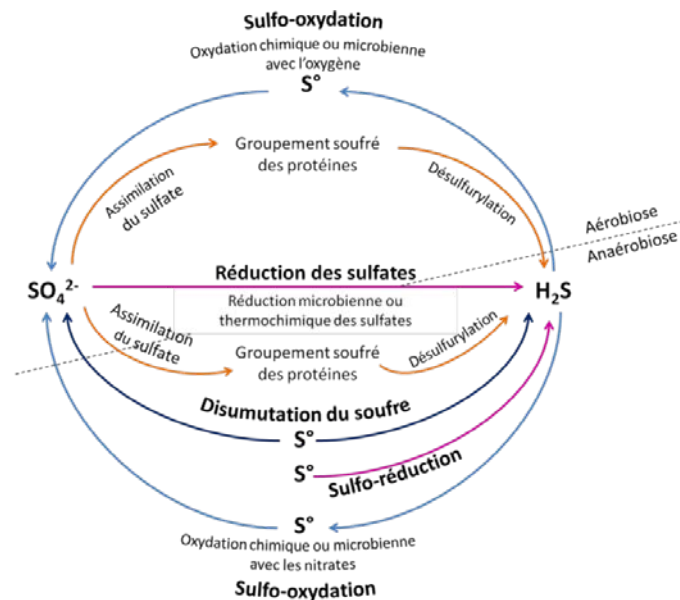


Figure 4-25 Principales réactions du cycle biogéochimique du soufre modifié d'après Madigan et Martinko, 2002 (Madigan & Martinko, 2007) © N. Callac, 2013.

Les flèches orange représentent le métabolisme assimilatif et les voies de désulfurylation des protéines; les flèches bleu clair, les voies d'oxydation; les flèches mauves, les voies de réduction et les flèches bleu foncé les voies de dismutation du soufre élémentaire.

Oxydation des composés soufrés

Dans les écosystèmes hydrothermaux, les micro-organismes sulfo-oxydants, sous forme libre ou en associations symbiotiques, occupent un rôle écologique important. En effet, beaucoup de ces procaryotes sulfo-oxydants sont chimiolithotrophes et l'oxydation de composés soufrés réduits est, dans le biotope hydrothermal, l'une des principales réactions de production d'énergie nécessaire à la fixation du CO_2 . Parmi les procaryotes sulfo-oxydants connus, certains vivent en associations symbiotiques avec des métazoaires invertébrés hydrothermaux. Ces micro-organismes sont nommés symbiotes thiotrophes (Arndt et al, 2001; Duperron et al, 2006). Des bactéries filamenteuses sulfo-oxydantes telles que les *Beggiatoa sp.*, les *Thiotrix sp.* ou les *Thiomicrospira sp.*, appartenant à l'ordre des *Thiotrichales* (*Gammaproteobacteria*), s'établissent aux interfaces oxiques-anoxiques, selon leur gradient préférentiel entre l'oxygène et les sulfures dissous, où elles forment d'épais tapis microbiens à la surface de substrats (cheminées hydrothermales, sédiments, coquilles de bivalves) (Ruby et al, 1981; Nelson et al, 1989; Jørgensen and Revsbech, 1983; Nelson et al, 1986; McHatton et

al, 1996; Preisler et al, 2007; McKay et al, 2012). Ces procaryotes oxydent, en deux étapes, les sulfures dissous en sulfate en utilisant l'oxygène comme accepteur final d'électrons en aérobiose (Figure 4-25). La première étape consiste à oxyder les sulfures en soufre élémentaire (stocké dans la cellule sous forme de globules, constituant une réserve d'énergie); la seconde consiste à oxyder le soufre élémentaire en sulfate (Preisler et al, 2007). Ces micro-organismes sont aussi capables de vivre en anaérobiose; et dans ces conditions l'oxydation des sulfures est couplée à la réduction des nitrates (Preisler et al, 2007; McHatton et al, 1996). Des micro-organismes mésophiles sulfo-oxydants ont aussi été isolés d'édifices hydrothermaux actifs. Parmi eux, certaines *Epsilonproteobacteria*, oxydent le soufre et le thiosulfate en aérobiose ou en anaérobiose. Ainsi, *Sulfurimonas autotrophica* utilise l'oxygène comme accepteur d'électrons (Inagaki et al, 2003), *Sulfurimonas paralvinellae*, anaérobie facultative, utilise l'oxygène ou les nitrates (Takai et al, 2006) tout comme *Sulfurovum lithitrophicum* qui est microaérophile (Inagaki et al, 2004). Des *Gammaproteobacteria* comme des espèces appartenant au genre *Thiomicrospira* ainsi que la *Betaproteobacteria Thiobacillus hydrothermalis*, sont aussi capables d'oxyder en aérobiose le soufre élémentaire, le thiosulfate ou les sulfures (Durand et al, 1993; Jannasch et al, 1985; Takai et al, 2004; Wirsen et al, 1998; Ruby and Jannasch, 1982). De même, trois espèces de *Bacteria* thermophiles ont été isolées à ce jour de cheminées hydrothermales actives. L'une d'entre elles est une *Alphaproteobacteria* : *Piezobacter thermophilus* (température optimale 50°C), capable d'oxyder, avec l'oxygène ou des nitrates, une large gamme de composés soufrés : du soufre élémentaire, du thiosulfate, de la cystéine, du tétrathionate et du sulfite. Les deux autres appartiennent à l'ordre des Aquificales : *Persephonella guaymasensis* et *Persephonella marina* (Gotz et al, 2002). Toutes deux sont microaérophiles (température optimale 70°C), capables d'oxyder le soufre élémentaire et le thiosulfate.

Réduction des sulfates

La réduction assimilative du sulfate permet aux micro-organismes d'assimiler le soufre organique produit sous forme de groupement sulfhydryle (R-SH) dans des acides aminés soufrés (Rabus et al, 2006). Cette réduction a lieu en aérobiose et en anaérobiose et ne réduit qu'une partie du pool d'accepteurs d'électrons pour satisfaire les besoins cellulaires et, contrairement à la réduction dissimilative (Rabus et al, 2006), ne produit donc que de petites quantités d'H₂S. À l'inverse de l'assimilation, la réduction dissimilative du sulfate ou respiration anaérobie des sulfates a lieu uniquement en anaérobiose et conduit à la réduction d'une grande partie du pool d'accepteurs d'électrons et donc produit beaucoup d'H₂S qui sera expulsé hors de la cellule. (Figure 4-25)

Dans les écosystèmes hydrothermaux, les micro-organismes, *Bacteria* et *Archaea*, sulfato-réducteurs sont principalement mésophiles et thermophiles. Chez les *Bacteria*, les sulfato-réducteurs appartiennent aux *Thermodesulfobacteria* (genres : *Thermodesulfobacterium* (Jeanthon et al, 2002) et *Thermodesulfatator* (Moussard et al, 2004; Alain et al, 2010) et aux *Deltaproteobacteria* (avec les genres : *Desulfovibrio* (Alazard et al, 2003), *Desulfonauticus* (Audiffren et al, 2003), *Desulfothermus* (Rueter et al, 1994)). Chez les *Archaea*, ils sont tous thermophiles et appartiennent principalement aux *Archaeoglobales* avec les espèces du genre *Archaeoglobus* (*Archaeoglobus profundus* (Burggraf et al, 1990), *A. veneficus* (Huber et al, 1997) et *A. infectus* (Mori et al, 2008)) mais également aux *Thermococcales*, ordre au sein duquel l'espèce *Palaeococcus pacificus*, capable de réduire les sulfates, a récemment été isolée de sédiments hydrothermaux du Pacifique (Zeng et al, 2013). Certains de ces procaryotes sont capables de croître en chimiolithotrophie en utilisant H₂ comme donneur d'électrons, comme *Thermodesulfobacterium hydrogeniphilum* (Jeanthon et al, 2002), *Thermodesulfatator indicus* (Moussard et al, 2004) ou *T. atlanticus* (Alain et al, 2010).

D'autres sont chimioorganotrophes, utilisant des composés organiques (ex. hydrocarbures) comme sources d'énergie, tel que *Desulfothermus naphthae* souche TD3 (Rueter et al, 1994). Certaines, comme *Desulfovibrio hydrothermalis* (Alazard et al, 2003) ou *Desulfonautilus submarinus* (Audiffren et al, 2003), sont mixotrophes. Certaines souches, parmi lesquelles des *Deltaproteobacteria*, sont aussi capables d'utiliser le thiosulfate, le sulfite ou le soufre élémentaire comme accepteur terminal d'électrons. Aussi, chez les *Deltaproteobacteria*, deux groupes ont été distingués : celles du groupe I qui oxydent leur donneur d'électrons (lactate, éthanol...) jusqu'à l'acétate et celles du groupe II qui oxydent leur source d'énergie (succinate, acétate...) jusqu'au CO₂ (Widdel et al, 1992; Rabus et al, 2006).

Réduction du soufre

En contexte hydrothermal, la réduction du soufre est un métabolisme anaérobie et le produit final de cette réaction est l'H₂S. Beaucoup d'espèces de micro-organismes décrites peuvent réduire le soufre élémentaire en H₂S. Parmi eux, deux groupes de micro-organismes sulfo-réducteurs ont été différenciés :

- **Les chimiolithotrophes**, pour lesquels le soufre sert d'accepteur terminal d'électrons. Ces procaryotes, aux métabolismes variés, sont aussi capables de réduire d'autres composés comme les nitrates ou le fer ferrique. Dans les écosystèmes hydrothermaux, les procaryotes sulfo-réducteurs sont rencontrés dans différentes niches écologiques (mésophiles à (hyper)thermophiles), chez les *Archaea* mais surtout chez les *Bacteria* où ils sont répartis dans différents groupes. Ainsi les bactéries sulfo-réductrices mésophiles appartiennent principalement au groupe des *Epsilonproteobacteria* (et aux genres *Thioreductor* (Nakagawa et al, 2005) et *Thiofractor* (Makita et al, 2012); tandis que les (hyper)thermophiles sont distribuées au sein des *Aquificales* (aux genres : *Phorcysia* (Pérez-Rodríguez et al, 2011), *Thermosulfidibacter* (Nunoura et al, 2008)), des *Desulfobacteriales* (aux *Desulfurobacterium* (L'Haridon et al, 1998; Alain et al, 2003), *Balnearium* (Takai et al, 2003) et *Thermovibrio* (L'Haridon et al, 2006)), des *Acidobacteria* (*Thermotomaculum hydrothermale* (Izumi et al, 2012)), des *Deferribacteres* (Miroshnichenko et al, 2003; Slobodkina et al, 2009; Takai et al, 2003), des *Deltaproteobacteria* (*Deferrisoma camini* (Slobodkina et al, 2012)) et des *Epsilonproteobacteria* (appartenant aux genres *Caminibacter* (Alain et al, 2002), *Nautilia* (Miroshnichenko et al, 2002) et *Lebetimonas* (Takai et al, 2005)).
- Chez les *Archaea*, c'est dans le phylum des *Crenarchaeota*, que les sulfo-réducteurs hyperthermophiles ont principalement été isolés, notamment au sein des *Desulfurococcus* (Jannasch et al, 1988), des *Ignicoccus* (Huber et al, 2000), des *Staphylothermus* (Fiala et al, 1986) et des *Pyrodictium* (Pley et al, 1991). Au sein des *Euryarchaeota*, *Aciduliprofundum boonei*, appartenant aux DHVE2, est aussi capable de sulfo-réduction à haute température (Reysenbach et al, 2006).
- **Les organotrophes fermentaires**, pour lesquels le soufre sert à oxyder l'hydrogène, produit lors de la fermentation, en H₂S. En règle générale, la réduction du soufre ne leur est pas indispensable, cependant, elle stimule fréquemment leur croissance. Ceci concerne les *Thermococcales* (Canganella et al, 1998; Godfroy et al, 1997; Godfroy et al, 1996; Jolivet et al, 2004) et les *Thermotogales* (Wery et al, 2001; Alain et al, 2002; Postec et al, 2005). Toutefois, certaines *Thermotogales* sont capables de réduire le thiosulfate (Ravot et al, 1995) ou le fer ferrique (Vargas et al, 1998; Slobodkin et al, 2001).

Dismutation du soufre (du thiosulfate et des sulfites)

La dismutation, ou disproportionation, consiste en la séparation d'un composé initial en deux autres composés : l'un plus réduit et l'autre plus oxydé que le composé initial. Dans le cas des composés soufrés, le soufre élémentaire, le thiosulfate et les sulfites peuvent être oxydés en sulfates et réduits en sulfures lors de leur dismutation par des micro-organismes. Ce n'est que très récemment que les deux premières souches réalisant la disproportionation du soufre à haute température ont été isolées de cheminées hydrothermales. Ces deux souches sont des *Bacteria*, l'une : *Thermosulfurimonas dismutans*, qui appartient à l'ordre des *Thermodesulfobacteria*, dismute uniquement le soufre (Slobodkin et al, 2012) et l'autre, *Dissulfuribacter thermophilus*, affiliée au *Deltaproteobacteria*, est capable de dismuter le soufre élémentaire, le thiosulfate et les sulfites (Slobodkin et al, 2012).

Cycle de l'Azote

L'azote, constituant important des acides nucléiques, des acides aminés, de la porphyrine et de nombreux sucres, est un élément clé de nombreux cycles biogéochimiques. Dans l'environnement marin, l'azote est présent principalement sous 5 formes :

- **Le diazote** N_2 qui est la forme la plus stable.
- **Les nitrates** NO_3^- qui sont la forme la plus oxydée de l'azote, la forme dominante et la plus assimilable dans les environnements oxygénés.
- **L'ammonium** NH_4^+ qui est la forme la plus réduite de l'azote, mais aussi la forme dominante assimilable dans les environnements anoxiques.
- **L'azote organique sous forme particulaire** est prédominant au niveau des sédiments et souvent associé à de l'azote inorganique.
- **Les nitrites.**

Ces différents composés sont liés par un ensemble de réactions résumées Figure 4-26.

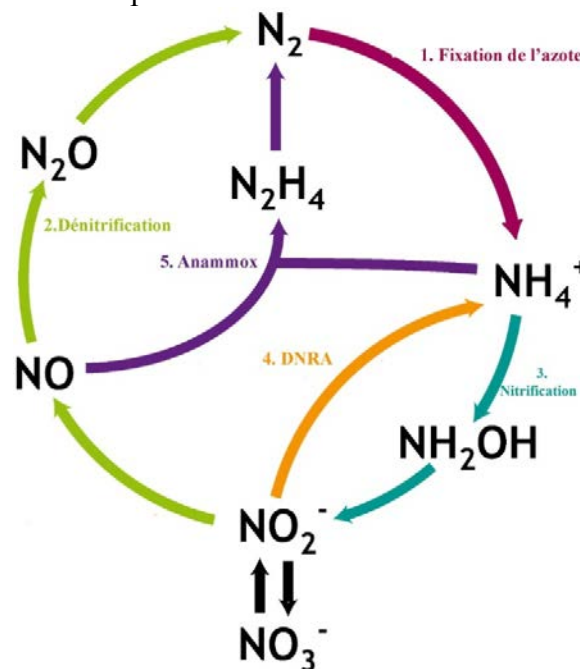


Figure 4-26 Cycle de l'azote, d'après Jetten.

(1) Fixation de l'azote; (2) Dénitrification;
(3) Nitrification; (4) DNRA (Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium; (5) ANAMMOX oxydation anaérobie de l'ammonium (Jetten, 2008)© Byrne 2008

Dans l'écosystème hydrothermal, l'oxydation aérobie de l'ammonium, ou nitrification, a été démontrée par l'isolement des procaryotes nitrifiants hétérotrophes thermophiles se développant dans des conditions aérobies à 65°C comme par exemple *Bacillus* MS (Mével and Prieur, 1998; Mével and Prieur, 2000). La détection dans des échantillons d'édifices hydrothermaux actifs de séquences des gènes *nifH* (codant pour une sous-unité de la nitrogénase) laissait supposer une possible fixation de l'azote (Mehta et al, 2003). Une étude a récemment montré une possible fixation de l'azote à haute température par une *Methanoarchaea* (Mehta and Baross, 2006). Cette *Archaea* issue de fluide hydrothermal est capable de réduire le diazote N_2 en ammonium NH_4^+ à une température de 92 °C. Le gène codant pour l'ARNr 16S de ce fixateur hyperthermophile d'azote est à 99% semblable à celui du *Methanocaldococcus jannaschii* (DSM 2661) qui, elle, ne fixe pas l'azote. En ce qui concerne la dénitrification à haute température, de nombreux procaryotes ont été isolés et sont capables de cette réaction à haute température tels que des espèces bactériennes des genres *Deferribacter* (Miroshnichenko et al, 2003; Takai et al, 2003), *Caminiobacter* (Alain et al, 2002; Miroshnichenko et al, 2004; Voordeckers et al, 2005), *Desulfurobacterium* (L'Haridon et al, 1998; Alain et al, 2003; L'Haridon et al, 2006), *Persephonella* (Gotz et al, 2002; Nakagawa et al, 2003) et l'*Archaea Pyrolobus fumarii* (Blöchl et al, 1997), espèce qui détient d'ailleurs le record de température pour la dénitrification (106°C).

De nombreux essais ont été effectués afin d'enrichir ou d'isoler des micro-organismes nitrifiants autotrophes dans des environnements chauds, essais qui ne se sont pas avérés concluants.

Très récemment, la réaction ANAMMOX a été mise en évidence comme s'opérant dans l'écosystème hydrothermal des sites Rainbow, Menez-Gwen, TAG et Lucky Strike de la dorsale médio-atlantique, via l'étude de la diversité moléculaire, l'analyse de lipides, les ladderanes, typiques des micro-organismes ANAMMOX, et par des mesures d'activité (production de N_2) (Byrne et al, 2009). Elle a également été identifiée au niveau du bassin de Guaymas via des signatures moléculaires de gènes codant pour une enzyme, l'hydrazine synthase (*hzsA*), une des enzymes-clés du métabolisme ANAMMOX, et l'analyse des ladderanes (Russ et al, 2013).

Cycle du Carbone

Le carbone est recyclé dans l'atmosphère, le sol, les océans, les milieux aquatiques, les sédiments et les roches. Les sédiments et les roches représentent le réservoir le plus important, mais le « turn-over » y est très long. La voie globale la plus rapide de transfert de carbone se fait par le dioxyde de carbone (CO_2) qui est la forme initiale et finale du cycle. Il est retiré de l'atmosphère essentiellement par la photosynthèse des plantes et y retourne par la respiration des animaux et des micro-organismes organotrophes. Certains micro-organismes sont capables de croître en utilisant le CO_2 comme seule source de carbone, ce sont des autotrophes.

Les différentes réactions qui interviennent dans le cycle du carbone sont :

La respiration et fermentation (1) et (2) sur la figure 4-27

Lors de la respiration, la matière organique est transformée en $CO_2 + H_2O$ en présence ou en absence de lumière, en condition aérobie ou anaérobie. Les chimio-organotrophes utilisent deux mécanismes de conservation de l'énergie : la fermentation et la respiration. Dans la fermentation, la réaction d'oxydation est couplée à la réduction d'un composé dérivé du donneur d'électrons. Dans la respiration c'est un accepteur d'électrons exogène : soit l'oxygène moléculaire (respiration aérobie), soit un autre accepteur d'électrons (respiration

anaérobie) qui est réduit (respiration anaérobie). Concernant l'écosystème hydrothermal et plus précisément la partie chaude de celui-ci, plusieurs micro-organismes tirent leur énergie de la respiration aérobie : c'est le cas d'*Aeropyrumcamini* et des espèces du genre *Thermus*, par exemple. Certains sont micro-aérophiles, comme *Oceanithermus* et *Vulcanithermus*. Ils ont des températures optimales de croissance comprises entre 60°C et 85°C. De nombreuses espèces sont impliquées dans la dégradation de la matière organique par voie fermentaire ou par respiration anaérobie. Elles appartiennent aux deux domaines *Archaea* et *Bacteria* et se répartissent au sein de différents phyla : *Firmicutes* (*Caminicella*), *Thermotogales* (*Marinotoga*, *Thermosipho*), *Thermales* (*Vulcanithermus*) (pour les *Bacteria*), *Thermococcales* (au sein des *Euryarchaeota*), qui comptent plus d'une vingtaine d'espèces décrites toutes chimio-organotrophes, et *Desulfurococcales* (chez les *Crenarchaeota*), qui comportent à la fois des espèces chimio-organotrophes et des espèces lithotrophes.

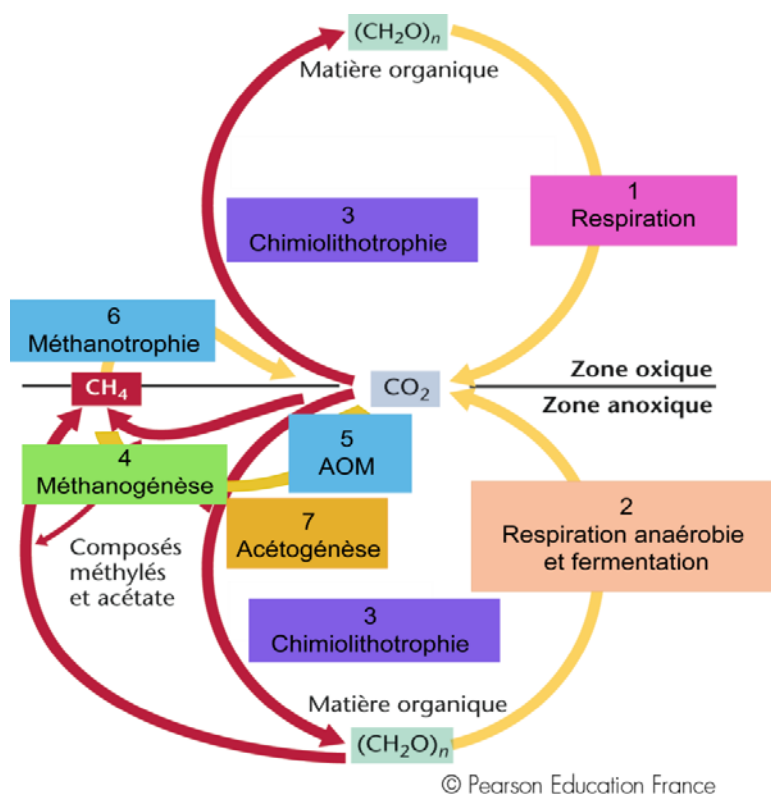


Figure 4-27 Principales réactions du cycle du Carbone d'après Brock Chapitre 19 (Madigan and Martinko, 2007) © N. Byrne, 2008.

Parmi les espèces thermophiles et hyperthermophiles isolées des édifices hydrothermaux actifs, les espèces chimio-organotrophes sont celles pour lesquelles il existe le plus grand nombre d'espèces isolées et décrites notamment au sein de l'ordre des *Thermococcales* et dans une moindre mesure des *Thermotogales*. La physiologie et le métabolisme des *Thermococcales* sont bien connus (Neuner et al, 1990; Miroshnichenko et al, 1989; Zillig et al, 1987; Godfroy et al, 1996; Huber et al, 1995; Keller et al, 1995; Kwak et al, 1995; Dirmeier et al, 1998; Grote et al, 1999; Marteinsson et al, 1999; Canganella et al, 1998; Miroshnichenko et al, 1998; Gonzalez et al, 1999; Duffaud et al, 1998; Godfroy et al, 1999; Arab et al, 2000; Jolivet et al, 2004; Kuwabara et al, 2005; Kuwabara et al, 2007; Pikuta et al, 2007) et de nombreux génomes ont été séquencés. Elles sont capables d'utiliser des composés organiques complexes tels que des protéines mais également des sucres simples ou complexes. Leur métabolisme est un métabolisme fermentaire et leur croissance est stimulée par la présence de soufre élémentaire.

Les micro-organismes chimiolithoautotrophes : fixation du CO₂ : (3) Figure 4-27

Chez les procaryotes chimiolithotrophes, l'énergie nécessaire à la fixation du CO₂ est obtenue grâce à un donneur d'électrons inorganique. Dans les édifices hydrothermaux, de nombreux composés réduits sont susceptibles de servir de sources d'énergie pour la fixation du CO₂ à haute température, l'hydrogène notamment est un donneur d'électrons. De nombreuses espèces de micro-organismes thermophiles et hyperthermophiles autotrophes ont été isolées des édifices hydrothermaux. Elles sont capables d'utiliser des couples donneurs/accepteurs très divers et appartiennent aussi bien aux domaines des *Archaea* : genres *Ignococcus* (Huber et al, 2000), *Archaeoglobus* (Henstra et al, 2007; Huber et al, 1997), *Pyrolobusfumarii* (Blöchl et al, 1997), que des *Bacteria* : *Nautiliales* (Alain et al, 2002; Miroshnichenko et al, 2002; Miroshnichenko et al, 2004; Voordeckers et al, 2005), *Desulfobacteriales* (Jeanthon et al, 2002), *Aquificales* (Nakagawa et al, 2003).

A haute température, la fixation du CO₂ est assurée par la voie de l'AcetylCoA, par le biais du cycle de l'acide citrique inversé par exemple chez *Thermoproteus* (Schäfer et al, 1986) et *Aquifex* (Huber et al, 1992) ou par le biais du cycle de Calvin.

La méthanogénèse : (4) Figure 4-27

Le méthane issu des processus biologiques (méthanogénèse) a une grande importance dans le flux de carbone au sein de nombreux environnements anoxiques. La méthanogénèse est réalisée par un groupe d'*Archaea*, les méthanogènes, qui sont des anaérobies strictes. Les substrats de la méthanogénèse se répartissent en 3 groupes : les substrats de type CO₂ (CO₂, CO, formate), les substrats méthylés (méthanol, méthylamine etc..) et les substrats acétotrophes (acétate et pyruvate). La plupart des méthanogènes utilisent le CO₂ comme accepteur terminal d'électrons dans la respiration anaérobie, et le réduisent en méthane avec le di-hydrogène comme donneur d'électrons. Au niveau des sources hydrothermales, des espèces d'*Archaea* méthanogènes thermophiles et hyperthermophiles ont été isolées, telles les espèces du genre *Methanocaldococcus jannaschii* (Jones et al, 1983), *Methanotorris formicicus* (Takai et al, 2004), *Methanothermococcus okinawensis* (Takai et al, 2002), *Methanopyrus kandleri* (Burggraf et al, 1991). Ces espèces sont pour la plupart des espèces qui utilisent H₂ et CO₂. Cela fournit des données supplémentaires sur l'évidence d'un métabolisme autotrophe en milieu hydrothermal océanique (Jeanthon et al, 1998; Jeanthon et al, 1999; L'Haridon et al, 2003). Dans certains environnements hydrothermaux comme au niveau du bassin de Guaymas, l'acétate provenant de la dégradation thermogénique de la matière organique sédimentée, durant la phase précoce de la diagénèse, présent en concentration élevée, est utilisé comme un substrat important de la méthanogénèse par des *Methanosarcinales* (seule famille pratiquant la méthanogénèse acétoclastique).

L'homoacétogénèse : (7) Figure 4-27

Cette réaction correspond à un métabolisme énergétique impliquant la production d'acétate à partir de H₂ et CO₂ ou à partir de composés organiques. Il n'existe pour l'instant aucun micro-organisme hydrothermal acétogène identifié.

La méthanotrophie : (6) Figure 4-27

Cette réaction correspond à l'oxydation du méthane en CO₂. Les substrats carbonés en C1 sont arbitrairement définis comme des composés contenant un carbone plus réduit que le CO₂ et ne contenant pas de liaison C-C comme par exemple CO, CH₄, CH₃OH, HCOOH, HCHO, mono-, di- et triméthylamine. En milieu hydrothermal, le métabolisme des composés en C-1 atteint un autre niveau de complexité, en tenant compte de la distinction entre métabolisme

microbien auto- et hétérotrophe. Pour la plupart des écosystèmes hydrothermaux océaniques, le CH₄ est formé *via* des réactions abiotiques : serpentinisation et « Fischer-Tropsch-Type (FTT) » à hautes températures, impliquant H₂ et CO₂ (Charlou et al, 2002). Par conséquent la croissance basée sur le CH₄ peut être considérée comme une production primaire. A ce jour, aucune espèce de méthanotrophe fonctionnant à haute température n'a été isolée de sources hydrothermales océaniques. Cependant des symbioses associant des micro-organismes méthanotrophes et des invertébrés ont été mises en évidence dans les zones à plus basse température (Duperron et al, 2006; Duperron et al, 2005). Des espèces méthanotrophes ont été également détectées grâce à des inventaires moléculaires associés aux tapis microbien et à la crevette *Rimicaris exoculata*.

En plus du catabolisme aérobie du CH₄, celui-ci peut également être oxydé en condition anaérobie au cours d'un processus *a priori* syntrophique impliquant la coopération d'*Archaea* nommées ANME et affiliées aux *Methanosarcinales*, et de bactéries sulfato-réductrices (*Deltaproteobacteria*) ou nitrate-réductrice.

L'oxydation anaérobie du méthane AOM : (5) Figure 4-27

Le méthane, produit dans les sédiments anoxiques, est oxydé en CO₂ par les méthanotrophes lorsqu'il atteint les zones oxygénées. Le méthane peut être oxydé en conditions anaérobies dans les sédiments marins par des consortia contenant certaines bactéries sulfato- réductrices et des méthanogènes.

La mise en évidence dans l'écosystème hydrothermal de lignées ANME impliquées dans l'oxydation anaérobie du méthane pourrait laisser supposer l'existence de l'AOM à des températures supérieures à celles décrites jusqu'à présent. En effet, l'AOM a été mise en évidence au niveau de la dorsale médio-atlantique (à Lost City) *via* des signatures moléculaires (ADNr 16S) (Brazelton et al, 2006; Schrenk et al, 2004) et au niveau du bassin de Guaymas *via* des mesures d'activité (Kallmeyer and Boetius, 2004) et de diversité moléculaire (ADNr 16S et mcrA) (Biddle et al, 2012; Dhillon et al, 2003; Holler et al, 2011; Teske et al, 2002).

Colonisation microbienne et interactions micro-organismes minéraux

Dans les édifices actifs

Dans les édifices hydrothermaux, la distribution spatiale des procaryotes est directement liée aux gradients de température : les micro-organismes mésophiles et légèrement thermophiles sont présents à l'extérieur, ou dans la paroi externe des cheminées, alors que les micro-organismes plus thermophiles et hyperthermophiles colonisent les couches internes des édifices (Pagé et al, 2008; Schrenk et al, 2003; Nakagawa et al, 2005; Takai et al, 2001). Il a aussi été montré que, selon la localisation dans la cheminée, la densité des micro-organismes est variable (Chevaldonné and Godfroy, 1997). Ainsi la zone supérieure de l'édifice et la paroi interne de la cheminée semblent contenir la plus grande quantité de micro-organismes (Harmsen et al, 1997; Takai et al, 2001; Schrenk et al, 2003). Ces études montrent aussi une différence d'abondance entre *Archaea* et *Bacteria* dans l'édifice, sans règle générale. En effet, Schrenk et coll. indiquent dans leur étude que les *Archaea* se trouvent majoritairement à l'intérieur, dans les zones plus chaudes, alors que les *Bacteria* sont plutôt dans la paroi extérieure de la cheminée où les températures sont plus faibles (Schrenk et al, 2003). Mais dans une autre étude, Harmsen et coll. dénombrent plus de *Bacteria* à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cheminée (Harmsen et al, 1997).

Aussi, une étude, basée sur l'utilisation de puces à ADN associées à des gènes de fonctions et de PCR quantitative, montre qu'au sein d'une cheminée de la dorsale de Juan de Fuca, la diversité microbienne (phylogénétique et métabolique) est bien plus importante dans la partie externe que dans la partie interne (Wang et al, 2009). Les variations des communautés microbiennes sont donc associées aux conditions physiques et géochimiques présentes au sein de la cheminée (Takai et al, 2001). L'évolution de la structure d'un édifice hydrothermal au cours du temps - composition minéralogique et maturité de la cheminée – implique, selon les stades de croissance, une succession de différentes communautés microbiennes (Pagé et al, 2008; Voordeckers et al, 2008; Takai et al, 2008; McCliment et al, 2006; Wang et al, 2009). L'étude de la diversité microbienne d'un même édifice du Lucky Strike échantillonné à différents temps (cheminée à différents stades de maturité) met en lumière une faible diversité microbienne dans les échantillons « jeunes » par rapport à celle obtenue dans des échantillons de cheminées "matures" (Le Roy, 2009). Elle indique aussi qu'au cours de la croissance de la cheminée, le nombre de genres au sein d'un même groupe augmente et souligne la présence des *Thermococcales* à tous les stades de l'édification de la cheminée. De même, l'augmentation du nombre de gènes de fonction détectés, impliqués dans les métabolismes du carbone, de l'azote et du soufre, a aussi été notée, par comparaison de deux édifices à différents stades de maturité (Wang et al, 2009). Ainsi, la modification et la succession des communautés microbiennes et les variations des gènes de fonctions détectés, impliqués dans les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du soufre, sont reliées aux conditions physiques (évolution minéralogique de la structure de l'édifice au cours du temps) et géochimiques, présentes au sein de chaque cheminée (Wang et al, 2009; Pagé et al, 2008; Takai et al, 2001; Takai et al, 2008; McCliment et al, 2006). Enfin, en raison des gradients physico-chimiques abrupts s'établissant au sein des édifices, qui génèrent des conditions extrêmement variées de températures, pH, de composés redox, de composés chimiques, présence ou non d'oxygène, chaque cheminée est constituée de multiples micro-niches abritant des communautés microbiennes variées selon leur préférendum.

Afin d'étudier la variation de la structure des communautés microbiennes au sein des édifices hydrothermaux et de déterminer quels sont les premiers colonisateurs, différents types de modules de colonisation ont été déployés *in situ*, sur plusieurs zones hydrothermales comme par exemple : vent caps (Corre et al, 2001; Reysenbach et al, 2000; Nercessian et al, 2003), ISCS *in situ* colonization system (Takai et al, 2003), vent catheters (Higashi et al, 2004), microbial growth chamber (Rassa et al, 2009), thermocouples (Pagé et al, 2008). Le déploiement de ces modules a permis le développement de communautés microbiennes dont la diversité phylogénétique a été analysée. Ainsi, par exemple, sur la ride Est-Pacifique (à 9°N), les premiers colonisateurs détectés sur les « protocheminées » semblent être des micro-organismes autotrophes hyperthermophiles, du genre *Ignococcus* et son symbionte du genre *Nanoarchaeum*, suivis par des *Thermococcales* (McCliment et al, 2006). Au niveau du site Snake Pit sur la ride médio-atlantique, ces ont également des procaryotes chimiolithoautotrophes hyperthermophiles qui sont tout d'abord présents dans les Vent Cap déployés sur l'édifice hydrothermal, suivis par des micro-organismes hétérotrophes (*Thermococcales*, *Thermoplasmatales*, *Archaeoglobales*, *Aquificales*, *Desulfurobacterium*, *Epsilonproteobacteria*) (Reysenbach et al, 2000). A l'inverse, au niveau de la dorsale du Pacifique Est à 13°N, les mêmes modules de colonisation semblent être d'abord colonisés par des micro-organismes de l'ordre des *Thermococcales* puis par des espèces chimiolithotrophes de l'ordre des *Methanopyrales*, *Methanococcales*, et *Desulfurococcales* (Nercessian et al, 2003). Ces études ont généralement montré que les *Epsilonproteobacteria* étaient dominants et aussi que la diversité microbienne peut varier à la fois en termes de structure et de taille, selon les conditions environnementales et la composition du substrat minéral.

Des études de diversité associées à la description minéralogique des échantillons ont été réalisées à partir de cheminées hydrothermales actives. Sur le site de Mariner (bassin de Lau), riche en matière organique, les premiers colonisateurs d'une cheminée néoformée sont des hétérotrophes (Takai et al, 2008). Plusieurs études font ainsi le lien entre la composition minéralogique d'une cheminée et la composition des populations microbiennes et montrent que la structure des communautés microbiennes évolue au cours de la maturation de l'édifice hydrothermal (Takai et al, 2001; Schrenk et al, 2003; Nakagawa et al, 2005; Nercessian et al, 2003; McCliment et al, 2006; Wang, 2009). Les cheminées considérées comme jeunes possèdent une diversité plus faible que les cheminées matures : par exemple, une étude de diversité réalisée à partir d'un échantillon d'une cheminée du site TAG (MAR), essentiellement composé d'anhydrite, révèle la présence d'une majorité de séquences affiliées à l'ordre des *Thermococcales* (Byrne et al, 2009). **Il existe donc une dynamique temporelle - succession et adaptation - des populations microbiennes, en réponse aux changements des conditions physico-chimiques, lors de la construction et de la maturation d'un édifice hydrothermal.**

Les édifices hydrothermaux sont des structures minérales poreuses créées lorsque le fluide hydrothermal chaud, chargé en élément minéraux, réducteur et anoxique, entre en contact avec l'eau de mer environnante, froide et oxygénée. Au niveau de cette matrice minérale, d'importants échanges thermiques et chimiques ont lieu, générant de forts gradients et de multiples micro-niches. Ces microhabitats abritent des communautés microbiennes spécifiques du point de vue phylogénétique et physiologique (Flores et al, 2011; Nakagawa et al, 2006; Byrne et al, 2009; Nakagawa et al, 2005; Nunoura et al, 2010; Karl, 1995; Pagé et al, 2008; Takai et al, 2008). Grâce aux approches culturelles et moléculaires, il a été déterminé que ces communautés microbiennes, vivant en aérobiose ou en anaérobiose, sont impliquées dans de nombreuses réactions biogéochimiques clés des cycles du carbone, du soufre, d'azote et du fer (Yamamoto and Takai, 2011; Byrne et al, 2009; Slobodkin et al, 2001; Kashefi et al, 2002; Reysenbach and Cady, 2001; Takai et al, 2003; Orcutt et al, 2011; Emerson et al, 2007). **Ainsi, dans les édifices hydrothermaux, les procaryotes contribuent localement à la modification de leurs environnements.** Certains micro-organismes vont interagir avec les minéraux en favorisant leur dissolution ou précipitation; d'autres, *via* leurs métabolismes, vont modifier localement la géochimie du fluide (Houghton et al, 2007; Schrenk et al, 2003; Pagé et al, 2008; Holden and Adams, 2003; Ehrlich, 1999; Houghton and Seyfried Jr, 2010; Edwards et al, 2005; Edwards et al, 2003; Orcutt et al, 2011). En effet, lors d'une culture d'enrichissement, des changements significatifs dans la composition du milieu ont été associés aux interactions entre les micro-organismes et certains minéraux de la cheminée : anhydrite et pyrrhotite (Houghton et al, 2007). Aussi, certaines souches microbiennes sont capables de produire des bio-minéraux au cours de leur croissance. Certaines souches hydrothermales ferri-réductrices comme *Geothermobacter ehrlichii*, et probablement *Geoglobus ahangari*, sont capables de produire des grains de magnétite au cours de leur croissance (Kashefi et al, 2003; Kashefi et al, 2002). D'autres procaryotes ferri-réducteurs hydrothermaux tels *Geoglobus acetivorans*, produisent des précipités noirs de Fe(II) magnétiques (Slobodkina et al, 2009). *Mariprofundus ferrooxydans PV-1*, quant à elle, produit lors de sa croissance des « stalk » ou filaments d'oxy-hydroxyde de fer ferrique (Emerson et al, 2007).

Dans les zones hydrothermales inactives

Lorsqu'une cheminée hydrothermale devient inactive, le fluide hydrothermal n'est plus émis. De ce fait, les réactions de précipitation de sulfures polymétalliques entre l'eau de mer et le fluide hydrothermal, de même que la maturation minérale de l'édifice hydrothermal, s'interrompent. L'écosystème hydrothermal actif se transforme en un nouvel écosystème froid (température *in situ* entre 2 et 4°C (Kato et al, 2010)), nommé « écosystème hydrothermal inactif », qui, lui, est supporté par l'énergie chimique provenant de l'altération oxydative des structures (minéraux réduits constitutifs de l'édifice) (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013; Rogers et al, 2003). **Actuellement, très peu d'études de diversité microbienne ont été réalisées et seuls une dizaine de sites inactifs ont été explorés et étudiés**; citons par exemple les sites Pika et Y au niveau de la partie sud de la fosse des Mariannes (Kato et al, 2010); le site Iheya nord dans la dépression d'Okinawa (Suzuki et al, 2004); le site Kairei au niveau de la dorsale Indienne (Suzuki et al, 2004), un site de Middle Valley sur la dorsale de Juan de Fuca (Rogers et al, 2003) et des sites à 9°N (dont K Vent, North Bio9 Vent ou encore Southeast Bio9 Vent) de la dorsale Est-Pacifique (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013).

Les communautés microbiennes établies dans ces structures hydrothermales inactives sont significativement très différentes de celles des sources hydrothermales actives (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013; Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004) (Figure 4-28).

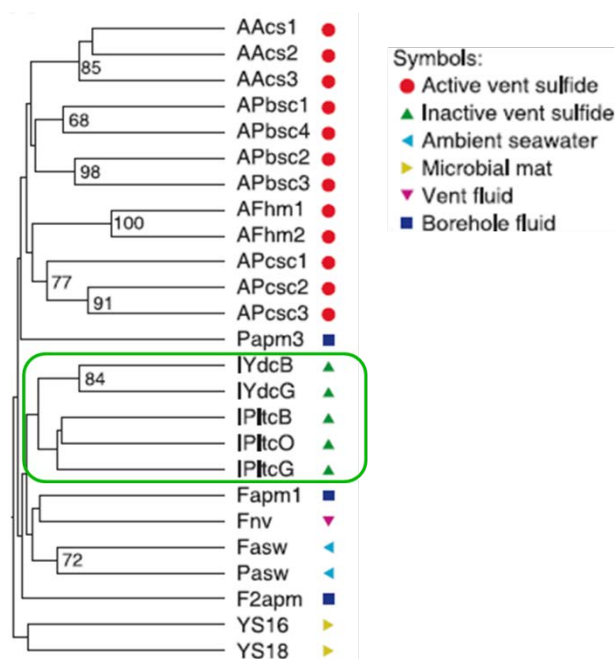


Figure 4-28 Comparaison statistique des communautés microbiennes du Sud de la fosse des Mariannes; illustration modifiée de Kato et al, 2010.

Comparaison réalisée en utilisant l'outil « Jackknife environmental cluster » d'UniFrac, illustrant le regroupement de toutes les séquences du gène codant pour l'ARN 16S provenant d'édifices inactifs ensemble (entouré en vert).

Les communautés microbiennes analysées par clonage-séquençage, proviennent de cheminées hydrothermales actives (ronds rouges), de cheminées hydrothermales inactives (triangles verts), de l'eau de mer ambiante (triangles bleus), de tapis microbiens (triangles jaunes), du fluide hydrothermal (triangles mauves) et de fluides collectés dans des forages (carrés bleus). Les valeurs jackknife supérieures à 50% (sur la base de 100 permutations) sont affichées aux nœuds correspondants.

D'après les estimations d'abondance cellulaire effectuées (par comptage ou par PCR quantitative), il a été montré que la densité des micro-organismes dans des structures éteintes n'est pas significativement différente de celle des édifices actifs (Kato et al, 2010). Il apparaît cependant que l'abondance cellulaire est plus importante dans les couches externes de l'édifice que dans les couches internes (Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004). Il semble aussi que la proportion des *Bacteria* soit plus importante que celle des *Archaea* (Suzuki et al, 2004). Aussi, selon les mesures d'activité, il apparaît que l'activité microbienne serait plus importante au niveau extérieur de l'édifice, en contact avec l'eau de mer environnante (Kato et al, 2010).

Comme l'illustre la Figure 4-28, les communautés microbiennes des sites éteints sont donc très différentes des celles des écosystèmes hydrothermaux actifs. Toutefois, il semble que les communautés microbiennes des édifices inactifs soient comparables voire plus importantes que celle des cheminées hydrothermales actives (Kato et al, 2010). Aussi, il apparaît que les groupes microbiens majoritairement détectés dans les inventaires moléculaires (groupes les plus souvent trouvés en termes de nombre de clones par banques de clones) des édifices inactifs ne varient que très peu selon les sites explorés à ce jour. En effet, parmi les *Bacteria*, les groupes détectés dans globalement tous les sites inactifs étudiés sont les *Alphaproteobacteria*, les *Deltaproteobacteria*, les *Gammaproteobacteria*, les *Actinobacteria*, les *Nitrospirae* et les *Bacteroidetes* (Toner et al, 2013; Sylvan et al, 2012; Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004; Rogers et al, 2003). Fréquemment, les *Betaproteobacteria*, les *Acidobacteria* et les *Planctomycetes* sont aussi trouvés (Toner et al, 2013; Sylvan et al, 2012; Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004). Très rarement, des micro-organismes appartenant à la lignée des procaryotes thermophiles « rares » (les *Deinococcus-Thermus*, les *Thermomicrobia*, les *Thermotogae* et les *Thermodesulfobacteria*); aux *Verrucomicrobia*, aux *Firmicutes* ou à des lignées « Candidats division » (TM7, OD1, etc.) sont détectés (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013). Généralement, à l'exception des sites étudiés par Toner et coll. (Toner et al, 2013), les *Epsilonproteobacteria* ne sont pas (Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004; Sylvan et al, 2012) ou très faiblement détectés (par exemple, les *Epsilonproteobacteria* constituent moins de 4% de la diversité détectée par V6 sequences tag (Sylvan et al, 2012; Suzuki et al, 2004; Rogers et al, 2003). Il a aussi été montré que les communautés bactériennes (proportion et taxons) varient selon leur localisation dans l'édifice (Sylvan et al, 2012) et les édifices (Toner et al, 2013; Kato et al, 2010; Suzuki et al, 2004; Sylvan et al, 2012).

Contrairement aux *Bacteria*, une très faible diversité d'*Archaea* a été détectée par approche de biologie moléculaire (clonage-séquençage). Ainsi, uniquement deux groupes : les Marine Group I (MGI) et les Marine Benthique Group E (MBGE) ont été trouvés dans les sites inactifs de l'océan Indien ou de la dépression d'Okinawa (Suzuki et al, 2004). Dans une autre étude réalisée à partir d'échantillons de sites hydrothermaux éteints de la fosse des Mariannes, les MGI ont aussi été trouvés, ainsi que des *Euryarchaeota* group 3 (DHVE3) (Kato et al, 2010). Il faut toutefois noter la présence de populations résiduelles, reliquats des communautés présentes dans les édifices hydrothermaux actifs (par exemples des phylotypes bactériens affiliés aux genres *Sulfurimonas* ou *Sulfurovum*) (Sylvan et al, 2012). Il faut aussi noter que la géochimie des minéraux constitutifs des édifices éteints (minéralogie et réactivité des phases minérales) semble tenir un rôle central dans la mise en place et la structuration de ces communautés microbiennes, à la fois localement à l'échelle d'un site et plus largement entre différents sites, en fournissant des composés chimiques réduits qui serviront de donneurs d'électrons aux populations microbiennes (Toner et al, 2013).

D'après leurs études de diversité microbienne, Suzuki et coll. ont proposé un patron de colonisation où les colonisateurs primaires seraient les *Archaea* appartenant au Marine Benthic Group E et, pour les *Bacteria*, les *Bacteroidetes* et les *Nitrospirae*; viendraient ensuite les *Archaea* du Marine Group I et les *Gammaproteobacteria* (Suzuki et al, 2004).

Grâce aux phylotypes détectés, il a été possible de déduire des propriétés métaboliques aux taxons identifiés. Ainsi, parmi les micro-organismes identifiés, beaucoup sont phylogénétiquement proches de procaryotes cultivés autotrophes connus (exemple : des *Chlorobi*) (Sylvan et al, 2012); il est donc possible qu'ils partagent ces mêmes propriétés métaboliques. Cela suggère qu'une partie des micro-organismes des cheminées hydrothermales inactives, **les procaryotes chimiolithoautotrophes participent à la production primaire de la matière organique et qu'ils sont donc le premier maillon à la**

base de la chaîne alimentaire de cet écosystème (Sylvan et al, 2012). Ceci est en adéquation avec une étude antérieure réalisée par Kato et coll., qui avaient déterminé que le carbone organique total présent sur la surface externe des édifices éteints pouvait être jusqu'à 5 fois plus important que sur les édifices actifs (Kato et al, 2010). Il a aussi été démontré que les cycles du soufre, du fer, de l'azote ainsi que l'oxydation du méthane et de l'hydrogène pouvaient fonctionner dans cet écosystème. En effet, des acteurs microbiens intervenant dans la sulfo-oxydation (réalisée par des *Gammaproteobacteria* de l'ordre des *Chromatiales*) et dans la sulfato-réduction (effectuée par des *Deltaproteobacteria* des ordres *Desulfobacterales* ou *Desulfovibrionales* ou par des *Thermodesulfobacteria*) ont été identifiés (Sylvan et al, 2012). De même, concernant le cycle de l'azote, des micro-organismes capables de nitrification (des *Betaproteobacteria* de l'ordre des *Nitrosomonadales*), d'oxyder les nitrites (*Nitrospirales*) et de fixer l'azote (des *Alphaproteobacteria* de l'ordre des *Rhizobiales*), ont aussi été détectés (Sylvan et al, 2012). Dans les édifices inactifs, une seule partie du cycle du fer aurait lieu : la ferro-oxydation, réalisée par des *Betaproteobacteria* appartenant à l'ordre des *Nitrosomonadales* (Sylvan et al, 2012). Des *Gammaproteobacteria* assureraient l'oxydation de l'hydrogène (*Thiotrichales*) et du méthane (*Methylococcales*) (Sylvan et al, 2012).

Par rapport aux communautés microbiennes des cheminées hydrothermales actives, très peu d'informations sont actuellement disponibles sur la colonisation, la diversité, la structure ou encore l'activité des micro-organismes peuplant les édifices hydrothermaux inactifs. Il est toutefois clair que les communautés des édifices hydrothermaux éteints sont très différentes de celles des édifices actifs (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013; Suzuki et al, 2004; Kato et al, 2010). Il semble aussi que les communautés microbiennes des structures hydrothermales inactives soient impliquées, tout comme celles des cheminées hydrothermales actives dans les cycles biogéochimiques du soufre, de l'azote et du fer (Sylvan et al, 2012) et que la minéralogie du site impacte l'établissement et la structure des communautés microbiennes (Toner et al, 2013).

Dès la découverte des sources hydrothermales profondes, l'intérêt marqué des microbiologistes pour les micro-organismes chimiotrophes et extrémophiles a permis de progresser rapidement dans leur étude et d'aboutir aujourd'hui à une relativement bonne connaissance de leur diversité phylogénétique et métabolique. Ces micro-organismes, Archaea ou Bacteria, sont notamment impliqués dans les cycles biogéochimiques des métaux (Fe, Mn), du soufre, de l'azote, du méthane et de l'hydrogène, avec des métabolismes carbonés auto- ou hétérotrophes variés. Malgré cette connaissance, la compréhension de la structuration et de la dynamique temporelle des communautés microbiennes reste difficile en raison de la très grande complexité des micro-niches formées par une cheminée hydrothermale active, cette complexité étant pour partie due au métabolisme des micro-organismes eux-mêmes.

Par contraste, l'étude microbiologique des édifices inactifs n'en est qu'à ses débuts. Ces premiers résultats font état de communautés microbiennes distinctes de celles des édifices actifs mais néanmoins abondantes et diverses.

En revanche les connaissances sur les micro-organismes eucaryotes ou les champignons liés aux sites hydrothermaux sont encore beaucoup trop fragmentaires pour pouvoir proposer quelque hypothèse que ce soit sur leur rôle constitutif ou fonctionnel dans les communautés hydrothermales.

4.3.3.2. Faune des sources hydrothermales profondes

Comme cela a été dit au début de ce chapitre et dans l'analyse bibliographique (4.2), les travaux concernant la diversité de la mégafaune et de la macrofaune colonisant les sources hydrothermales actives sont très nombreux (nettement moins en ce qui concerne la méiofaune). Avec l'exploration de nouveaux sites dans tous les océans, il est rapidement apparu que les assemblages d'espèces endémiques délimitaient de grandes provinces biogéographiques dont le nombre et la délimitation ont évolué avec l'accroissement des connaissances et les méthodes d'analyse utilisées (Tunnicliffe, 1997; Van Dover et al, 2002; Desbruyères et al, 2006; Bachraty et al, 2009; Moalic et al, 2012). Ainsi nous nous sommes basés sur les provinces biogéographiques délimitées dans l'analyse de Moalic et coll. (2012) et présentées sur la Figure 4-29.

Un inventaire global de la faune des sources hydrothermales profondes a été publié il y a quelques années (Desbruyères et al, 2006), la liste des espèces, réactualisée en 2008, étant disponible sur Internet (<http://www.sb-roscoff.fr/Ecchis/pdf/Handbook-Supplement-2006.pdf>). D'autres sites proposent des listes faunistiques assez exhaustives, comme celui de CHESSE (ChessBase; groupe Chemosynthetic Ecosystems du programme Census of Marine Life) ou la base de données BIOCEAN maintenue par l'Ifremer, mais ces listes couvrent des domaines plus larges que les sources hydrothermales profondes.

Dans le texte qui suit, pour chacune de ces cinq grandes provinces, un état des lieux de la biodiversité est présenté avec des données sur la structuration spatiale, ainsi que les connaissances acquises sur les réseaux trophiques au sein de ces zones. Une synthèse des connaissances sur la dynamique temporelle des sites actifs (4.3.3.3) conclut cette partie 4.3.

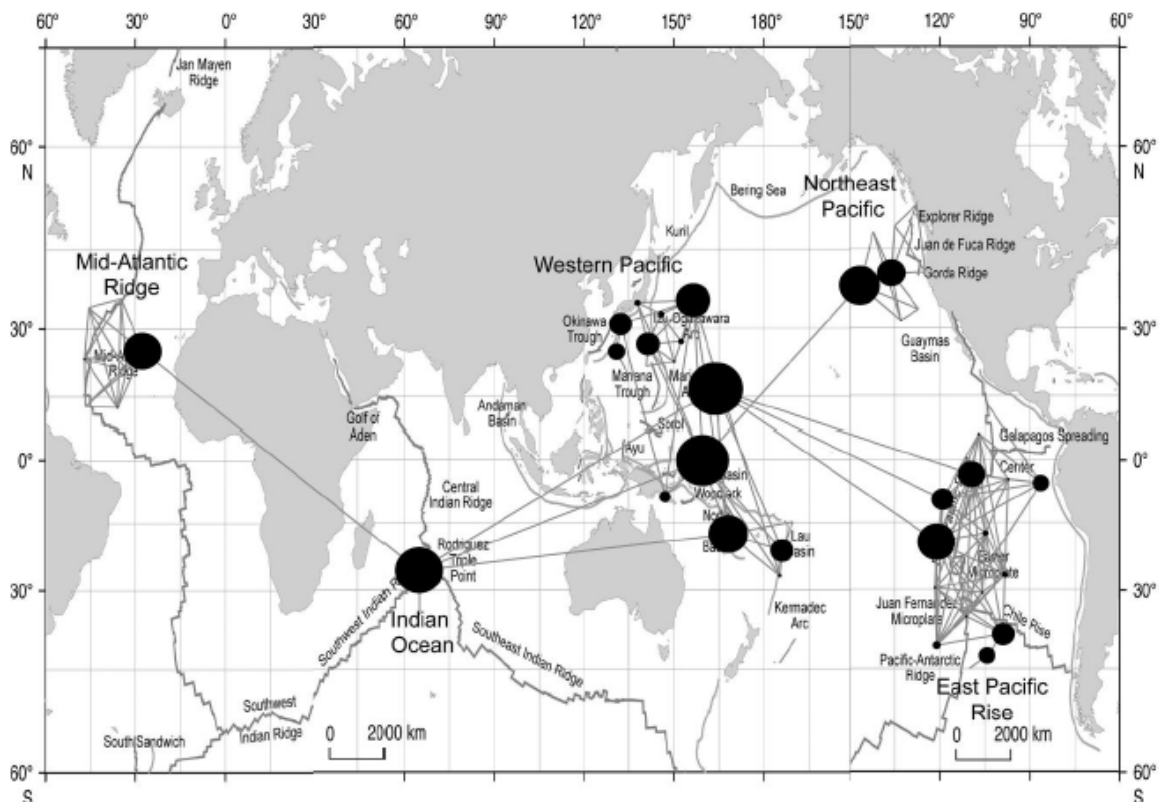


Figure 4-29 Réseau global de la diversité faunistique des sources hydrothermales établi à partir de la distance de Jaccard entre les zones (reproduit de Moalic et al, 2012; publication à consulter pour la méthode d'obtention de ce réseau).

Les cinq grandes provinces sont bien apparentes : Mid-Atlantic Ridge (MAR), Indian Ocean (IO), Western Pacific (WP), Northeast Pacific (NP) et East Pacific Rise (EPR).

Ride médio-atlantiqueLocalisation

Tableau 4-2 Champs hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique.

Nom de la Ride	Nom du champ	Profondeur (m)
Ride Médio-atlantique	Menez Gwen	840-865
	Lucky Strike	< 1620-1730
	Mount Saldanha	2300
	Rainbow	2260-2350
	Lost City	750-900
	Broken Spur	3050-3875
	TAG	3635-3670
	Snake Pit	3480
	Logatchev	2930-3020
	Ashadze-1	4100-4200

Diversité, composition et biomasse

L'étude des écosystèmes associés à la dorsale médio-atlantique concerne principalement les sources hydrothermales actives soutenues par la production chimiosynthétique locale. Les écosystèmes benthiques de la dorsale, basés sur l'apport photosynthétique de surface, devenus inactifs ou n'ayant jamais présenté d'activité hydrothermale sont, quant à eux, peu connus, malgré leur plus grande distribution spatiale et leur rôle concernant les patrons de productivité océanique, la biogéographie ainsi que vis-à-vis du management des activités humaines en haute mer (Bergstad et al, 2008).

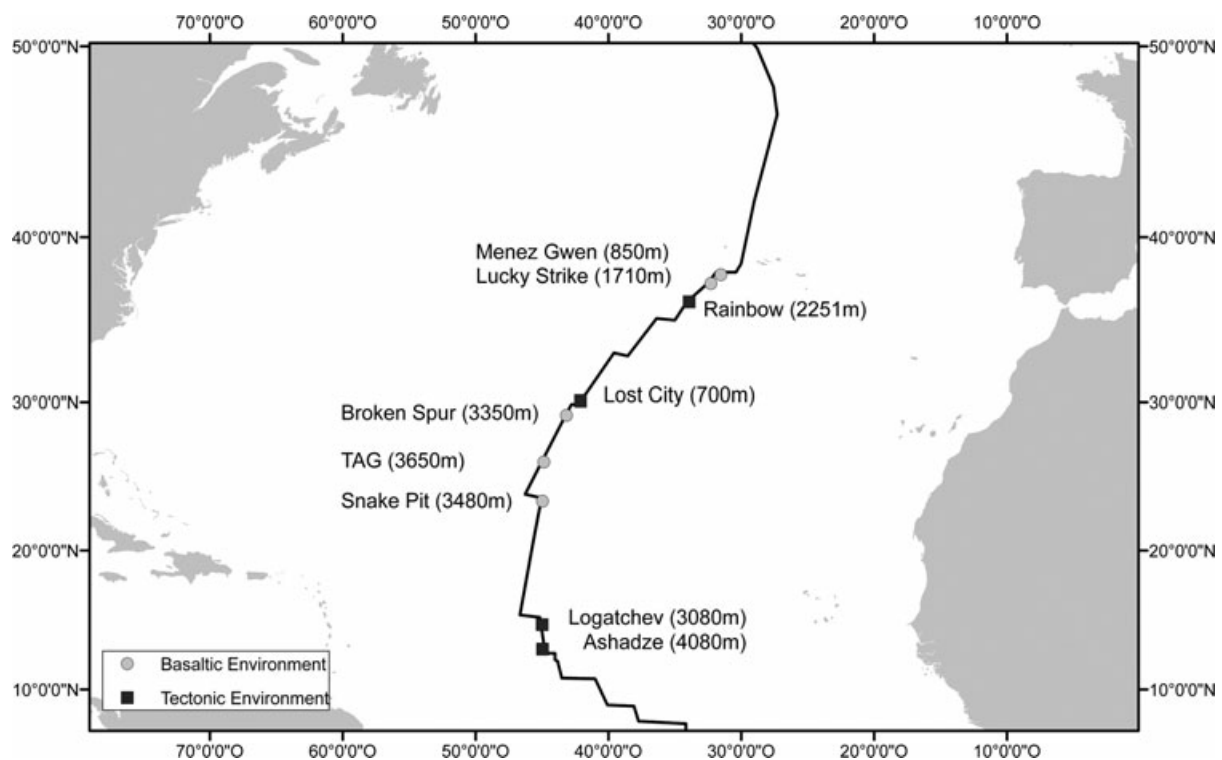


Figure 4-30 Positionnement et contexte géologique des neuf champs hydrothermaux connus de la partie Nord de la dorsale médio-atlantique (Fabri et al, 2011).

Les premières sources hydrothermales de la dorsale médio-atlantique (MAR) ont été découvertes en 1985 (Rona et al, 1986). A ce jour, 9 champs hydrothermaux se répartissant le long de la partie Nord de la dorsale ont pu être étudiés (Figure 4-30). Au sein du champ **Menez Gwen** situé à 850 mètres de profondeur, la cartographie des habitats de cinq sites actifs montre une **dominance systématique des Mytilidés** *Bathymodiolus azoricus*. Les surfaces soumises à l'activité hydrothermale vont de 59 à 200 m² et présentent de 28 640 à 50 120 individus de *B. azoricus*, dont la biomasse totale en poids humide s'étend de 50 à 380 kg (Marcon et al, 2013). La communauté de faune associée aux assemblages de *B. azoricus* se compose des crevettes *Chorocaris chacei*, *Mirocaris fortunata* et *Alvinocaris sp. aff. stactophila*, de nombreux gastéropodes principalement des *Lepetodrilus atlanticus* et *Protolira valvatoides*, du crabe *Segonzacia mesatlantica* ainsi que du crabe non endémique des sources hydrothermales *Chaceon affinis* (Desbruyères et al, 2001; Von Cosel et al, 1999). Sur les parois des cheminées, des agrégats de crevettes composés de *Chorocaris chacei* et *Mirocaris fortunata* constituent un deuxième type d'assemblage (Gebruk et al, 2000; Desbruyères et al, 2001; Galkin and Goroslavskaya, 2010; Llodra et al, 2000). En périphérie, des espèces non endémiques des sources hydrothermales sont représentées par des hydraires, et différents poissons : *Chaunax sp.*, *Trachyscorpia cristulata echinata*, *Neocyttus helgae*, *Epigonus telescopus* et *Beryx splendens* (Saldanha and Biscoito, 1997), typiques de la faune bathyale. En effet, compte-tenu de la faible profondeur de ce site, seulement 28 % des espèces de macro et mégafaune du champ Menez Gwen sont caractéristiques de l'habitat hydrothermal, les autres étant considérées comme des espèces « pénétrantes » (Desbruyères et al, 2000). La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 34 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

Bathymodiolus azoricus constitue également l'espèce dominante de la mégafaune des édifices du champ hydrothermal **Lucky Strike**, situé à 1700 mètres de profondeur (Desbruyères et al, 2001). La faune de l'édifice Tour Eiffel, le mieux étudié, se répartit selon quatre types d'assemblages (Figure 4-31) : de larges et denses amas de *B. azoricus* composés d'individus majoritairement de grande taille (assemblage 1), de petits amas de *B. azoricus* de petite taille séparés par des surfaces dénudées avec et sans couverture bactérienne (assemblage 2a, 2b), des essaims de crevettes principalement composés de l'espèce *Mirocaris fortunata* (assemblage 3) et des zones présentant de petites *B. azoricus* éparpillées sur des surfaces nues avec ou sans couverture microbienne (assemblage 4a, 4b) (Cuv elier et al, 2011). Les assemblages présentant des petits amas ou des individus dispersées de Mytilidés sans couverture microbienne sont dominés par les mêmes espèces : *B. azoricus* suivie des gastéropodes *Protolira valvatoides* et *Lepetodrilus atlanticus* puis le polynoidae *Branchipolynoe seepensis*. Les assemblages de Mytilidés de grande taille, quant à eux, se caractérisent par les espèces dominantes suivantes : *B. azoricus*, *M. fortunata*, *B. seepensis* et le polychète *Amathys lutzi*. Les assemblages de crevettes sont presque exclusivement peuplés de *M. fortunata*, ces dernières étant également très représentées au sein des assemblages de Mytilidés en petits amas et recouverts de tapis microbiens. Pour ces deux derniers types d'assemblages, l'amphipode *Luckia striki* est la deuxième espèce dominante accompagnée d'une espèce de polynoidae non déterminée au sein des assemblages de crevettes. La taille des Mytilidés montre une corrélation négative avec la richesse taxonomique des assemblages, avec la plus forte richesse spécifique associée aux assemblages de moules dispersés sans couverture microbienne au sein desquels 11 taxons sont représentés. La plus récente évaluation de la richesse spécifique de Lucky Strike est évaluée à 48 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

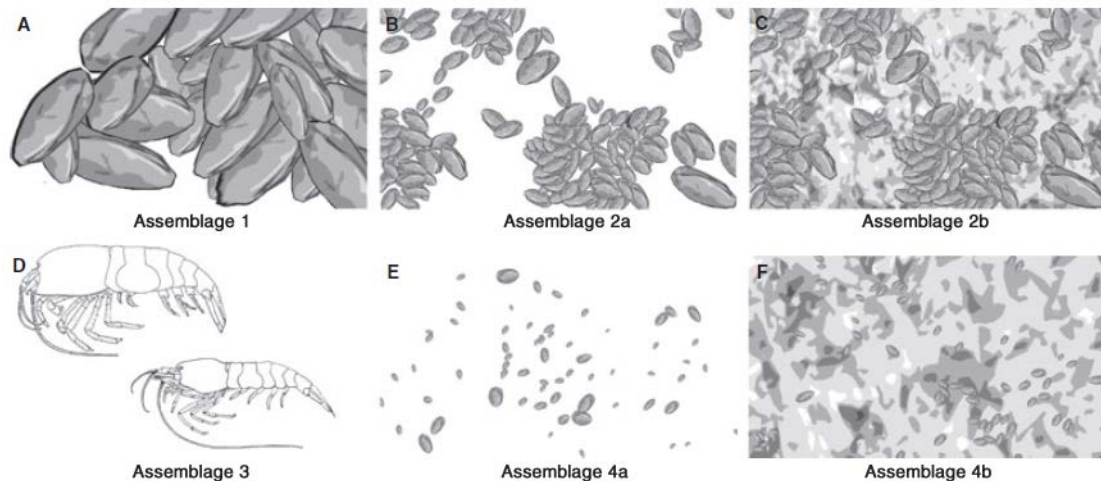


Figure 4-31 Assemblages caractéristiques de l'édifice Tour Eiffel (Cuvelier et al, 2011).

Le champ hydrothermal **Rainbow**, situé à 2300 m de profondeur, présente en sa partie centrale des édifices abritant de larges agrégats de crevettes *Rimicaris exoculata* et *Mirocaris fortunata* qui dominent la mégafaune. Une population relativement large de *Bathymodiolus azoricus* s'établit sur des zones de fluides diffus, 20% d'entre elles abritant des polynoidés commensaux, *Branchipolynoe seepensis*. Le long des édifices, quelques crabes *Segonzacia mesatlantica* peuvent être observés ainsi que des poissons Zoarcidés. Des ophiures, gastéropodes (*Phymorhynchus sp.*, *Mitrella nitidunila*, *Protolira valvatooides*, *Lepetrodrilus sp.*), pycnogonides, polynoidés et ampharetidés se présentent dans les zones recouvertes de sédiment (Desbruyères et al, 2001). De nombreux édifices jeunes et fortement actifs sont quasiment azoïques. La plus récente évaluation de la richesse spécifique de Rainbow est évaluée à 40 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2001).

Les sources du champ hydrothermal de **Lost City**, situé à 750 m de profondeur, présentent à proximité des émissions de fluide, une communauté de faune composée de gastéropodes, amphipodes, polychètes, nématodes, ostracodes, stomatopodes et bivalves. En périphérie des édifices, les habitats sont dominés par les coraux *Lophelia*, gorgones et *Desmophyllum*, galathées, gastéropodes turridés, foraminifères, ptéropodes, oursins, astérides, patelles, ophiures et balanes. Malgré l'absence d'assemblages d'espèces symbiotiques, caractéristiques des sources hydrothermales, la diversité spécifique est relativement élevée. La majorité de la faune présente des tailles inférieures à 100µm. La mégafaune mobile de Lost City constitue la majeure partie de la biomasse avec la présence de poissons (cerniers, anguilles fardées) et de crabes Geryonidés (Kelley et al, 2005). Les espèces dites « pénétrantes » sont nombreuses, la plus récente évaluation de la richesse spécifique de la faune hydrothermale est évaluée à seulement sept espèces (Fabri et al, 2011).

Le champ de **Broken Spur** situé à 3350 m de profondeur, présente des essaims de crevettes dominés par *Rimicaris exoculata* globalement peu denses (10 ind.m⁻²) mais pouvant occasionnellement atteindre 2000 ind.m⁻². *Mirocaris fortunata* et *Alvinocaris markensis* ont également été répertoriés (Martin and Christiansen, 1995; Copley et al, 1997). La faune est composée de l'ophiure *Ophioctenella acies* en densité d'environ 30 ind.m⁻² sur les parois des édifices, d'anémones *Actinia sp.*, de polychètes ampharetidés en densité pouvant atteindre 300 ind.m⁻² à la base des édifices, de crabes *Segonzacia mesatlantica* avec une densité maximum autour de 6 ind.m⁻² au niveau de structures en plate-forme. De rares mytilidés, hybrides de *Bathymodiolus puteoserpentis* et *B. azoricus*, ont pu être identifiés ainsi que des gastéropodes *Phymorhynchus moskalevi* et des galathées *Munidopsis sp.* (Van Dover, 1995; Copley et al,

1997; O'Mullan et al, 2001). La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 15 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

La faune hydrothermale des édifices du champ **TAG**, situé à 3650 m de profondeur, est dominée par *Rimicaris exoculata* dont l'abondance moyenne est estimée à 1191 ind.m⁻² (Copley et al, 2007). Les crevettes *Chorocaris chacei*, *Mirocaris fortunata* et *Alvinocaris markensis* se présentent au niveau des zones plus basses des édifices. En périphérie, l'anémone *Maractis rimicarivora* s'établit en densité généralement de 10 à 20 ind.m⁻² mais peut occasionnellement atteindre 100 ind.m⁻² (Van Dover, 1995). Sont également présents le crabe *Segonzacia mesatlantica*, la galathée *Munidopsis sp.*, le gastéropode *Phymorhynchus moskalevi*, l'ophiure *Ophioctenella acies* ainsi que des poissons zoarcidés et synoaphobranchidés (Gebruk et al, 1997). La méiofaune inclut une espèce de nématode, une espèce de copépode cyclopoïde et une espèce d'isopode desmosomatidé (Galkin and Moskalev, 1990). La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 19 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

Le champ hydrothermal **Snake Pit**, situé à 3480 m de profondeur, est également dominé par *Rimicaris exoculata*, avec quelques individus de *Mirocaris fortunata* et *Chorocaris chacei*. Quelques assemblages de moules *B. puteoserpentis* se présentent à la base des édifices. Les espèces dominantes au sein de ces assemblages sont l'ophiure, *Ophioctenella acies*, les crevettes *Rimicaris exoculata* et *Chorocaris chacei* et les polychètes *Opisthotrochopodus sp.* ainsi qu'une espèce de Spionidé non dé terminée. Ces 5 e espèces comptent pour 70% de l'abondance totale (Desbruyères et al, 2001). La communauté de méiofaune se compose de nématodes, copépodes, ostracodes et acariens avec un total de 15 espèces, la densité est particulièrement faible (43±5 individus pour 10 cm²). Au sein des assemblages de *B. puteoserpentis*, la méiofaune contribue pour un minimum de 50% à la diversité globale (Zekely et al, 2006). La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 32 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

Rimicaris exoculata domine la mégafaune du champ **Logatchev** situé à 3080 m de profondeur, et constitue un premier type d'assemblage basé à proximité des émissions de fluides hydrothermaux. Des assemblages de bivalves Mytilidés, appartenant à l'espèce *B. puteoserpentis*, forment un deuxième type d'assemblage. La biomasse peut y dépasser les 70 kg.m⁻² (poids humide avec coquilles). Ces Mytilidés abritent des polynoidés commensaux *Branchipolynoe aff. seepensis*. La faune associée aux assemblages de Mytilidés est dominée en abondance et en biomasse par l'ophiure *Ophioctenella acies* (Van Dover and Doerries, 2005). Dans les sédiments à proximité des sources, on re trouve un troisième type d'assemblage dominé visuellement par des vésicomysidés, *Ectenagena aff. kaikoi* (Gebruk et al, 2000). La faune associée comprend également trois espèces de crevettes; *Chorocaris chacei*, *Mirocaris fortunata* et *Alvinocaris markensis*. D'importantes populations d'ophiures, *Ophioctenella acies*, et de gastéropodes, *Phymorhynchus moskalevi*, sont observées en périphérie des assemblages de Mytilidés. La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 24 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

Enfin, le champ hydrothermal **Ashadze-1**, le plus profond de la MAR à 4080 m, possède une communauté de mégafaune benthique dominée par deux espèces, l'anémone *Maractis rimicarivora*, dont les densités peuvent atteindre 32 ind.m⁻², et le polychète chaetopteridé, *Phyllochaetopterus sp* (Fabri et al, 2011). Ces espèces forment de larges populations sur les parois des cheminées actives et inactives ainsi que sur des fragments de cheminée retrouvés au sol et dont la majorité est recouverte de sédiment hydrothermal. L'ophiure *Ophioctenella*

acies et le pycnogonide *Sericosura heteroscela* sont communs parmi les assemblages de chaetopteridés. Trois espèces de crevettes Alvinocaridés peuvent se présenter sur les parois des sources actives : *Mirocaris fortunata*, *Chorocaris chacei*, et de très rares *Rimicaris exoculata*. On retrouve également des gastéropodes *Peltospira smaragdina*, *P. thorvaldssoni*, *Shinkailepas briandi*, et *Pseudorimula midatlantica* dans le sens décroissant des abondances ainsi que des *Phymorhynchus*. La présence de galathées *Munidopsis exuta* a pu être remarquée sur des structures fortement oxydées, en périphérie des centres actifs. Le crabe *Segonzacia mesatlantica* et le poisson zoarcidé *Pachycara thermophilum* constituent les prédateurs de la zone. La plus récente évaluation de la richesse spécifique est évaluée à 29 espèces, les espèces dites « pénétrantes » étant exclues (Fabri et al, 2011).

Des champs hydrothermaux supplémentaires le long de la dorsale MAR, à ce jour peu caractérisés concernent le champ Saldanha (36°34'N, 32°26'W, 2200m) et le champ 5°S situé à 3050 mètres de profondeur. Une caractérisation préliminaire des communautés faunistiques du champ Saldanha atteste de l'absence quasi totale de macro- et de mégafaune autour des émissions de fluide hydrothermal avec seulement 2 juvéniles du gastéropode *Phymorhynchus sp.* répertoriés. Les espèces bathyales dites « pénétrantes » sont représentées par l'éponge *Cinchyra sp.* et au moins 4 espèces de poissons (Biscoito et al, 2006). Les champs hydrothermaux découverts récemment sur la partie sud de la MAR indiquent la présence de *R. exoculata*, *B. puteoserpentis* et du gastéropode *L. atlanticus* au site 5°S (Koschinsky et al, 2006; Haase et al, 2007).

En résumé, la comparaison de la structure des communautés des champs hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique révèle la nature variable des assemblages faunistiques dominants. En effet, l'espèce visuellement dominante des différents champs hydrothermaux distingue les sites les moins profonds de la dorsale, Menez Gwen et Lucky Strike, de ceux situés plus au sud et à de plus grandes profondeurs, Snake Pit, TAG, Broken Spur et Logatchev, par la dominance des Mytilidés *Bathymodiolus azoricus* ou des crevettes *Rimicaris exoculata*, respectivement (Copley et al, 1997; Gebruk et al, 1997; Desbruyères et al, 2001). Cependant, le site Rainbow, le plus profond de la triple jonction des Açores, se rapproche des sites du sud par la dominance des crevettes, *R. exoculata* et *M. fortunata*. Ashadze-1 quant à lui dispose d'une communauté de mégafaune dominée par l'anémone *Maractis rimicarivora* et le polychète chaetopteridé, *Phyllochaetopterus sp.* Lost City ne présente pas de regroupement faunistique caractérisant de réels assemblages. Une distinction peut être faite par la présence de l'espèce *Bathymodiolus azoricus* dans la zone « Nord » (Menez Gwen, Lucky Strike, Rainbow) et de *Bathymodiolus puteoserpentis* dans la partie « Sud » (Snake Pit, Logatchev), le champ Broken Spur représentant une zone intermédiaire de par la présence d'hybrides des deux espèces (Gebruk et al, 2000; O'Mullan et al, 2001).

Distribution spatiale et facteurs structurants

La dorsale médio-atlantique présente des **taux d'accrétion relativement faibles** (25 mm.an⁻¹) vis-à-vis des dorsales rapides telles que l'EPR (80 à 180 mm.an⁻¹), aussi ces dernières permettent une fréquence spatiale de sources hydrothermales plus élevée (Baker et al, 1995). Richesse spécifique et activité de la dorsale montrent une corrélation positive lorsque trois sites de la MAR (Lucky Strike, Snake Pit, Logatchev), trois sites de l'EPR Nord ainsi que deux de l'EPR Sud sont comparés (Van Dover and Doerries, 2005). Malgré la plus grande instabilité des dorsales rapides, susceptible de contraindre la mise en place de structures de communautés complexes, la plus grande fréquence spatiale des sources hydrothermales semble favoriser une plus forte diversité faunistique et une plus grande similarité inter-

champs en lien avec des échanges entre populations et ainsi des taux de recolonisation supérieurs (Juniper and Tunnicliffe, 1997; Turnispeed et al, 2003; Van Dover and Doerries, 2005). De plus, l'**âge de la dorsale** peut également être impliqué, permettant un temps d'accumulation des espèces plus ou moins grands, la MAR étant une dorsale plus jeune que l'EPR (Juniper and Tunnicliffe, 1997).

La **séparation bathymétrique** et les variations des conditions environnementales associées à la profondeur et au **contexte géologique** sont supposées contribuer aux différences faunistiques observées le long des sites de la MAR. En effet, les variations bathymétriques, en jouant sur la pression hydrostatique, affectent directement les organismes mais également de manière indirecte en modifiant les conditions environnementales de l'écosystème, notamment vis-à-vis des phénomènes de séparation de phase. A faible profondeur, il est supposé que le fluide hydrothermal perd de sa toxicité (soufre, métaux dissous et particulaires) mais également une partie des composés alimentant la chimiosynthèse (Charlou et al, 1996). Ainsi, à faible profondeur on observe une diminution du nombre d'espèces endémiques et une augmentation des espèces « pénétrantes » (Desbruyères et al, 2001). Le contexte géologique responsable de la forte concentration en métaux dissous (Fe, Cu, Zn, Mn) du champ TAG et de l'importante charge de particules inorganiques au sein des champs ultramafique (Rainbow, Lost City, Ashadze et Logatchev) est supposé gêner la capacité de filtration des suspensivores pouvant ainsi contribuer à l'absence ou au faible nombre de Mytilidés observés. Aussi, le contexte géologique agit *via* la **composition chimique** du fluide et donc les concentrations en éléments nécessaires à la chimiosynthèse (Le Bris and Duperron, 2010). Ainsi, les concentrations exceptionnellement élevées de méthane et d'hydrogène mais relativement faibles de sulfure d'hydrogène au sein du champ Lost City peuvent intervenir sur le faible nombre d'espèces endémiques observées. La structure des communautés faunistiques de la MAR semble se différencier le long de la dorsale avec une ségrégation entre les champs de la triple jonction des Açores et les champs plus au sud. Malgré tout, l'identification de zones intermédiaires telles que Broken Spur et Rainbow atteste de l'absence de deux provinces biogéographiques réellement séparées entre les zones du Nord et celles du Sud (Desbruyères et al, 2001; O'Mullan et al, 2001). La comparaison faunistique des champs hydrothermaux à l'échelle globale des océans confirme la non ségrégation de la zone triple jonction des Açores avec les autres champs de la MAR (Bachraty et al, 2009; Figure 4-29). De même, la distribution d'espèces communes ou très proches le long de la MAR renforce cette hypothèse (Gebruk and Mironov, 2006; Haase et al, 2007).

Les communautés faunistiques des sources hydrothermales sont généralement distribuées en cercles concentriques autour des émissions de fluides; les bactérivores sur les parois hydrothermales, les espèces symbiotiques dans les zones de diffusion intermédiaire et les filtreurs en périphérie (Colaço et al, 2002). Les facteurs abiotiques majeurs affectant cette distribution sont la **fluctuation des températures** et la **composition chimique** du fluide, fortement dépendants (voir 4.4). Ainsi, à Lucky Strike, sur l'édifice Tour Eiffel, de forts écarts de température ainsi que des maximums de température élevés caractérisent les assemblages de crevettes et les larges et denses amas de *B. azoricus* de grandes tailles, alors qu'une plus grande stabilité de la température ainsi que des maximums moins élevés sont associés aux assemblages de petites modioles, en amas ou dispersées, avec ou sans tapis microbiens (Cuvelier et al, 2011). Les niches de température associées à *B. azoricus* et aux crevettes se distinguent fortement mais présentent un chevauchement pour les crevettes et les Mytilidés de grandes tailles (Figure 4-32). Cette distribution est généralement compatible avec les études sur la tolérances physiologique des espèces comme *Mirocaris* (Shillito et al, 2006) ou *Rimicaris* (Ravaux et al, 2003 et 2007).

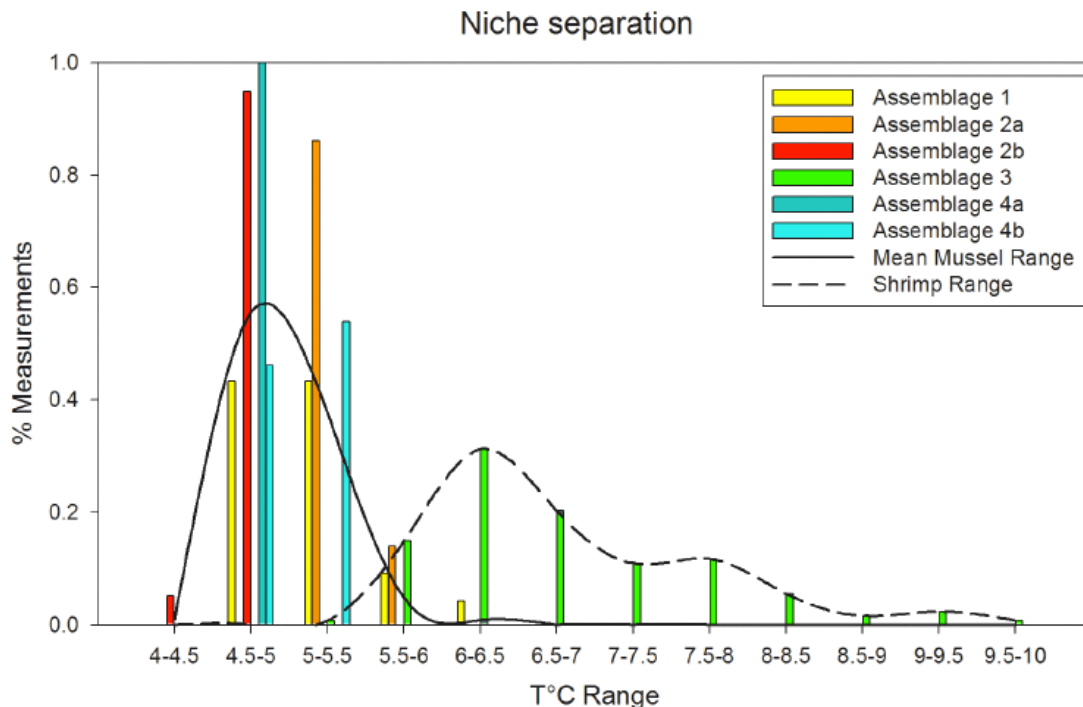


Figure 4-32 Histogramme représentant le pourcentage des mesures de température pour chaque assemblage (Cuvelier et al, 2009).

Les **facteurs biotiques** agissent aussi sur la distribution faunistique. En effet, au niveau de Tour Eiffel, la compétition intra spécifique (entre les moules) et interspécifiques (bactéries et moules, moules et crevettes) pour l'accès à la ressource est susceptible de jouer un rôle dans la distribution spatiale des différentes communautés (Cuvelier et al, 2009). Les Mytilidés sont supposées pouvoir également supplanter des taxons chimiosynthétiques de la macrofaune sessile pour l'accès aux fluides (Lenihan et al, 2008) : au sein de leurs assemblages le flux de fluide est redirigé horizontalement, permettant ainsi d'étendre leur niche écologique (Johnson et al, 1994) et leur mobilité leur confère la possibilité de rechercher les habitats les plus favorables (Govenar et al, 2004). Des **interactions de nature écologique** peuvent aussi être avancées pour expliquer les différences entre TAG et Ashadze : l'empêchement de l'établissement des anémones *M. rimicarivora*, dominantes à Ashadze, par la présence des crevettes *R.exoculata* dans les zones de fortes températures sur TAG ou, inversement, la prédation de *M.rimicarivora* envers *R.exoculata* sur Ashadze (Copley et al, 1999).

Réseaux trophiques

Les communautés de faune associées aux assemblages de *Bathymodiolus azoricus* des différents champs hydrothermaux (Menez Gwen, Lucky Strike, Rainbow, Broken Spur, Logatchev, Snake Pit et TAG) sont soutenues en majeure partie par des bactéries chimioautotrophes comme l'atteste l'analyse de la composition en acides gras polaires et les isotopes stables du carbone et de l'azote (Colaço et al, 2002 et 2007). Les rapports isotopiques dévoilent une dichotomie systématique au sein de ces communautés avec d'un côté *Bathymodiolus azoricus*, son polychète commensal *Branchipolynoe* et le gastéropode *Phymorhynchus sp.* lorsqu'il se présente, qui se distinguent d'un deuxième groupe composé des crevettes et des crabes présentant des rapports isotopiques en carbone significativement appauvris, $\delta^{13}\text{C} = -30\text{‰}$ et -11‰ , respectivement (Figure 4-33) (Colaço et al, 2002; De Busslerolles et al, 2009).

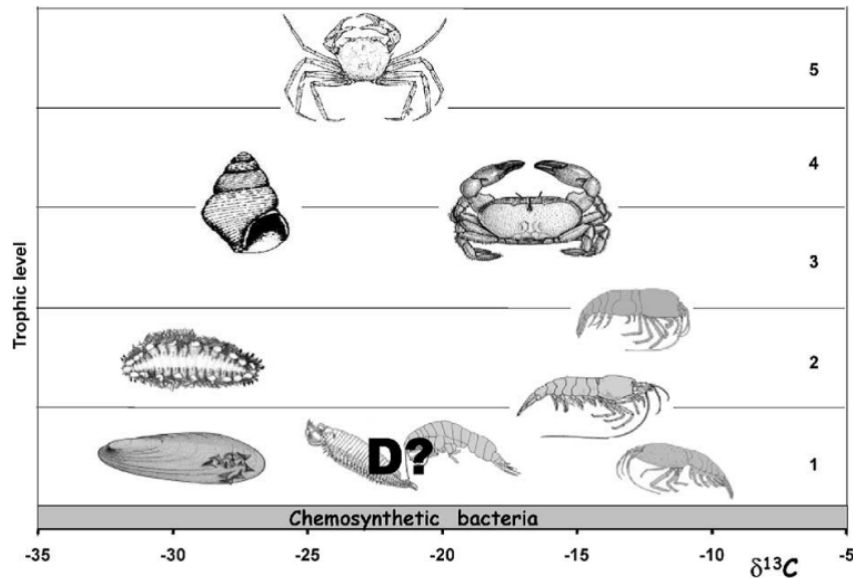


Figure 4-33 Modèle conceptuel du réseau trophique des communautés hydrothermales de la MAR. (Colaço et al, 2002).

Les animaux sont positionnés selon leur niveau trophique et leur $\delta^{13}\text{C}$. D se réfère à une position trophique non définie.

Les consommateurs primaires identifiés sont : *Bathymodiolus azoricus*, *Rimicaris exoculata* et des petits invertébrés habitant le byssus des moules dont la position trophique n'est pas définie (rang 1, Figure 4-34). *Segonzacia atlantica* a un impact de prédation plus important sur les crevettes et les petits invertébrés que sur *Bathymodiolus azoricus* alors que *Phymorhynchus spp.* s'alimente principalement de *Bathymodiolus azoricus* (Colaço et al, 2002). Le gastéropode *Phymorhynchus sp.*, habituellement associé aux Mytilidés, est identifié comme un charognard de crevettes au sein des champs Tag et Ashadze 1 (qui ne présentent pas de Mytilidés). Son large intervalle de $\delta^{13}\text{C}$ indique un régime alimentaire opportuniste. En effet, cette espèce est également susceptible de se nourrir de gastéropodes et de polychètes (Gebruk et al, 2000). Les crevettes *Chorocaris chacei* et *Mirocaris fortunata* peuvent être considérées comme mixotrophes, s'alimentant sur les bactéries et d'autres crevettes ou petits invertébrés, alors qu'*Alvinocaris markensis* s'avère être un prédateur des autres crevettes. Finalement, *Chaceon affinis*, espèce bathyale commune à Menez Gwen, présente le niveau trophique le plus élevé (Colaço et al, 2002). La composition en acides gras des organismes présente la même dichotomie observée à l'aide des isotopes stables du carbone et de l'azote, révélant une nutrition basée sur des proportions variables de bactéries (Colaço et al, 2007). La faune du premier groupe (-30‰) dispose d'une plus grande proportion de biomarqueurs de bactéries sulfo-oxydantes comparée à celle du deuxième groupe (-11‰) qui présente quant à lui des biomarqueurs de bactéries anaérobies sulfato-réductrices (SRB) en quantité plus élevée. De plus, cette étude souligne que *M. fortunata*, contrairement à *C. chacei* et *A. markensis* présente des biomarqueurs de bactéries sulfo-oxydantes, son régime alimentaire pouvant être non seulement carnivore mais également bactérivore. Cependant ce dernier résultat pourrait découler de l'alimentation bactérienne des proies de *M. fortunata*. L'ampharetidé *A. lutzii* présente un profil d'acide gras caractéristique d'un régime bactérivore diversifié et serait ainsi un détritivore non sélectif (Colaço et al, 2007).

La structure trophique des communautés de méiofaune n'est que très peu connue à ce jour. Sur le champ Snake Pit, l'évaluation du régime trophique de la communauté de méiofaune présente au sein des assemblages de *Bathymodiolus puteoserpentis*, basée sur la structure

buccale des nématodes ou les pièces buccales et les siphons pour les copépodes, révèle que 95% des espèces de la communauté sont des consommateurs primaires et majoritairement dépositivores. Quelques copépodes et acariens s'avèrent être des parasites. Aucun prédateur n'a pu être mis en évidence (Zekely et al, 2006).

Les réseaux trophiques sont susceptibles de présenter des variations inter et intra champs. Ainsi, les endosymbiotes de *B. azoricus* et *B. puteoserpentis* appartiennent à des phylotypes très similaires, leurs distributions et abondances relatives au sein des deux espèces ne montrent pas de différence significative. Cependant, pour chacune des deux espèces de Mytilidés, l'abondance relative des thiotrophes et des méthanotrophes montre des variations intra et inter champs (Duperron et al, 2006). Plus récemment, des expérimentations d'enrichissements isotopiques et d'hybridations de *B. azoricus* ont pu confirmer l'assimilation de carbone provenant des deux types d'endosymbiotes ainsi que l'adaptation de ces derniers à la disponibilité de leur substrat, révélant une plasticité symbiotique importante (Riou et al, 2008). Aussi, la contribution relative des méthanotrophes vis-à-vis des thiotrophes au régime alimentaire de *B. azoricus* semble plus élevée pour les individus de grande taille, ceux-ci s'établissant à plus grande proximité du fluide hydrothermal (Cuvelier et al, 2009; De Busserolles et al, 2009; Marcon et al, 2013). Parallèlement, les isotopes stables du carbone des Mytilidés peuplant les champs hydrothermaux de la MAR présentent une forte variabilité intra champs (Colaço et al, 2002; De Busserolles et al, 2009). Ainsi, la double endosymbiose pourrait permettre à *B. azoricus* de disposer d'un avantage de colonisation pour des habitats dont les concentrations en méthane et en hydrogène sulfuré sont fortement variables (Trask and Van Dover 1999; Colaco, Dehairs et al, 2002; Fiala-Medioni, McKiness et al, 2002; De Busserolles et al, 2009). Les crevettes *R. exoculata* des champs les plus profonds (Broken Spur, TAG, Snake Pit et Logatchev) présentent un $\delta^{13}\text{C}$ significativement différent de celles du champ Rainbow, ces dernières étant plus enrichies (Colaço et al, 2002). Malgré les conditions environnementales fortement variables des champs Rainbow, TAG, Logatchev, les communautés épibiotiques de *R. exoculata* sont dominées par les mêmes types bactériens : des epsilon et des gamma-proteobactéries (Peteren et al, 2010). Des différences de signatures isotopiques inter-champs sont également remarquées pour *Mirocaris fortunata* dont les valeurs sont plus enrichies au niveau de Rainbow, ainsi que pour le gastéropode *Phymorhynchus* sp. présentant des signatures significativement différentes en présence ou en absence de Mytilidés, indiquant un régime trophique variable (Colaço et al, 2002).

A l'échelle d'un édifice, l'étude des réseaux trophiques des communautés de faune, associées à 12 assemblages de *B. azoricus* de l'édifice Tour Eiffel (Lucky Strike), abordée par les isotopes stables du carbone et de l'azote, révèle la même dichotomie observée au sein des autres champs de la MAR ainsi qu'une forte variabilité spatiale (De Busserolles et al, 2009). Aussi, les conditions environnementales expliqueraient les variations observées chez un tiers des 14 espèces étudiées. Cette étude confirme ainsi l'hypothèse soumise par de nombreux auteurs sur le rôle du fluide hydrothermal à très petites échelles sur le réseau trophique. Globalement, au sein de chacun des champs de la MAR, la faune présente de relativement larges écarts de signatures isotopiques et plus particulièrement pour le carbone.

Océan Indien

Deux champs hydrothermaux actifs, **Kairei** et **Edmond**, séparés de 160 km, ont été découverts le long de la dorsale centrale indienne (CIR). Les fluides hydrothermaux de ces deux zones, caractérisées par un taux d'expansion intermédiaire (48 mm/an), montrent des signatures géochimiques distinctes. En 2000, le champ hydrothermal Kairei a été le premier site hydrothermal actif découvert sur cette dorsale par le submersible Kaiko (Hashimoto et al, 2001). Ses fluides semblent être particulièrement riches en hydrogène. En revanche, le champ hydrothermal Edmond voisin montre des concentrations en hydrogène inférieures, typiques des sites situés sur la dorsale médio-atlantique (Gallant and Von Damm, 2006).

De nouveaux sites actifs ont été découverts récemment lors d'une campagne chinoise sur la dorsale Carlsberg située au nord-ouest de la dorsale indienne (NWIR, Tao et al, 2013) et des échantillons de sulfures ont été récoltés. Cependant, aucune donnée concernant la faune n'est encore disponible. Enfin, en 2009, des observations à l'aide du submersible Shinkai 6500 ont permis de localiser de nouvelles sources actives sur les segments centraux S16 et S15 de la dorsale indienne (Nakamura et al, 2012). Les assemblages de faune de deux nouveaux champs (**Dodo** et **Solitaire**) ont été caractérisés et comparés avec les autres communautés de la dorsale indienne.

Contexte géologique

La partie sud de la dorsale indienne, s'étend de 23°S jusqu'au point triple Rodriguez à 25°39 S (Van Dover et al, 2001). Cette région longue de 275 km est une zone à taux d'écartement intermédiaire (50 à 60 mm/an) englobant les cinq segments septentrionaux de la ride (S1 à S5). La vallée axiale d'une largeur de 5 à 8 km dans cette région est orientée Nord/Nord-Ouest. Le champ hydrothermal **Kairei** (2415-2460 m) est situé à 25°19,2S, 70°02,4E sur le segment S1 au nord du point triple Rodriguez. La zone principale d'activité hydrothermale intense (306° à 365°C) le long d'un axe Ouest/Nord-Ouest, s'étend sur 80 m le long du mur de la vallée et mesure 30 m de largeur. Plusieurs édifices inactifs laissent présager que le site est actif depuis plusieurs dizaines d'années, le flux hydrothermal s'étant concentré dans les trois monts hydrothermaux actuels. Les zones d'émissions diffuses sont restreintes aux flancs de ces complexes de haute température. Au moins sept sites actifs incluant des fumeurs noirs ont été observés, avec des édifices pouvant atteindre 10 m de hauteur. La température maximale mesurée était de 360°C, avec un pH de 3,4 (Hashimoto et al, 2001). Les fluides hydrothermaux purs ont des compositions identiques, avec des chlorinités supérieures à celles de l'eau de mer ambiante (540 mmol.kg⁻¹) et des concentrations en fer de 0,5 mmol.kg⁻¹ (Van Dover et al, 2001). Le champ hydrothermal **Edmond** (23°52,7S, 69°35,8E; 3290 - 3320 m) a été découvert à environ 160 km Nord/Nord-Ouest du champ Kairei. Il est situé à l'extrémité nord du segment S3, à 6 km de la vallée axiale adjacente. Ce champ de 100 x 90 m est construit sur une petite extension. Le champ Edmond est dominé par de vieilles structures de sulfures et par un talus de sulfures massif, indiquant que, tout comme le champ Kairei, l'activité hydrothermale y est présente depuis longtemps. La présence de sédiments d'oxyhydroxydes de fer de couleur orange-marron est commune, s'accumulant dans les dépressions et recouvrant les structures hydrothermales ainsi que le talus. Les manifestations hydrothermales prennent plusieurs formes et différentes morphologies de cheminées peuvent être observées. Les zones d'activité hydrothermale intense sont concentrées dans des groupements de grandes cheminées (jusqu'à 20 m de hauteur et 2 m de diamètre) desquelles sortent des fumées noires s'échappant de plusieurs orifices et structures en nid d'abeilles. Entre ces groupements de structures, de plus petites structures (5 m de hauteur) émettent des fluides noirs qui s'échappent plus lentement. La présence de zones de diffusion importantes et de blocs d'anhydrites suggère que l'entraînement d'eau de mer en subsurface et les processus

de mélange s'effectuent sur une grande surface, fournissant plusieurs microhabitats pour les micro-organismes, comme en témoignent de grandes zones sédimentaires couvertes par des tapis microbiens. Les fluides hydrothermaux (273 à 382°C) provenant de 4 sites sur le champ Edmond ont une chlorinité 70% plus élevée que celle de l'eau de mer ambiante, ce qui en fait les saumures les plus chauds récoltés sur les dorsales. Les fluides de ce champ ont des concentrations de fer élevées (14 mmol.kg⁻¹). Cet enrichissement est probablement lié à la chlorinité et à la température élevées des fluides de ce champ comparativement à ceux de Kairei. Les fluides de ces deux champs sont caractérisés par de faibles pH (3 à 25°C) et de fortes concentrations de H₂S, disponibles pour les processus métaboliques. Tout comme sur le champ Kairei, les fluides de haute température d'Edmond semblent uniformes au niveau de leur composition chimique, suggérant la présence d'une seule source, comme ce qui est observé sur la dorsale médio-atlantique.

En 2009, des observations à l'aide du submersible Shinkai 6500 ont permis de localiser les sources actives des champs hydrothermaux **Dodo et Solitaire**, situés sur les segments centraux S16 et S15 de la dorsale indienne, de caractériser les assemblages de faune et de les comparer avec les autres communautés. Le **site Dodo** est situé à 18°20,1'S, 65°17,9'E à une profondeur de 2745 m (Nakamura et al, 2012), directement sur la dorsale. La zone d'émission des fluides se concentre dans un périmètre d'environ 15 m de diamètre où de nombreux petits fumeurs noirs sont émis directement à partir de fissures dans le plancher océanique. Trois édifices actifs ont été identifiés avec des cheminées mesurant moins de 1 m de hauteur, et une température maximale de 356°C (pH 3.2) a été mesurée. La concentration en Cl des fluides était significativement enrichie par rapport à celle de l'eau de mer, ce qui suggère la présence d'une séparation de phase en subsurface et un enrichissement en saumures. Les concentrations en H₂ étaient aussi particulièrement élevées alors que celles de CH₄ et de CO₂ sont typiques des fluides des dorsales médio-océaniques. Des cheminées diffusant des fluides clairs et des zones d'émissions de flux diffus sur les basaltes ont également été observées. De nombreuses taches de couleur brunâtre avec des structures en forme de cratères pouvant être d'anciens fumeurs ont été répertoriées. Cette zone inactive se prolonge sur plus de 50 m dans l'axe Nord/Sud et au moins 200 m dans l'axe Est/Ouest, les sites actifs étant situés au centre. Un deuxième site hydrothermal, le **champ Solitaire**, a été découvert sur le flanc ouest de la vallée axiale du segment de la CIR S15 (19°33,4S, 65°50,9 E) à une profondeur de 2606 m (Nakamura et al, 2012). La zone hydrothermale est d'environ 50 m par 50 m, soit beaucoup plus étendue que la zone du champ Dodo et comparable aux deux autres champs de la CIR. Trois sites principaux ont été identifiés avec des cheminées de moins de 5 m de hauteur avec formation de petits monts à leurs bases alors que la plupart des champs hydrothermaux hors axe (comme Kairei et Edmond) présentent de grandes structures de cheminée sur de grands monts de sulfures massifs. Plusieurs fumeurs noirs ont été observés et une température maximale de 296°C a été mesurée. Ici les fluides ont une chlorinité inférieure à celle de l'eau de mer ambiante et un pH plus élevé (4.8) que celui des autres fluides de la CIR. Les concentrations en H₂ sont plus faibles que celles du site Dodo mais comparables à celles d'autres sites médio-océaniques, tout comme les concentrations de CH₄ et de CO₂. Les fluides des champs Solitaire et Dodo se caractérisent également par un fort ratio K / Cl, parmi les plus élevés rapportés. La plupart des émissions hydrothermales du champ **Solitaire** sont translucides. Ce champ est caractérisé par de nombreuses zones d'émissions diffuses, ce qui est atypique sur les autres champs de la CIR. La présence d'un talus épais et fortement perméable favorise la création de zones de mélange entre les fluides chauds et l'eau de mer en subsurface, fournissant un large spectre de conditions physico-chimiques pour la colonisation par les micro-organismes en subsurface et par la faune de plus grande taille sur le plancher océanique.

La biodiversité associée aux sites hydrothermaux de l'océan Indien est encore mal connue et ce malgré l'intérêt que pourrait revêtir cette dorsale dans l'étude de la dispersion des espèces hydrothermales à l'échelle mondiale (Van Dover et al, 2001). A ce jour, seulement quelques études se sont penchées sur l'écologie des communautés associées à ce système-relais entre les océans Atlantique et Pacifique. Malgré sa position intermédiaire, la grande distance qui sépare les sites de l'océan Indien de ceux des autres dorsales laisse envisager la présence d'espèces qui auraient pu évoluer distinctement de celles des autres sites hydrothermaux (Van Dover et al, 2001). Ainsi, au niveau mondial, il a été observé que les champs hydrothermaux les plus proches, localisés sur des segments de dorsales adjacents, partagent des pools de gènes et d'espèces (Van Dover et al, 1990; Maas et al, 1999; Vrijenhoek 1997; Shank, Fornari et al, 1998) alors que les sites les plus éloignés ont des listes d'espèces distinctes et partagent peu d'espèces (Tunnicliffe, 1988). Il existe des alliances taxonomiques au niveau du genre entre la faune abyssale de l'océan Indien et celle des bassins arrière-arc isolés de l'ouest du Pacifique, laissant présager une connexion historique entre ces sites (Hessler and Lonsdale 1991). Globalement, la faune profonde de l'océan Indien se rapprocherait davantage de celle retrouvée dans le Pacifique que de celle de l'Atlantique.

Communauté animale du champ Kairei

La communauté d'invertébrés du **champ Kairei** est caractérisée par une transition abrupte entre les complexes centraux où les fumeurs noirs sont dominés par de denses essaims de crevettes (*Rimicaris kareii*) colonisant des fluides à 10°C-20°C et une zone périphérique froide (1°C-2°C) dominée par des anémones (*Marianactis* sp.). Plusieurs individus solitaires de crevettes sont observés hors des zones d'émissions. Dans les zones intermédiaires, à la base des essaims de crevettes, des assemblages de plusieurs centaines de moules (*Bathymodiolus* aff. *brevior*) et de gastéropodes (velus *Alviniconcha* n. sp. et «à pied à écailles») se distinguent. Des crabes brachyours (*Austinograea rodriguezensis*), des vers plats de la classe des turbellariés, des vers némertes et une seconde espèce de crevette (*Chorocaris* n. sp) sont parfois abondants dans la zone de transition entre les anémones et les essaims de crevettes. D'autres gastéropodes (patelles et provannidés), des vers polychètes polynoïdés (*Branchinotogluma* n. sp.) et archinomidés (*Archinome* sp.) et des buissons de crustacés cirripèdes du genre *Neolepas*, ainsi que des accumulations de mues de crevettes ont aussi été observées fréquemment dans cette zone de transition. Des coquilles de vésicomidés ont été recueillies à 1 km du champ Kairei mais aucun individu vivant n'a été récolté (Hashimoto et al, 2001).

Communauté animale du champ hydrothermal Edmond

La faune du **champ Edmond** est un sous-ensemble de celle trouvée sur le champ hydrothermal Kairei. Tout comme sur Kairei, la biomasse d'Edmond est dominée par de denses essaims de crevettes et les zones périphériques sont colonisées par les anémones. Edmond se distingue de Kairei par la rareté, voire même l'absence, de certaines espèces. Parmi les invertébrés absents à Edmond, on note les crustacés cirripèdes, les gastéropodes "à pied à écailles" (*Vetigastropoda*), les polychètes archinomidés, les vers némertes et les vers turbellariés. Ces différences faunistiques sont probablement liées à la qualité et à la disponibilité des microhabitats plutôt qu'à des différences géographiques ou bathymétriques (Van Dover et al, 2001). Les symbioses entre bactéries et invertébrés sont, comme dans tous les sites hydrothermaux connus, responsables de l'importante biomasse de ces milieux (Van Dover, 2000).

Communauté animale du champ hydrothermal Dodo

Seuls quelques organismes ont été observés et échantillonnés sur le **champ Dodo** (Nakamura et al, 2012). Les crabes bythograeidés *Austinograea rodriguezensis* sont répartis sur de grandes étendues de zones brunâtres, avec des abondances plus importantes à proximité des édifices actifs. La seconde espèce dominante est la crevette *Rimicaris kairei*, inégalement répartie sur la surface des cheminées de fumeurs noirs et sur les laves, à proximité des zones actives, mais seulement 10-20 individus ont été observés. Des anémones de mer (*Marianactis sp.*) et quelques petits gastéropodes (patelles *Lepetodrilidae* et escargots *Provannidae*) ont été échantillonnés. Les anémones sont largement distribuées dans toute la zone brunâtre. La taille des individus diminue en s'éloignant des zones actives. Aucun gastéropode *Alviniconcha* ou Vetigastropode et aucune modiole n'ont encore été observés sur le champ Dodo. L'appauvrissement en faune du champ **Dodo** pose question, de même que la composition de sa faune qui se distingue nettement de celle des autres champs de la CIR. Bien que les causes exactes soient encore incertaines, il est à noter que ce site se caractérise par des cheminées de petite taille, situées directement sur des laves en feuilletés, sans accumulation de sulfures ou de sédiments. Ces observations suggèrent clairement que l'activité hydrothermale est assez récente ce qui expliquerait la taille réduite de cette communauté (Nakamura et al, 2012).

Communauté animale du champ hydrothermal Solitaire

Contrairement à celles du champ hydrothermal Dodo, la biomasse observée et la richesse taxonomique des communautés de faune du **champ Solitaire** sont importantes (Nakamura et al, 2012). Cependant une seule plongée a été effectuée sur ce champ, ce qui est clairement insuffisant pour décrire avec précision les communautés de cette zone. Des populations denses de crevettes *Rimicaris kairei* et de *Mirocaris indica* ont été observées sur les structures actives. Une zonation a été observée à proximité de ces structures avec les gastéropodes *Vetigastropoda* et *Alviniconcha* et des polychètes alvinellidés distribués à proximité des zones d'émissions diffuses (50 à 100°C), des modioles *Bathymodiulus* avec de nombreuses patelles *Lepetodrilidae* à moyenne distance des cheminées et enfin des gastéropodes *Phymorhynchus* et au moins deux espèces de cirripèdes (*Neolepas sp.* et *Eochionellasmus sp.*) à plus grande distance des zones hydrothermales actives. *A. rodriguezensis* et une nouvelle espèce de crevettes *Chorocaris* étaient présentes près des gastéropodes et des assemblages de modioles alors que seulement quelques individus de *R. kairei* étaient observés dans cette région. Des poissons macrouridés, des anémones *Marianactis*, des galathées *Munidopsis* et des holothuries ont été observés en dehors des zones colonisées par la faune hydrothermale. La répartition des Vetigastropodes et des *Alviniconcha* du champ Solitaire est différente de celle observée sur le champ Kairei. Sur le champ Solitaire, les deux gastéropodes sont distribués près des fluides diffus à haute température alors que sur Kairei ils sont plutôt liés aux émissions de basse température. Des différences dans la chimie des fluides entre les deux champs pourraient expliquer cette répartition différente entre les champs puisque ces gastéropodes abritent des bactéries symbiotiques qui nécessitent des conditions environnementales spécifiques. Une autre découverte remarquable au domaine Solitaire est la présence des polychètes *Alvinellidae*. Il s'agit du premier rapport de cette famille de polychètes dans l'océan Indien et cette répartition suggère un lien entre la faune des océans Pacifique et Indien. Par ailleurs, un nouveau morphotype du gastéropode « à pieds à écailles » a été trouvé sur le champ Solitaire. Ce gastéropode a des caractéristiques morphologiques et anatomiques similaires à celui du Kairei et appartiendrait à la même espèce selon les analyses génétiques effectuées. Toutefois, le nouveau morphotype n'a pas de couverture de fer-sulfure sur les sclérites, ce qui avait été considéré comme un élément original des gastéropodes « à pieds à écailles ».

Similarité des communautés de la CIR avec les autres champs hydrothermaux

La présence de crevettes et d'anémones sur ces sites s'apparente aux sites TAG, Broken Spur et Snake Pit de l'Atlantique (Van Dover 1995; Gebruk et al, 1997), *Rimicaris* n'ayant été précédemment rapporté que dans l'océan Atlantique. A l'inverse, les polychètes dorvilleidés *Ophryotrocha*, les gastéropodes provannidés *Alviniconcha*, les crabes bythograeidés *Austinograea* et les cirripèdes *Neolepas* sont plutôt connus de sites de l'océan Pacifique (Tunnicliffe et al, 1998; Hessler et Lonsdale, 1991; Desbruyères et al, 1994; Southward et al, 1997; Hashimoto et al, 1999). Enfin, les autres taxons observés (palourdes, actinies, polynoidés *Branchipolynoe*, patelles *Lepetodrilus*, gastéropodes *Phymorhynchus*, modioles *Bathymodiolus*, crevettes *Chorocaris* et galathées *Munidopsis*) sont présents tant dans les sites hydrothermaux de l'Atlantique que du Pacifique (Tunnicliffe et al, 1998; Gebruk et al, 2000). La présence d'Alvinellidés sur le champ Solitaire confirme les connections entre la faune hydrothermale du Pacifique et celle de la dorsale indienne. Cette distribution montre que la faune de la dorsale indienne semble être un mélange entre celle du Pacifique et celle de l'Atlantique (Hashimoto et al, 2001).

Fonctionnement/Réseau trophique

L'espèce *Rimicaris aff. exoculata* des sites de la dorsale indienne possède des symbioses bactériennes au sein de ses chambres branchiales et l'analyse isotopique de ses tissus montre des données similaires à celles obtenues sur la dorsale médio-atlantique, ce qui conforte l'hypothèse d'un régime trophique similaire de consommateur primaire (Polz et al, 1998). Les modioles et les gastéropodes velus des champs Kairei et Edmond abritent des bactéries endosymbiotiques chimiotrophes dans leurs branchies. Les compositions isotopiques du carbone des branchies des moules du champ Kairei ressemblent aux valeurs observées chez des modioles d'autres sites contenant des endosymbiotes, cependant les compositions isotopiques en azote des modioles de Kairei sont plus négatives que celles des modioles des sites de la fosse des Mariannes ou de la dorsale Est-Pacifique, ce qui suggère que différentes sources d'azote sont exploitées ou qu'une source donnée peut avoir une signature spécifique selon le site. Les isotopes de carbone des branchies des gastéropodes velus (*Alviniconcha n. sp.*) du site Kairei présentent une fourchette de valeurs plus étroite que celle des Mariannes (*Alviniconcha hessleri*), suggérant que le métabolisme du carbone des endosymbiotes dans les deux espèces hôtes pourrait être différent. En particulier, les valeurs en δC^{13} des gastéropodes de Kairei sont compatibles avec le recours à la méthanotrophie.

Tout comme sur les sources de la dorsale médio-atlantique, les crevettes (*Rimicaris aff. exoculata*) s'agrègent au-dessus des surfaces de cheminées de sulfures dans le fluide hydrothermal chaud, sans doute pour maintenir leurs épibiotes à des concentrations de ressources minérales (CO_2 , O_2 , H_2S) suffisantes pour maintenir la chimioautotrophie. Les anémones (*Marianactis cf. bythios*) semblent être capables d'immobiliser et d'ingérer les crevettes qui ont été perturbées par les manipulations d'un submersible. Les crabes *Bythograeidae* (*Austinograea n. sp.*) sont prédateurs des crevettes et un rayon d'évitement semble se dessiner autour de ces derniers. Les polychètes Archinomidae (*Archinome cf. rosacea*) semblent être présents dans plusieurs types de microhabitats. Ils sont abondants parmi les accumulations de mues de *Rimicaris kareii*, suggérant un rôle nutritionnel des dépouilles de crevettes dans le régime de ce polychète. De grands polychètes polynoidés blancs (*Branchinotogluma n. sp.*) parcourent les surfaces de sulfure dans la zone de transition entre les anémones et les crevettes. De rares amoncellements de centaines d'individus de némerthes rouges sont visibles. Des gastéropodes du genre *Phymorhynchus n. sp.* sont présents parfois en groupe de plusieurs individus dans la zone de transition et la zone périphérique. Les cirripèdes pédonculés (*Neolepas n. sp.*) sont présents en petits groupes de dizaines d'individus sur des proéminences locales situées entre les anémones et les crevettes. Ils se nourriraient de

bactéries en suspension dans l'eau (Southward et Newman 1998) ou bien grâce aux bactéries épibiontes situées sur leurs appendices buccaux.

Les crevettes adultes et les anémones (*Marianactis cf. bythios*) sont les espèces dominantes de la biomasse du champ hydrothermal Kairei. Les observations visuelles de capture de crevettes et d'ingestion par les anémones ainsi que le contenu de leur intestin et les mesures isotopiques suggèrent que les crevettes sont susceptibles d'être un élément important de l'alimentation des anémones. Les crevettes adultes, quant à elles, tirent l'essentiel de leur alimentation de leurs épibiontes, ces dernières étant les producteurs primaires les plus importants pour le maintien de la production primaire dans le réseau du champ Kairei.

La composition en isotopes stables des tissus des invertébrés de l'océan Indien ($\delta^{13}\text{C}$ entre -32 et -11‰; $\delta^{15}\text{N}$ entre -8 et 14‰; Figure 4-33) se situe dans la gamme des valeurs obtenues chez les invertébrés d'autres écosystèmes hydrothermaux profonds (par exemple Van Dover and Fry, 1989; Fisher et al, 1994; Colaço et al, 2002). Les valeurs isotopiques en carbone et azote séparent quatre groupements distincts dans le réseau trophique du champ Kairei. Seules les modioles et leurs vers commensaux (**groupe I**) sont significativement différentes de toutes les autres espèces, en terme à la fois de carbone et d'azote. Les valeurs isotopiques obtenues pour les vers commensaux sont compatibles mais ne prouvent pas une relation de consommateurs des modioles (Fisher et al, 1994). Comme ils sont complètement indépendants du reste du réseau, la disparition de ces deux groupes aurait probablement peu d'effet sur les interactions trophiques de ce milieu. Le **groupe II** est constitué de deux taxons de gastéropodes pour lesquels les valeurs en carbone se distinguent de la quasi-totalité de celle des autres espèces. Les compositions isotopiques de *Desbruyeresia n. sp.* suggèrent la présence de bactéries endosymbiotiques, ou à tout le moins d'un régime inhabituel. De même, le style de vie sédentaire au sein de la zone d'émissions diffuses des gastéropodes « à pieds à écailles » et les détails de leur système digestif réduit suggèrent que ces taxons pourraient abriter des endosymbiotes (Van Dover et al, 2001). Le **groupe III** est formé de onze taxons différents et regroupe une variété de modes trophiques avec la présence d'espèces contenant des endosymbiotes thiotrophes comme *Alviniconcha n. sp.* (Van Dover et al, 2001), des espèces avec des épibiontes thiotrophes comme *Rimicaris karei*, des espèces brouteuses ou se nourrissant de matériel en suspension (*Lepetodrilus n. sp.*), des espèces suspensivores ou abritant des bactéries épibiotiques (*Neolepas n. sp.*), ainsi que des espèces carnivores (*Marianactis aff. bythios*) et omnivores (*Phymorhynchus n. sp.*, *Archinome aff. rosacea*, *Austinograea rodriguezensis* et némerthes). Les crabes *Austinograea rodriguezensis* pourraient aussi être carnivores puisqu'ils ont été observés consommant des crevettes. Les espèces du groupe III montrent une gamme relativement large de signatures isotopiques en carbone, avec de nombreuses espèces semblables les unes aux autres. Elles couvrent également une grande gamme de composition isotopique en azote. L'incapacité de distinguer les stratégies trophiques entre les producteurs primaires (taxons vivant avec des endosymbiotes) et les consommateurs secondaires est probablement due à la grande variation au niveau des compositions isotopiques de l'azote. Le **groupe IV** se compose d'une seule espèce, les polychètes polynoidés blancs (*Branchinotogluma n. sp.*) qui se distinguent par leur composition isotopique en azote, statistiquement différente de toutes les espèces sauf les némerthes. Ces polychètes semblent être au sommet de la chaîne alimentaire des espèces analysées. Il semble probable que le régime de ces polychètes (et peut-être des némerthes) soit plus spécialisé ou limité à des proies de niveaux trophiques supérieurs, tout comme les crabes brachyours qui se nourrissent probablement au sein de multiples niveaux trophiques.

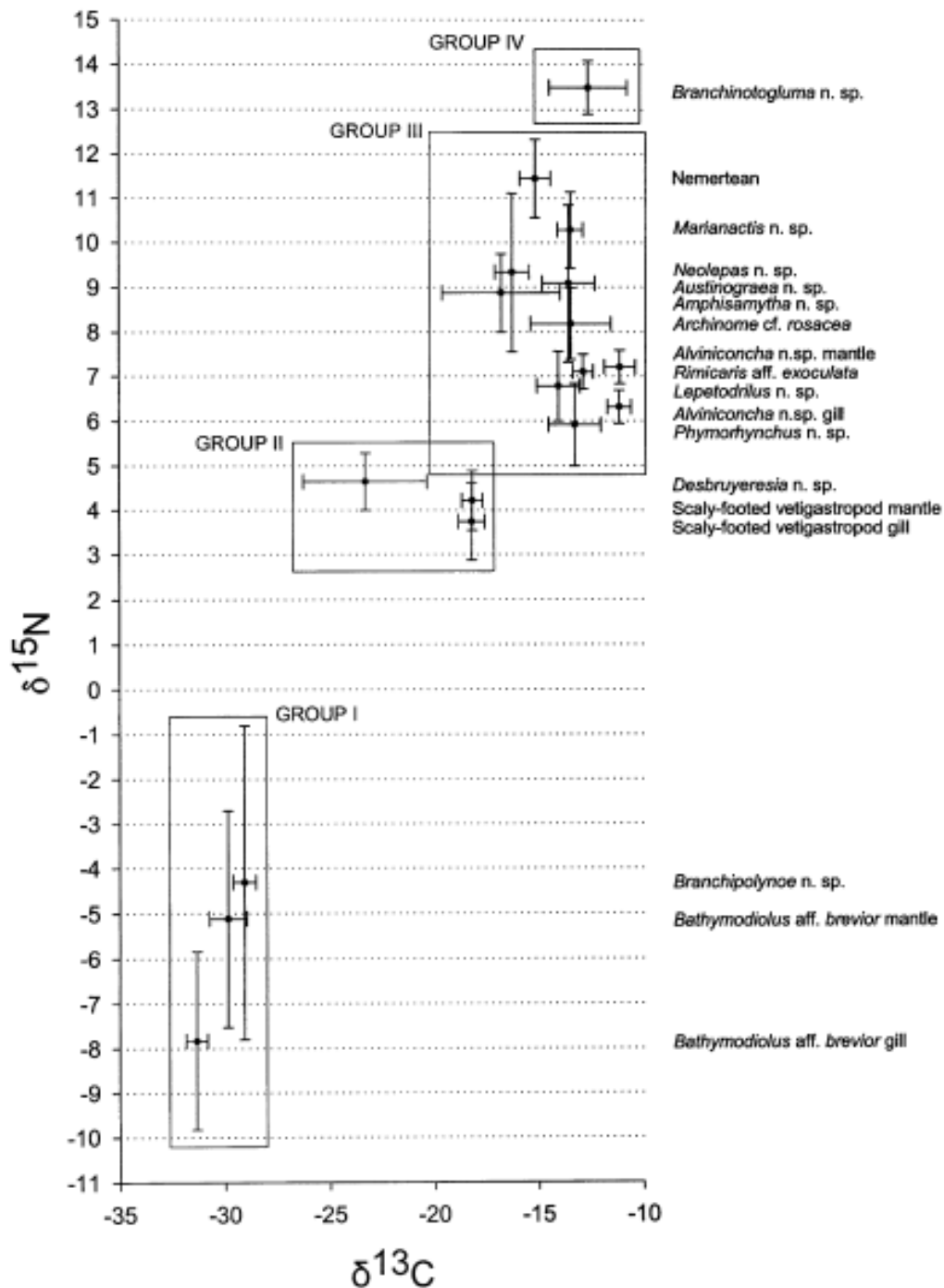


Figure 4-34 Composition isotopique en carbone et azote pour les invertébrés des cheminées hydrothermales du champ Kairei sur la dorsale Indienne Centrale (Van Dover, 2002).

Les encadrés définissant les groupes I à IV sont utilisés pour accentuer les groupes d'espèces semblables isotopiquement. Les données sur *Rimicaris* aff. *exoculata* sont pour des individus dont la carapace fait plus de 13 mm de longueur.

Distribution spatiale et facteurs structurants

Au total, environ **20 espèces différentes ont été récoltées** et six autres observées sur les sites de la dorsale indienne, parmi les 600 espèces hydrothermales recensées dans le monde (Hashimoto et al, 2001; Ingole and Koslow 2005). Ceci illustre notre **manque de connaissance sur la faune de ces champs**.

Distribution à l'échelle d'un site

Trois principaux types d'habitats ont été visualisés sur le champ hydrothermal Kairei : la zone centrale, la zone de transition et la zone périphérique (Van Dover, 2002). La zone centrale est caractérisée par la présence de fumeurs noirs et de zones de flux diffus ($> 10^{\circ}\text{C}$). Elle est colonisée par des agrégats denses de crevettes (*Rimicaris aff. exoculata*) parmi lesquelles se trouvent aussi des crabes (*Austinograea n. sp.*). La limite inférieure des essaims de crevettes est clairement définie par une zone de transition de 1-2 m de large où la température est inférieure à 10°C . Cette zone de transition est colonisée par de denses assemblages de modioles (*Bathymodiolus aff. brevior*) et de plusieurs espèces de gastéropodes : *Alviniconcha n. sp.*, gastéropodes « scaly-foot » et provannidés (*Desbruyeresia n. sp.*). La diversité de la macrofaune y semble plus importante puisque plusieurs autres espèces sont visibles : gastéropodes turridés, patelles (Lepetodrilidés), polychètes polynoïdés (*Branchipolynoe n. sp.*, *Branchinotogluma n. sp.*), archinomidés (*Archinome cf. rosacea*) et ampharetidés (*Amphisamytha n. sp.*), des cirripèdes (*Neolepas n. sp.*) et des németes. Enfin, une seconde limite nette marque le début de la zone périphérique où des populations denses d'anémones (*Marianactis cf. bythios*) colonisent des dépôts de sulfures inactifs. Elles sont accompagnées d'autres espèces comme les gastéropodes turridés, les polychètes archinomidés, et les cirripèdes. Alors que les espèces semblent inféodées à une ou deux zones particulières, les crabes *Austinograea n. sp.* sont quant à eux visibles sur les trois zones. Cette zone périphérique peut s'étendre à plusieurs dizaines de mètres autour du complexe central de fumeurs (Van Dover et al, 2001).

Quoique la distribution des différentes espèces hydrothermales de ces sites semble être fortement liée aux facteurs environnementaux (zonation en fonction de l'activité), **aucune étude systématique n'a encore été réalisée sur ces champs.**

Distribution à l'échelle globale

Le contexte géologique et les observations sur l'écologie des deux champs de la dorsale indienne montrent d'importantes similitudes et de forts liens évolutifs avec les autres sites hydrothermaux des dorsales médio-océaniques et particulièrement avec celle des sites hydrothermaux du Pacifique (Hashimoto et al, 2001; Van Dover et al, 2001). Cependant, ces sites constitueraient une cinquième province biogéographique puisque la composition spécifique est différente de celle retrouvée dans les autres provinces. Le tiers des 36 taxons d'invertébrés identifiés sur Kairei appartient à des genres qui n'étaient connus que du Pacifique, et autant de taxons pourraient représenter de nouveaux genres. Une seule espèce, la crevette dominante (*Rimicaris aff. exoculata*), appartient à un genre qui est connu exclusivement des sources hydrothermales de l'Atlantique. Onze genres sont connus à la fois des sources du Pacifique et de l'Atlantique et au moins une espèce, le gastéropode « à pied à écailles » (*Vetigastropoda*) pourrait représenter une nouvelle famille. L'absence à Kairei de certains groupes taxonomiques (vers polychètes alvinellidés, vers siboglinidés) communs aux événements du Pacifique est à noter. À l'exception des copépodes, peu de petits crustacés ont été trouvés dans les échantillons de Kairei. L'absence d'amphipodes est particulièrement surprenante, parce qu'ils sont souvent abondants, tant sur les sites du Pacifique que sur ceux de l'Atlantique (Van Dover and Trask, 2000). Plusieurs comparaisons moléculaires soutiennent des affinités entre les espèces de l'océan Indien et des taxons de l'ouest du Pacifique. L'utilisation de marqueurs génétiques pour estimer les flux de gènes et évaluer les relations taxonomiques entre ces régions est indispensable.

Comme les champs Edmond et Kairei sont rapprochés géographiquement et montrent une similitude faunistique, il était attendu que les espèces partagées appartiennent à des populations étroitement liées. Dans tous les cas examinés, les mesures de divergence de séquences d'ADN montrent des échanges génétiques entre les deux zones, malgré la présence

de barrières topographiques potentielles le long de la dorsale indienne (présence de failles transformantes, discontinuités et monts sous-marins). Les individus de *Rimicaris* à Kairei et Edmond semblent être congénères avec *R. exoculata*, ce qui voudrait dire que cette espèce aurait une portée immense, de plus de 17 000 km via le système de dorsales médio-océaniques, et ceci impliquerait une grande capacité de dispersion. Des études moléculaires suggèrent que *Rimicaris* est un genre jeune (0,5 million d'années (Ma), Shank et al, 1999). Alors qu'aucune espèce de *Mirocaris* n'a été observée sur les sites de l'océan Indien, le genre *Chorocaris* a été trouvé, et il s'apparente aux espèces du Pacifique occidental. Les crevettes hydrothermales ont donc réussi à coloniser les édifices actifs de l'océan Indien par différentes voies de colonisation et probablement à différentes échelles évolutives. Si les modioles de l'océan Indien sont les mêmes espèces que celles des bassins arrière-arc de l'ouest Pacifique, cette continuité génétique doit s'effectuer sur une courte échelle de temps ce qui implique la présence d'une coquille larvaire planctotrophique et un potentiel de dispersion considérable. La présence d'espèces communes entre les sources de l'Atlantique et du Pacifique ont conduit à l'hypothèse que l'océan Indien servirait de couloir de dispersion contemporain entre ces bassins océaniques.

Les crustacés décapodes sont dominants dans la plupart des sources hydrothermales découvertes à ce jour. Contrairement à l'hypothèse que ces espèces seraient des vestiges de faune relique, de plus en plus de résultats soutiennent l'idée que les décapodes hydrothermaux auraient eu une diversification récente. L'étude de Yang et al, (2013) a porté sur sept espèces de décapodes, représentatives de quatre champs hydrothermaux du Pacifique occidental et de l'océan Indien. Une analyse phylogénomique utilisant l'ADN mitochondrial a produit une topologie phylogénétique cohérente de ces espèces endémiques des écosystèmes hydrothermaux. De plus, l'analyse des datations moléculaires, calibrées à l'aide de plusieurs fossiles, suggère que les crabes bythograeidés et les crevettes alvinocaridés auraient une origine à la fin du Cénozoïque, début du Mésozoïque. Bien que l'échantillonnage ait été limité, les données obtenues soutiennent l'hypothèse d'extinction/repopulation qui implique une diversification récente pour la plupart des espèces hydrothermales. Ces dernières auraient subi une extinction massive engendrée par des événements anoxiques/dysoxiques en eaux profondes au cours de la fin du Crétacé et du début du Tertiaire. Les décapodes des sources hydrothermales se seraient peut-être diversifiés à partir d'ancêtres originaires de régions peu profondes comme les émissions de fluides froids (Yang et al, 2013).

Pacifique Ouest (WP)

Localisation

Tableau 4-3 Champs hydrothermaux du Pacifique Ouest.

Ride	Champs	Profondeur (m)
Japon	Kagoshima Bay - Wakamiko Proto Caldera	82-110
Arc Izu Ogasawara (Bonin)	Myojin Knoll	1300-1400
	Sumisu Caldera	670-690
	Suiyo Seamount	1367
	Kaikata Seamount	460-910
	Mokuyo Seamount	1200-1300
Okinawa Trough	Minami-Ensei Knoll	640-720
	North Iheya Knoll	990-1070

Ride	Champs	Profondeur (m)
	Iheya Ridge	1400-1430
	Izena Cauldron	1310-1580
	Hatoma Knoll	1470-1520
	Northeastern Taiwan	20-180
	East Yaeyama Graben	1850
	Dai-yon Yonaguni Knoll	1320-1387
Bassin arrière-arc des Mariannes	Forecast	1450
	Anemone Heaven	3676
	Alice Spring Field	1450
Arc volcanique des Mariannes	Daikoku Seamount	378
	Kagusa 2 Seamount	387-393
	North West Eifuku Seamount	1573-1604
	East Diamante Seamount	179-457
	North West Rota Seamount	516-599
	Nikko Seamount	430-600
	Minami-Hiyoshi Seamount	80
Da-ni Kasuga Seamount	300-400	
Tabar-Feni Volcanic Fore-Arc	Edison Seamount	1450
Bassin arrière-arc Manus	Vienna Woods	2500
	Desmos Cauldron	1860-2000
	Pacmanus Complex	1700
Monts sous-marins intra-plaque	Loihi Seamount (Hawaï)	969
	Vailulu'u Seamount	600-1000
Bassin arrière-arc Nord Fidji	White Lady	2000
	Mussel Valley	2700
Basin arrière-arc Lau	Kilo Moana	2618
	Tow Cam	2703
	ABE	2148
	Tu'i Malila	1887
	Vaï Lili	1764-1707
	Hine Hina	1832-1887
Arc Kermadec-Tonga	Macauley Caldera	200-504
	Giggenbach Seamount	144-175
	Brothers Seamount	1197
	Rumble III Seamount	200
	Rumble V Seamount	367-755

Caractéristique des sites, méga- et macro-faune

Les premières zones hydrothermales actives du Pacifique Ouest ont été découvertes en 1984 dans les eaux japonaises (Kimura et al, 1989). Puis, de nouvelles zones hydrothermales ont été observées dans le bassin de Manus (Both et al, 1986) et sur tout le système d'arcs et de bassins du Pacifique Ouest. Ce système est complexe, relativement récent et actif depuis une période de temps beaucoup moins importante que ceux retrouvés sur les rides médio-océaniques – moins de 10 millions d'années (Hessler and Lonsdale, 1991). Du nord au sud, sont retrouvés (Figure 4-35) :

- la dépression d'Okinawa
- l'arc Izu-Ogasawara (Bonin)
- le bassin arrière-arc et l'arc des Mariannes
- l'arc volcanique Tabar-Feni
- le bassin arrière-arc de Manus
- le bassin arrière-arc Nord-Fidjien
- le bassin arrière-arc de Lau
- l'arc Kermadec-Tonga

Les toutes premières découvertes avaient mis en évidence des écosystèmes de faible température, sans présence d'espèces endémiques (Kojima, 2002). La multiplicité des campagnes et des recherches scientifiques dans ces zones (Both et al, 1986; Desbruyères et al, 1994; Hashimoto et al, 1995; Hessler and Lonsdale, 1991) ont permis de mettre en évidence une extraordinaire diversité d'habitats mêlant des volcans peu actifs à très actifs, des écosystèmes profonds et peu profonds et des écosystèmes chimiosynthétiques et coralliens (Massoth et al, 2007). Les zones les mieux étudiées sont le bassin de Manus et les bassins arrière-arc de Fidji et de Lau. Le bassin de Manus a notamment été le sujet d'études visant la comparaison de sites actifs et inactifs, les sites inactifs de Solwara 1 et South Su étant ceux visés par des projets d'exploitations minières (Erickson et al, 2009; Levin et al, 2009).

Les écosystèmes retrouvés sur l'ensemble du Pacifique Ouest sont biogéographiquement relativement isolés les uns des autres (Hessler and Lonsdale, 1991). Les études sur la composition faunistique de ces sites sont relativement nombreuses (Desbruyères et al, 1994 et 2006; Galkin, 1997; Hashimoto et al, 1995; Hessler and Lonsdale, 1991; Kojima, 2002). Un grand nombre d'espèces endémiques ont été décrites (Yamaguchi and Newman, 1997; Okutani and Ohta, 1993; Von Cosel et al, 1994; Miura, 1994; Miura and Desbruyères, 1995; Newman and Yamaguchi, 1995). Des ressemblances faunistiques ont été mises en évidence entre les faunes colonisant les sites depuis le nord - Okinawa, Izu-Ogasawara, Mariannes - vers le sud du Pacifique Ouest - bassins arrière-arc de Manus, Nord-Fidjien et Lau (Tunncliffe and Fowler, 1996; Van Dover et al, 2002).

En 2006, un total de 178 espèces avaient été décrites dans le Pacifique Ouest (Desbruyères et al, 2006) comprenant principalement des mollusques (72 espèces), des annélides (32 espèces) et des arthropodes (56 espèces). Les espèces dominantes sont les vestimentifères, les gastéropodes, les moules et les crabes (Kojima et al, 2002). Les vestimentifères représentent les espèces dominantes dans le nord-ouest Pacifique et le bassin de Manus. Le gastéropode du genre *Alviniconcha* domine les écosystèmes des bassins arrière-arc Fidji et Lau et est également retrouvé au niveau de l'arc des Mariannes et du bassin de Manus. Le gastéropode *Ifremeria* sp., morphologiquement très proche du gastéropode *Alviniconcha*, a uniquement été retrouvé au niveau des sites du bassin de Manus, du bassin de Lau et de Nord-Fidjien.

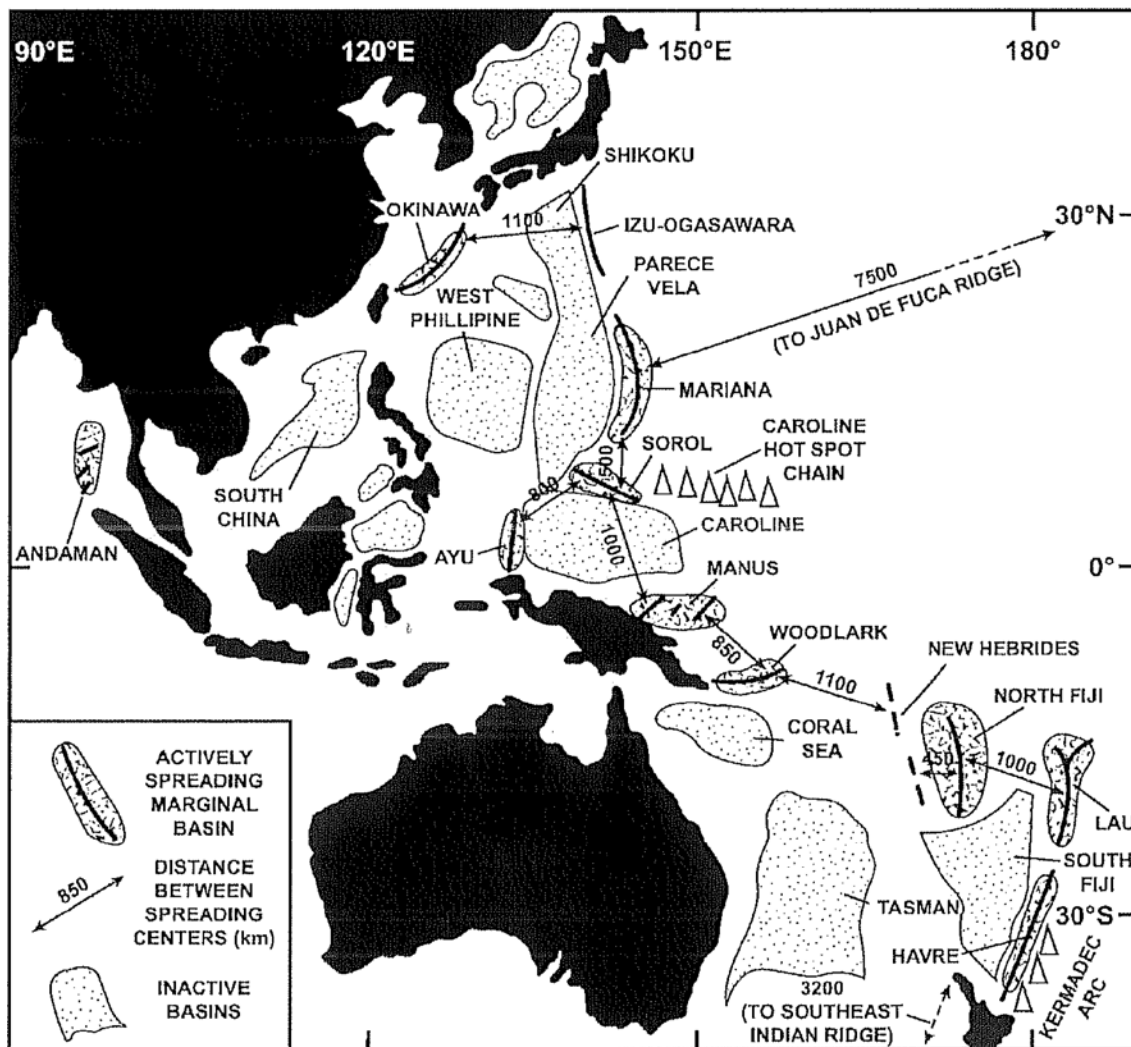


Figure 4-35 Localisation des arcs, bassins et dépressions dans l'Ouest Pacifique (adapté de Hessler et Lonsdale, 1991 dans Desbruyères et al, 2006).

L'arc Izu-Ogasawara (Bonin)

L'arc Izu-Ogasawara (Bonin) forme avec l'arc des Mariannes une marge convergente de 2500 km de long, allant du sud de Tokyo jusqu'à l'île de Guam (Figure 4-35). De nombreux volcans sous-marins y sont retrouvés. Six champs hydrothermaux colonisés par des communautés hydrothermales ont été recensés sur l'arc Izu-Ogasawara (Bonin) : Kaikata, Suiyo, Mokuyo, Nikko, Myojin, Sumisu. Les profondeurs et les températures des sites actifs observées sur ces champs sont très variables, allant de 670 m à 1400 m et de 12 à 278°C. Une faible diversité caractérise ces sites (Kojima, 2002). La faune retrouvée est principalement composée de crabes et de poissons plats, dominants sur le mont Kaikata (*Austinograea yunohana*), de moules *Bathymodiolus septemdierum*, dominantes sur le mont Suiyo, de crevettes *Alvinocaris* spp. et *Lebbeus* spp., en agrégats sur le mont Mokuyo, de vestimentifères, dominants sur le mont Nikko, et de gastéropodes.

La dépression d'Okinawa

La dépression d'Okinawa est localisée au sud-ouest du Japon. C'est dans cette dépression qu'a été découvert le premier champ hydrothermal des eaux japonaises (1984). Elle a, par la suite, été le lieu d'un nombre important de plongées (Hashimoto et al, 1995). Huit champs hydrothermaux structurent cette dépression : Minami-Ensei Knoll, North Iheya Knoll, Iheya Knoll, Izena Cauldron, Hatoma Knoll, Northeastern Taiwan, East Yaeyama Graben, Dai-yon

Yonoguni Knoll. Les profondeurs de ces champs varient de 600 m pour Minami Ensei à environ 1500 m pour Hatoma. Les moules, *Bathymodiolus platifrons* et *B. japonicus*, sont dominantes sur plusieurs des sites d'Okinawa. La cavité de leur manteau abrite des polychètes polynoidés et des polychètes nautiliniellidés (Miura and Hashimoto, 1991 et 1993). D'importants agrégats de polychètes, *Paralvinella hessleri*, sont retrouvés sur les cheminées actives et à proximité des sources diffuses, notamment en agrégat avec l'espèce endémique de galathée *Shinkai crosnieri* sur Izena Holl. Cette galathée est également retrouvée avec les moules *Bathymodiolus* (Desbruyères et al, 2006).

Le bassin arrière-arc des Mariannes

Le bassin arrière-arc des Mariannes est un bassin semi-clos, d'une profondeur maximum de 5000 m. Dans sa partie centrale, des sources hydrothermales de haute température ont été retrouvées dans quatre champs différents dont les profondeurs des sommets varient entre 3500 et 4000 m. Deux champs, Anemone Heaven et Alice Spring, ont été localisés dans le centre de la ride (Hessler and Lonsdale, 1991) et un champ hydrothermal, Forecast, a été localisé dans le sud du bassin arrière-arc des Mariannes (Fujikura et al, 1997). L'ensemble de ces champs est situé à de grandes profondeurs (1450 à 3660 m). D'autres champs hydrothermaux (TOTO caldeira, 13°N Ridge, Daini Kasuga Seamount) ont été localisés dans la partie nord ou la partie la plus au sud du bassin arrière-arc des Mariannes, mais leur faune est encore peu connue (Kojima, 2002).

Le gastéropode *Alviniconcha hessleri*, dont les branchies abritent des bactéries endosymbiotes, est l'espèce dominante en terme de biomasse dans les communautés observées des Mariannes (Stein et al, 1988; Endow and Ohta, 1989; Okutani and Ohta, 1988). Sur les champs hydrothermaux Alice Spring et Forecast, les compositions faunistiques sont très similaires, malgré l'importante différence de profondeur entre ces deux champs (3600 m et 1450 m respectivement) (Fujikura et al, 1997). Y sont retrouvés le gastéropode *Alviniconcha hessleri*, amassé en agrégats de plusieurs centaines d'individus, le crabe *Austinograea williamsi*, retrouvé en abondance sur les lits de gastéropodes à proximité des sorties de flux (Hessler and Martin, 1989), des amas de polychètes alvinellidés, *Paralvinella hessleri* sur les cheminées actives et à la périphérie des sources chaudes, des moules, *Bathymodiolus* aff. *brevior* ainsi que d'importants essaims de crevettes *Chorocaris vandoverae* (Martin and Hessler, 1990). Dans les zones de faibles flux sont également observés l'anémone *Marianactis bythios* et une galathée. Des annélides vestimentifères ont été retrouvés sur les sites encore peu connus TOTO et 13°N.

L'arc des Mariannes

L'arc des Mariannes est composé d'une série de volcans sous-marins peu profonds offrant une grande variété d'écosystèmes. Huit champs hydrothermaux sont identifiés : North West Eifuku, East Diamante, Daikoku, Kagusa 2, North West Rota, Nikko, Minami-Hiyoshi, Daini Kasuga. Les profondeurs de ces champs sont très variables allant de moins de 100 m pour Minami-Hiyoshi, à 1604 m pour North West Eifuku. Certains de ces sites, notamment NW Rota, présentent un mélange de communautés chimiosynthétiques (sur les parties actives) et photosynthétiques (sur les parties inactives) (Embley et al, 2006). Les crevettes *Opaepele loihi* et *Alvinocaris* sp. sont retrouvées sur les champs NW Rota-1, NW Eifuku, Nikko Seamount.

Bassin arrière-arc de Manus

Le bassin de Manus est situé dans la partie Est de la mer de Bismarck. Plusieurs champs hydrothermaux y ont été retrouvés : Vienna Woods, Pacmanus Complex et Demos Cauldron. Vienna Woods (2500 m) est un large champ (300 m de diamètre) composé de sites actifs et

inactifs. Les cheminées actives peuvent atteindre 10 à 15 m de haut et présentent des températures élevées (285°-300°C) et de faibles concentrations de H₂S (≤ 2 mmol/kg) (Auzende, 1996; Gamo et al, 1997). Le complexe Pacmanus (1700 m) présente des cheminées de tailles et de températures variables (jusqu'à 10-15 m de haut, températures $\geq 260^\circ\text{C}$) (Hashimoto et al, 1999). Les sites hydrothermaux retrouvés sur Desmos Cauldron (1860-2000 m) présentent des températures plus faibles (87°C-118°C) et un flux très acide (pH~2). La faune retrouvée au niveau des zones de fortes températures est principalement composée de gastéropodes *Alviniconcha* sp. et *Ifremeria nautili*, ainsi que du gastéropode *Eosipho* sp., des cirripèdes *Eochionelasmus ohtai* cf. *manusensis* et *Vulcanolepas* cf. *parensis*, des crevettes *Chorocaris vandoverae*, de la galathée *Munidopsis lauensis* et du crabe *Austinograea alayseae* (Erickson et al, 2009).

Des sites actifs et inactifs sont retrouvés sur le site Solwara 1 et South Su visés par des projets d'exploitation minière (Erickson et al, 2009; Levin et al, 2009). Les sites inactifs sont caractérisés par l'absence évidente de flux chaud et d'espèces endémiques. Les sites actifs localisés sur Solwara 1 sont retrouvés à des profondeurs de 934 m et les sites inactifs à 445 m. L'espèce dominante - le tanaidacé *Paraleptognathia* sp. - est la même sur les deux types de sites. Au niveau de South Su, les profondeurs sont plus importantes avec des sites actifs à 3740 m et des sites inactifs à 908 m (Levin et al, 2009). L'espèce dominante des sites actifs est le polychète *Prionispio* sp. et sur les sites inactifs un bivalve Nuculanoïde. Sur les sites actifs sont également retrouvés *Alviniconcha* sp. et *Ifremeria nautili* et sur les sites inactifs des éponges *Abyssocladia dominalba* et *Cladorhiza abyssicola*, des Cnidaires – hydraires, corail de type bamboo *Keratoisis* sp., avec une anémone associée *Hadalanthus* sp.- des Crustacés - l'amphipode *Ventiella* cf. *sulfuris*, le cirripède *Vulcanolepas* cf. *parensis* la galathée *Munidopsis* sp., la crevette *Chorocaris vandoverae*-, et des Echinodermes - l'ophiuride *Ophiacantha* sp. et l'holothuride *Chiridota hydrothermica* (Erickson et al, 2009). Les sites actifs de South Su présentent une plus forte biomasse, une dominance d'une ou plusieurs espèce(s) plus importante, une plus faible diversité et une homogénéité spatiale plus importante que les sites inactifs de South Su et les sites de Solwara 1 (Levin et al, 2009).

Bassins arrière-arc Nord-Fidjien et Lau

Le bassin Nord-Fidjien et le bassin de Lau sont localisés entre les plaques Pacifique et Indo-Australienne. Leurs parties nord sont limitées par la zone de fracture Vitiaz et le sud du bassin Nord-Fidjien par la zone de fracture Matthew Hunter (Figure 4-35). Une ride active sépare le bassin Nord-Fidjien en deux sections égales (Auzende et al, 1988). Deux champs hydrothermaux majeurs sont retrouvés dans le bassin Nord-Fidjien : White Lady et Mussel Valley. Six principaux champs hydrothermaux sont retrouvés dans le bassin de Lau avec du nord au sud : Kilo Moana (2650 m), Tow Cam (≥ 2700 m), ABE (2150 m), Tui Malila (1900 m), Mariner et Vaï Lili (Desbruyères et al, 1994).

La faune retrouvée sur les quatre principaux champs du bassin arrière arc Nord-Fidjien est caractéristique de celle retrouvée dans les bassins arrière-arc du Pacifique : les gastéropodes *Ifremeria nautili* et *Alviniconcha* spp., la moule *Bathymodiolus brevior*, le gastéropode *Eosipho desbruyeresi*, les crevettes *Chorocaris vandoverae*, *Nautilocaris saintlaurentae*, *Alvinocaris komaii*, *Lebbeus* sp. ainsi que les patelles *Lepetodrilus schrolli* et *Olgasolaris tollmanni*, le polynoïdé *Branchinotogluma segonzaci* et l'alvinellidé *Paralvinella fijensis*, le polynoïdé *Harmothoe* sp. et *Levensteiniella* sp., des anémones (surtout *Cyananthea hourdezi* et *Actinistolidae* sp.), des zoanthidés, des cirripèdes et deux espèces de poissons *Thermarces* sp. et *Thermobiotus mytiloigeiton*.

La faune dominant les sites hydrothermaux du bassin arrière-arc de Lau est constituée d'espèces mobiles : deux gastéropodes, *Alviniconcha* sp. et *Ifremeria nautili* et la moule *Bathymodiolus brevior* (Stein et al, 1988; Dubilier et al, 1998). Légèrement en retrait des

zones actives sont retrouvées deux espèces d'éponges *Abyssocladia dominalba* et *Asbestopluma* sp.) et sept espèces d'anthozoaires (Zelnio et al, 2009).

Arc Tonga-Kermadec

L'arc Tonga-Kermadec est un arc de 2500 km sur lequel sont retrouvés des volcans sous-marins actifs dont Rumble V, Rumble III, Brothers, Monowai et Volcano 1. Les sommets de ces volcans se trouvent à des profondeurs allant de 100 à 1200 m et présentent, notamment pour le site Volcano 1, un mélange de communautés endémiques aux sources hydrothermales et de communautés photosynthétiques (Wright et al, 2002; Rowden et al, 2003; Massoth et al, 2007; Comeault et al, 2010). D'importants amas de moules ont été retrouvés sur Monowai avec une importante macrofaune dont des poissons, des crustacés, des polychètes, des éponges et des anémones (Short and Metaxas, 2011). Des bivalves de type *Bathymodiolus* (*Gigantigas gladius*) ont été observés en patch sur Rumble V et Rumble III (Rowden et al, 2003). Sur le champ Volcano 1 ont été retrouvées des moules du genre *Bathymodiolus*, des patelles *Shinkailepas* sp. et *Lepetodrilus* sp., et le crabe *Xenograpsus ngatama*. Ce sont les localisations les moins profondes pour ces genres, endémiques des sources hydrothermales, que l'on trouve ici en compagnie d'algues vertes (Comeault et al, 2010).

Distribution spatiale et facteurs structurants

Les études relatives à l'étude de la structure des communautés du Pacifique Ouest sont encore trop peu nombreuses étant donné la complexité apparente dans cette zone. La distribution spatiale des communautés a été étudiée au niveau de la dépression d'Okinawa (Hashimoto et al, 1995) et du bassin de Lau, cible du programme américain Ridge 2000 (Desbruyères et al, 1994; Podowski et al, 2009 et 2010; Sen et al, 2013). Dans la dépression d'Okinawa, les communautés retrouvées semblent être organisées suivant deux grands types d'habitats différenciés par le type de substrat (dur ou meuble) et la température (forte ou faible) (Hashimoto et al, 1995). Au niveau des bassins arrière-arc Nord-Fidjien et Lau, les communautés retrouvées présentent deux grands types de microhabitats (Podowski et al, 2009 et 2010) :

- une première communauté organisée de façon concentrique autour de la zone d'émission de fluide avec le gastéropode *Alvinichoncha* sp. au centre des agrégations, là où les températures sont les plus élevées. Autour d'*Alvinichoncha* sp. avec des températures plus faibles mais très variables, sont retrouvés *Ifremeria nautilei* et *Bathymodiolus brevior* (Desbruyères et al, 1994; Sen et al, 2013). Les limites de distribution du gastéropode *Alvinichoncha* sp. semblent être dues pour la limite supérieure à la température (maximum de 45°C) et pour la limite inférieure à la teneur en sulfure, comme celles de *Bathymodiolus brevior* (20°C au maximum). Pour *Ifremeria nautilei*, les limites de distribution semblent être déterminées par des zones intermédiaires où flux et interactions biologiques seraient les principaux facteurs de limitations (Podowski et al, 2010).
- un second type de communauté est présent sur de petites portions d'édifices nouvellement formées et sur des structures actives de type « flange ». Ce microhabitat est très différent, notamment par l'absence de mollusques symbiotiques et la présence de polychètes alvinellidés (*Paralvinella unidentata* et *Paralvinella fidjensis*), du polynoidé *B. segonzaci*, de crevettes *C. vandoverae* ou *Nautilocaris sainlaurentae* et de crabes Bythograeidés. Cet habitat présente des zones de forte température, les espèces présentant donc une forte capacité d'adaptation à la chaleur, aux sulfures ainsi qu'aux conditions anoxiques (Podowski et al, 2009).

Dans le bassin de Manus, les sites actifs et inactifs de Solwara 1 et South Su ont été étudiés par Levin et coll. (2009). Cette étude a mis en évidence des structures de communautés différentes inter- et intra-sites. L'hétérogénéité intra-sites serait due aux facteurs biotiques et abiotiques, dont la proximité avec le flux et la présence d'espèces symbiotiques ou de tapis bactériens.

Dynamique et réseau trophique

Bassins de Lau, Nord-Fidjien, Manus

Comme on l'a vu, les bassins de Lau, Nord-Fidjien et Manus présentent une communauté de faune dominée par les gastéropodes *Ifremeria nautiliei* et *Alviniconcha sp.* ainsi que les Mytilidés *Bathymodiolus brevior*, aussi bien en termes d'abondance que de biomasse. La nature symbiotique d'*Alviniconcha sp.* et d'*I. nautiliei* a pu être démontrée par la présence de bactéries endosymbiotiques au sein de leurs branchies modifiées (Endow and Ohta, 1989; Borowski et al, 2002; Suzuki et al, 2005, 2006; Urakawa et al, 2005), ainsi que par la présence de l'enzyme RubisCo intervenant dans le cycle de fixation du carbone Calvin et Benson (Desbruyères et al, 1994). Typiquement, les branchies et le système circulatoire de ces deux gastéropodes sont hypertrophiés alors que l'estomac est réduit (Bouchet and Waren, 1991). Malgré tout le système digestif reste fonctionnel, et les contenus stomacaux d'*Alviniconcha sp.* peuvent être composés de mucus blanc d'apparence granuleuse, occasionnellement des particules minérales, des spicules d'éponges et des fragments de crustacés, suggérant ainsi que le broutage ou la prédation puisse jouer un rôle significatif dans l'alimentation de cette espèce. *B. brevior* présente une forte ressemblance avec les autres Mytilidés hydrothermales en termes de morphologie et de stratégie alimentaire, combinant probablement la symbiose bactérienne à une faible activité suspensivore. Elle présente des bactéries au sein de ses branchies hypertrophiées (Dubilier et al, 1998) et une activité thiotrophe a pu être mise en évidence pour cette espèce. Les isotopes stables du carbone de ces trois espèces au sein du bassin de Lau suggèrent une alimentation principalement soutenue par leur symbiotes ou par la consommation de bactéries libres de signatures isotopiques similaires alors que les isotopes stables de l'azote indiquent qu'*I. nautiliei* présente une plus forte hétérotrophie qu'*Alviniconcha sp.* (Henry et al, 2008).

Alviniconcha sp. présente une très forte capacité autotrophe avec des taux de consommation d' H_2S qui rivalisent avec ceux de *Riftia pachyptila* (Girguis and Childress, 2006; Henry et al, 2008). Dans les bassins de Manus et Nord-Fidjien *Alviniconcha sp.* présente 2 types d'associations, le type 1 abritant des Gamma-protéobactéries et le type 2 des Epsilon-protéobactéries (Suzuki et al, 2006). Plus récemment, une analyse phylogénétique d'individus de l'Est du bassin de Lau révèle la nature cryptique d'*Alviniconcha sp.* et une diversité symbiotique, avec trois phylotypes d'hôtes et trois phylotypes d'endosymbiotes (1 Epsilon-protéobactérie et 2 Gamma-protéobactéries) dont les associations sont spécifiques les uns aux autres (Beinart et al, 2012). L'étude des isotopes stables du carbone et de l'azote et l'analyse de la composition en acide gras d'*Alviniconcha sp.* suggère que les Gamma-protéobactéries et Epsilon-protéobactéries endosymbiotiques réalisent respectivement le cycle de Calvin et Benson et le cycle rTCA lors de la fixation de carbone (Suzuki et al, 2006). La situation est moins complexe pour *I. nautiliei* dont les bactéries thiotrophes consomment les sulfures pour des concentrations limitées à $100 \mu M$ (Henry et al, 2008). L'étude microscopique de *B. brevior* montre la présence d'un seul morphotype d'endosymbiote correspondant à des bactéries sulfo-oxydantes (Dubilier et al, 1998) et l'analyse des acides aminés confirme le métabolisme thiotrophe de ceux-ci (Pranal, 1995). Au sein du bassin de Lau, le vestimentifère *Lamellibrachia columna* présente également une activité RuBisCo (Desbruyères et al, 1994).

Les bactérivores identifiés sont principalement représentés par les crevettes Bresiliidés (*Alvinocaris* spp.) et Hippolytidés (*Lebbeus* sp.), des galathées (*Munidopsis* sp.) et un Lithodidé (*Paralomis* sp.) présent en relativement forte abondance. Les charognards sont représentés par des crabes (*Austinograea alayseae* et *Austinograea* aff. *williamsi*) et le gastéropode *Phymorhynchus*.

L'étude comparée du réseau trophique au sein de sédiments présentant des sorties de fluides hydrothermaux à ceux non actifs des zones Solwara 1 et South Su du Bassin de Manus témoigne de l'absence de différence significative entre Solwara 1 et South Su mais aussi de la présence de ressources basales de natures variables selon la présence ou non d'une activité hydrothermale. En effet, l'analyse des rapports isotopiques du carbone et de l'azote, au sein des parties actives des deux sites, révèle un réseau trophique principalement soutenu par des micro-organismes chimioautotrophes dont la fixation du carbone s'effectue par le cycle rTCA. En comparaison, la matière d'origine photosynthétique ainsi que les micro-organismes réalisant l'oxydation des sulfures par le cycle de Calvin et Benson alimentent principalement le réseau trophique des sources inactives (Levin et al, 2009). L'analyse des rapports isotopiques du carbone, de l'azote et du soufre de la faune associée aux édifices hydrothermaux actifs et inactifs de Solwara 1 du bassin de Manus montre un export local de matière organique à partir des sites actifs vers les sites inactifs (Erickson et al, 2009). Cet export constitue une ressource majoritaire aux régimes alimentaires des invertébrés dominants les communautés des sites inactifs : suspensivores (*Keratoisis* sp., *Vulcanolepas* cf. *parensis*) ainsi que carnivores (éponges cladorhizidés, hydraires). Ces derniers sont supposés s'alimenter de micro-zooplancton ou de matière organique particulaire, ce qui est cohérent avec une nutrition allochtone. Les taux de croissance et de reproduction de ces organismes non endémiques des sources hydrothermales sont présumés être plus importants lorsqu'ils bénéficient de cette ressource chimiosynthétique supplémentaire (Erickson et al, 2009).

Bassin arrière arc des Mariannes

Pour les sites du bassin arrière-arc des Mariannes, le schéma du réseau trophique est classique. Par exemple pour le champ Alice Spring, le gastéropode *Alviniconcha hessleri* abrite des endosymbiotes sulfo-oxydants utilisant le cycle de Calvin et Benson (Stein et al, 1988). Ces endosymbiotes sont des Gamma-protéobactéries colonisant en forte densité les filaments branchiaux. L'analyse des profils d'acides gras des tissus d'*A. hessleri* montre la présence d'une forte quantité d'acides gras provenant de l'endosymbiote, indiquant une digestion et une incorporation de l'endosymbiote par l'hôte (Suzuki et al, 2005). *Bathymodiolus* sp. présente des rapports isotopiques en accord avec une endosymbiose thiotrophe dont la fixation du carbone s'effectue par le cycle de Calvin et Benson (Van Dover and Fry, 1989). La faune associée est en outre composée de consommateurs primaires regroupant les polychètes *Alvinellidae*, patelles, balanes, anémones, et crevettes ainsi que des consommateurs secondaires représentés par les crabes qui présentent des valeurs isotopiques en carbone enrichies (Van Dover and Fry, 1989).

La situation est plus complexe sur les sites de l'arc des Mariannes : par exemple, trois habitats contrastés le long de la pente du volcan NW Eifuku du Nord de l'arc des Mariannes présentent des réseaux trophiques de structure variable (Limen and Juniper, 2006). Les habitats caractérisés par des flux intenses et instables (Top Tower, Champagne) présentent des réseaux trophiques moins complexes (moins de niveaux trophiques, moins de ressources basales) que l'habitat au sein duquel le flux est diffus et relativement stable et qui correspond à des assemblages de Mytilidés, *Bathymodiolus* sp. (Mussel Bed) (Figure 4-36).

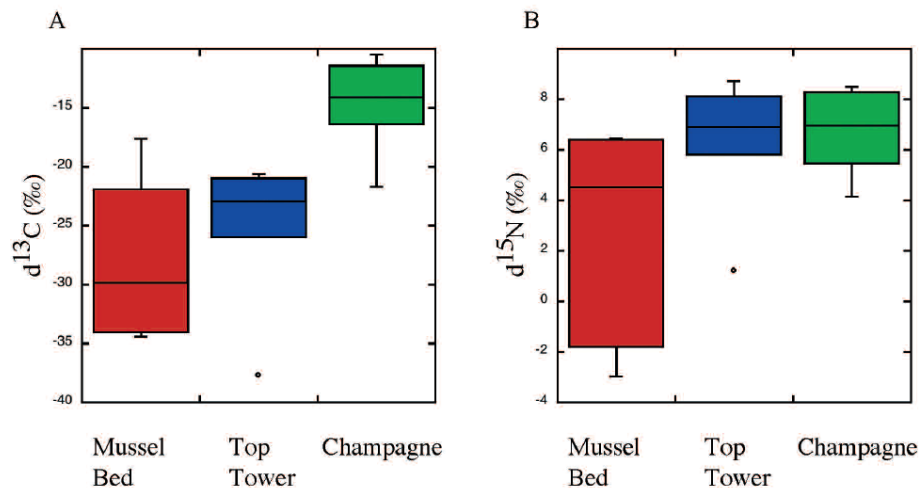


Figure 4-36 Rapports isotopiques de la faune des sites hydrothermaux du volcan NW Eifuku (Limen and Juniper, 2006).

La distance interquartile illustre la diversité des ressources en carbone (A) et en azote (B). Les valeurs médianes permettent de comparer les sources de carbone (A) et de l'azote (B).

Cas particulier, au Nord-Ouest de l'île Rota au sein de l'arc volcanique des Mariannes, **l'étude comparée** de la structure et du fonctionnement des communautés benthiques de faune associées à des **zones hydrothermales** ainsi que volcaniques (530 mètres) à celui d'une **zone inactive** (600 mètres) révèle de fortes dissimilarités (Limen et al, 2006). La zone inactive présente des taxons non endémiques des sources hydrothermales, principalement des hydraires et des amphipodes, et dispose d'une communauté de méiofaune abondante et diversifiée alors que les zones actives sont peuplées d'une communauté de faune peu diversifiée, représentée majoritairement par des décapodes mobiles et endémiques des sources hydrothermales, *Opaepele loihi*, *Alvinocaris sp.* et *Austinograea yunohana*. La présence de perturbations chroniques en raison de l'activité volcanique aboutit à l'exclusion des communautés sessiles basées sur l'apport photosynthétique de surface. **Le réseau trophique présent est peu complexe**, témoignant potentiellement d'un stade post-éruptif. De plus la présence d'une faune mobile est susceptible de refléter la forte instabilité de l'habitat. Cette étude montre également la nécessité d'une accumulation de matière organique pour la mise en place d'une communauté de méiofaune. Malgré le contexte instable de ces sources hydrothermales on observe l'existence de multiples ressources (d'après l'écart des rapports des isotopes stables du carbone), d'un consommateur secondaire et d'une répartition des ressources interspécifiques, notamment entre les deux crevettes Alvinocaridés (Limen et al, 2006).

Pacifique Est : EPR & NEP
Localisation

Tableau 4-4 Champs hydrothermaux du Pacifique Est8.

Ride	Champs	Profondeur (m)
Ride Explorer	Magic Mountain - Zoo Chimney Field	1797
	Magic Mountain - Merlin Mound	1778
	Magic Mountain Mystic Mound	1778
	Magic Mountain - Magestic Chimney Field	1785
Ride Juan de Fuca	Middle Valley	2400
	Endeavour segment Sasquatch Field	2200
	Endeavour segment Salty Dawg Field	2200
	Endeavour segment Main Endeavour	2200
	Endeavour segment High Rise Field	2200-2220
	Endeavour segment Mothra Vent Field	2200
	CoAxial Segment	2291
	Axial Volcano CASM vent field	1580
	Axial Volcano Lava Flow 98 nSRZ	1530-1544
	Axial Volcano Ashes vent field	1547
Ride Gorda	Cleft Segment (Southern Juan de Fuca)	2270
	Sea Cliff vent field, Northern Gorda Ridge	2700
Ride de Californie du Sud	Escanaba Trough	3250
	Palos Verdes White Point	0-10
Golfe de Californie	Guaymas Basin	2000
Ride Est Pacifique Rise (Nord)	21°N	2615
	13°N	2635
	11°N	2500
	9°N (Venture Hydrothermal Field)	2500
Ride Galápagos	Galápagos Spreading Center	2450-2490
Ride Est Pacifique (Sud)	7°S	2735-2752
	14°S	2623-2635
	17°24'S	2575-2590
	17°34'S	2590-2600
	18°S	2636-2680
	21°S	2800-2850
	23°S	2598
Ride Pacifique-Antarctique	31°S	2330
	Saguaro Field	2235
	Foundation	2220
	German Flats - 38°S	2216

Diversité de la faune

East Pacific Rise

Comme tous les écosystèmes hydrothermaux actifs, les communautés animales associées aux sites de la dorsale East Pacific Rise (EPR) sont caractérisées par une forte biomasse, un fort taux d'endémisme et une faible diversité spécifique (Tunnicliffe, 1991). Cependant, il est important de noter que l'inventaire actuel est loin d'être achevé et de nombreuses espèces sont encore découvertes chaque année (Desbruyères et al, 2006) ou sont en cours de description (Matabos et al, 2011). De plus, la présence d'espèces cryptiques est largement reconnue aujourd'hui parmi les espèces hydrothermales décrites le long de l'EPR (Guinot and Hurtado, 2003; Hurtado et al, 2004; Matabos, Thiébaud et al, 2008; Plouviez et al, 2009; Won et al, 2003). **De plus, alors que les communautés associées aux sites hydrothermaux actifs ont fait l'objet de nombreuses études le long de l'EPR, la faune associée aux structures hydrothermales inactives reste largement méconnue à ce jour.**

Les premières descriptions des communautés de l'EPR ont été publiées dans les années 1980 pour 13°N (Fustec et al, 1987) et la dorsale des Galápagos (Hessler et al, 1988; Johnson et al, 1988). Ces études ont été les premières à décrire la distribution de la macro- et méga- faune en relation avec l'environnement physico-chimique, décrivant ainsi l'importance des micro-gradients existant au niveau des sites. La description détaillée fournie dans ces études (i.e. réalisation de cartes) constitue une archive essentielle afin de documenter sur le long terme l'évolution de ces zones (Fustec et al, 1987; Hessler et al, 1988). L'EPR nord correspond donc à une zone géographique bien connue qui a fait l'objet de nombreuses campagnes océanographiques. En revanche, la composition des communautés macro- et mégabenthiques associées aux habitats hydrothermaux de la partie sud de l'EPR demeure mal connue. Les premières données recueillies en 1993 entre 17°S et 19°S suggèrent l'existence d'une mégafaune comparable en termes de composition faunistique à celle connue sur l'EPR nord mais révèlent une structure des communautés différente avec des bouquets de vers tubicoles de l'espèce *Riftia pachyptila* de taille restreinte (denses au nord), des moulières étendues et d'immenses champs de cirripèdes pédonculés et d'anémones (Geistdoerfer et al, 1995). A 7°S, les premières observations révèlent une macrofaune relativement comparable à la partie nord de la dorsale, au niveau générique (Halanych et al, 1999). La campagne BIOSPEEDO, réalisée en 2004, s'est focalisée sur l'exploration des sites hydrothermaux localisés entre 7°S et 21°S (Jollivet et al, 2004). Les études qui ont suivi l'expédition ont montré que la partie sud de la dorsale constituait une zone de transition biogéographique avec la présence d'espèces caractéristiques de l'EPR nord, et à partir de 17°S, d'espèces retrouvées sur la dorsale Pacifique-Antarctique et de nouvelles espèces non présentes plus au nord (Matabos et al, 2011). L'exploration de cette zone peu décrite a permis l'échantillonnage d'espèces nouvelles pour la science (Matabos et al, 2011; Stohr and Segonzac, 2005).

Les principaux groupes composant la faune hydrothermale de l'EPR sont les mollusques et les polychètes. L'EPR abrite **trois familles de bivalves**, les Mytilidae (*Bathymodiolus thermophilus*), les Vesicomidae (*Calyptogena magnifica*) et les Pectinidae (*Bathypecten vulcani*) (Desbruyères et al, 2006). Alors que peu de choses sont connues sur *B. vulcani*, les deux autres familles regroupent, à l'échelle mondiale, un grand nombre d'espèces qui sont clés pour ces écosystèmes particuliers. La famille des véscopymidés est inféodée au milieu profond mais pas restreinte aux habitats réduits. Son seul représentant le long de l'EPR est *Calyptogena magnifica* (Desbruyères et al, 2006), une espèce symbiotique thiotrophe qui peut mesurer jusqu'à 26 cm. De même, le seul représentant de la famille des Mytilidae le long de l'EPR est *Bathymodiolus thermophilus*, une moule dont la taille peut atteindre 18 cm abritant

également dans ses branchies des symbiontes sulfo-oxydants. Le genre *Bathymodiolus* est quant à lui inféodé aux habitats réduits (sources hydrothermales, suintements froids). *C. magnifica* et *B. thermophilus* sont des espèces ingénieuses dont l'agencement forme une structure en trois dimensions, créant un habitat pour les espèces de macrofaune, comme un grand nombre de gastéropodes et de polychètes. Le **groupe des polychètes est un des plus diversifiés**, avec 45 espèces recensées le long de l'EPR (Desbruyères et al, 2006; Matabos et al, 2011). Ils sont distribués dans une grande variété d'habitats, depuis les zones d'émissions de haute température sur les parois des cheminées jusqu'à la périphérie. L'EPR abrite à ce jour 18 familles (Desbruyères et al, 2006; Matabos et al, 2011) dont 8 sont représentées par une seule espèce. La famille des *Polynoidae* (vers à écailles), mesurant entre 1 et 60 mm, regroupe le plus grand nombre d'espèces et est largement représentés le long de l'EPR depuis les parois de cheminées jusqu'à la périphérie (Desbruyères et al, 2006). Les *Alvinellidae* incluent des espèces des genres *Alvinella* et *Paralvinella*. Sur l'EPR, le ver tubicole *A. pompejana* fait partie des métazoaires les plus thermotolérants au monde et peut supporter des températures allant jusqu'à 50°C (Ravaux et al, 2013). Il colonise la paroi des cheminées au niveau des émissions de fluide chaud où il forme des colonies (Desbruyères et al, 1998) dont la matrice, formée par l'enchevêtrement des tubes, crée un habitat caractérisé par des microgradients physico-chimiques qui peut être colonisé par d'autres espèces de macrofaune mobile (Le Bris et al, 2005). Enfin, les Siboglinidés, de par leur taille et leur densité, sont une famille importante de vers tubicoles le long de l'EPR. La famille est représentée par 3 espèces sur l'EPR : *Tevnia jerichonana*, *Oasisia alvinae* et *Riftia pachyptila*, qui se développent souvent sous forme de bouquets dans les zones de diffusion active avec des températures généralement inférieures à 30°C (Jollivet, 1996). *R. pachyptila* peut atteindre 1,50 m de longueur et constitue donc une espèce ingénieuse importante le long de la dorsale. Le **groupe des gastéropodes** est également un groupe diversifié avec à ce jour 46 espèces appartenant à 12 familles recensées le long de l'EPR (Desbruyères et al, 2006; Matabos et al, 2011). Les gastéropodes sont donc une composante majeure des communautés faunistiques associées aux sources hydrothermales (Tunnicliffe et al, 1998) et sont présents dans la totalité des habitats (Jollivet, 1996; Mills et al, 2007). De plus, ils présentent une certaine diversité fonctionnelle en termes de niveau trophique et de rôle dans l'écosystème (Jollivet, 1996; Mills et al, 2007; Tunnicliffe, 1991). Les deux plus importantes familles, les peltospiridés et les lépétodrilidés, regroupent à elles seules 25 des espèces recensées le long de l'EPR (Matabos et al, 2011). Les peltospiridés sont principalement associés aux colonies d'alvinellidés et aux zones d'émissions à haute température tandis que les lépétodrilidés sont inféodées aux communautés de siboglinidés et de bivalves, dans les zones de diffusion (Jollivet, 1996; Matabos, Le Bris et al, 2008; Mills et al, 2007). En revanche, on ne trouve pas dans les gastéropodes d'espèce ingénieuse à l'origine de la création d'habitats biogéniques le long de l'EPR comme pour les polychètes ou les bivalves. Les **échinodermes** sont peu représentés avec seulement 5 espèces recensées le long de l'EPR (Desbruyères et al, 2006; Matabos et al, 2011). Pour les **crustacés décapodes**, on compte à ce jour 11 espèces le long de l'EPR appartenant à 5 familles : *Alvinocarididae*, *Bythograeidae*, *Galatheidae*, *Hippolytidae* et *Nematocarcinidae* (Desbruyères et al, 2006). Enfin, pour les **chordés**, six espèces de poissons appartenant à 6 familles ont été reportées le long de l'EPR (Desbruyères et al, 2006). Ces espèces, très mobiles, ne sont pas inféodées à un type d'habitat particulier. La famille des zoarcidés est la plus représentée au niveau des sources hydrothermales, et leur distribution au niveau de l'EPR a été documentée (Geistdoerfer, 1985).

Nord-Est Pacifique

Les sites hydrothermaux le long de la dorsale Nord-Est Pacifique (NEP) ont été découverts au début des années 80 le long d'un système de 3 dorsales, comprenant du nord au sud : Explorer, Juan de Fuca et Gorda (Chase, 1985; Tunnicliffe and Juniper, 1983; Tunnicliffe et al, 1985). Bien que la majorité des espèces rencontrées dans le Nord-Est Pacifique aient été décrites de la dorsale Juan de Fuca, la plupart sont communes aux trois dorsales (Desbruyères et al, 2006). En effet, la dorsale Juan de Fuca est la plus étudiée de cette zone du Pacifique. Une description de la faune rencontrée le long d'Explorer est disponible dans l'article de Tunnicliffe et coll. de 1986. Les communautés faunistiques associées aux structures hydrothermales actives le long de la dorsale Juan de Fuca présentent de fort taux de production, une faible diversité spécifique, un réseau trophique peu développé et un fort taux d'endémisme (revu dans Tsurumi, 2003) avec des assemblages dominés par quelques espèces de siboglinidés, alvinellidés et gastéropodes (Juniper and Tunnicliffe, 1997; Tunnicliffe, 1988). Contrairement à l'EPR, les premières études concernant la faune associée aux sources hydrothermales des dorsales du Nord-Est Pacifique ne sont pas localisées sur quelques sites et s'étendent plutôt sur une grande surface géographique, ainsi que sur une grande variabilité de substrats (Juniper, Tunnicliffe and Southward et al, 1992; Tunnicliffe, 1988; Tunnicliffe et al, 1986; Tunnicliffe and Fontaine, 1987; Tunnicliffe and Juniper, 1983; Tunnicliffe et al, 1985). Bien que quelques groupes taxonomiques majeurs présents sur l'EPR soient absents du Nord-Est Pacifique (Desbruyères et al, 2006), le lien faunistique entre EPR et NEP est visible au niveau des genres ou des familles (Desbruyères et al, 2006; Tunnicliffe, 1988). La diversité est plus faible sur le système de dorsales du NEP que sur l'EPR, à la fois au niveau du nombre de taxons mais aussi du nombre d'espèces au sein d'un taxon. Ainsi la plupart des familles rencontrées sont monospécifiques (Desbruyères et al, 2006; Tunnicliffe, 1988). Cependant, bien que ce soit une zone très étudiée, de nouvelles espèces sont toujours décrites dans cette région de l'océan (Harasewych and Petit, 2011).

Comme sur l'EPR, les principaux groupes constituant les communautés hydrothermales de NEP sont les mollusques et les annélides. Seulement 2 espèces de **bivalves** de la famille des *Vesicomidae* ont été recensées : *Calyptogena extenta* sur la dorsale Gorda et *C. gigas* sur Juan de Fuca (Desbruyères et al, 2006). Ces deux espèces ne sont pas inféodées aux sources hydrothermales et ont également été observées au niveau des zones de fluides froids dans le canyon de Monterey et le bassin de Guaymas. Sur NEP, elles sont plutôt associées aux zones hydrothermales sédimentaires (Grehan and Juniper, 1996; Juniper, Tunnicliffe and Southward et al, 1992). On ne retrouve pas de grandes moulières similaires aux moulières de l'EPR le long de ce système de dorsale. Le groupe des **polychètes** est le plus diversifié avec 21 espèces appartenant à 12 familles, dont 7 monospécifiques (Desbruyères et al, 2006). Seulement 2 familles, monospécifiques, sont absentes de l'EPR : les *Syllidae* et les *Orbiniidae*, mais on connaît peu de choses sur la biologie et la distribution de ces 2 espèces. La famille des *Polynoidae* (vers à écailles) regroupe 3 espèces qui mesurent jusqu'à 52 m m. *Branchinotogluma* sp. et *Lepidonotopodium piscisae* sont les espèces les plus abondantes et sont associées aux zones de diffusion. La famille des *Siboglinidae* comporte 2 espèces : *Ridgeia piscisae*, inféodée aux sources hydrothermales, et *Lamellibrachia barhami* dont la distribution est plutôt associée aux zones hydrothermales sédimentaires et de fluides froids (Desbruyères et al, 2006). *R. piscisae* est une espèce dominante sur les 3 dorsales constituant la NEP. Cette espèce symbiotique qui abrite des bactéries chimio-autotrophes (Childress and Fisher, 1992) est distribuée sous forme de bouquets denses créant un habitat à trois dimensions pour les espèces mobiles telles que les polychètes et les gastéropodes. Sa plasticité morphologique lui a valu l'attribution de plusieurs noms d'espèces mais des études morphologiques et génétiques plus poussées ont finalement révélé que tous les morphotypes

ne constituaient qu'une seule et unique espèce (Southward et al, 1995). L'occurrence des différents morphotypes serait dépendante de la température et de la chimie du milieu (Sarrazin et al, 1997). Enfin les alvinellidés regroupent quatre espèces du genre *Paralvinella* : deux inféodées aux zones de haute température sur la paroi des cheminées (*P. dela* et *P. sulfincola*) et deux associées aux zones de diffusion de plus faible température (*P. pandorae* et *P. palmiformis*). Le groupe des **gastéropodes** comprend 16 espèces réparties dans 9 familles dont 4 monospécifiques (Desbruyères et al, 2006; Harasewych et Petit, 2011; Harasewych et Kantor, 2002; Johnson et al, 2006). Seulement 3 familles sont absentes de l'EPR. *Lepetodrilus fucensis* sur Juan de Fuca et *L. gordensis* le long de Gorda dominent les communautés dans les zones de diffusion et peuvent atteindre des densités de 10⁵ individus/m² (Sarrazin et al, 1997). Les deux espèces **d'arthropodes** recensées sur NEP (Desbruyères et al, 2006) sont présentes en forte densité au sein des communautés au niveau des zones de diffusion (Sarrazin et al, 1997). **Aucun échinoderme** n'a été recensé au niveau des sources actives de la zone. Enfin, une seule espèce de **chordé** est reportée au niveau des sources hydrothermales actives de NEP : le Zoarcidé *Pachycara gymninium* qui semble ne pas être inféodé au milieu hydrothermal mais également rencontré dans les milieux profonds de la région NEP (Desbruyères et al, 2006).

Distribution et facteurs structurants

East Pacific Rise

Alors que l'étendue spatiale de la distribution des espèces le long de l'EPR est le résultat des événements tectoniques liés à l'histoire de la dorsale (Tunnicliffe and Fowler, 1996; Tunnicliffe et al, 1998), la distribution des principales espèces de la mégafaune à l'échelle locale est principalement contrôlée par les gradients physico-chimiques des paramètres environnementaux (Hessler et al, 1988; Shank et al, 1998). Ainsi le long de la dorsale Pacifique orientale (EPR), quatre assemblages principaux de la mégafaune ont été décrits le long du gradient d'intensité du flux hydrothermal :

- (1) les colonies d'alvinellidés, associées aux zones les plus actives et au niveau des émissions de forte température sur les parois des cheminées;
- (2) les bouquets de siboglinidés (ou vestimentifères) dans des aires de diffusion récentes et vigoureuses;
- (3) des colonies de bivalves (i.e. *Calyptogena magnifica* et *Bathymodiolus thermophilus*) dans les zones de diffusion modérées et plus anciennes;
- (4) en périphérie, des assemblages de filtreurs (i.e. vers serpulidés) dans une eau de mer peu ou pas influencée par le fluide hydrothermal (Fustec et al, 1987; Hessler et al, 1988; Jollivet, 1996; Shank et al, 1998).

Cette zonation a rapidement été décrite et identifiée dans les premières années de découverte des sites de l'EPR, mais après plusieurs années d'exploration et d'études des sites, il semble que cette zonation «grossière» ne suffise pas à expliquer la distribution de la macrofaune mobile, comme celles des gastéropodes par exemple (Matabos et al, 2008; Mills et al, 2007).

Les facteurs contrôlant la distribution spatiale des espèces hydrothermales de l'EPR sont nombreux et agissent à des échelles spatiales (et temporelles) allant de milliers de kilomètres à l'échelle de la dorsale entière (échelles géologiques), jusqu'à l'échelle du centimètre (en quelques secondes/minutes). Cependant, leur rôle relatif dans la mise en place de la biodiversité est encore mal connu. A l'échelle de la dorsale, les événements tectoniques à l'origine des événements de vicariance (ou spéciation allopatrique) jouent un rôle primordial sur la biogéographie en contrôlant l'étendue de la distribution des espèces (Tunnicliffe and

Fowler, 1996). Le long de la dorsale de l'EPR, des événements historiques, comme la disparition de la microplaque de Bauer à 13°S ou la réorganisation de la dorsale des Mathématiciens vers 9°N, seraient à l'origine de deux événements de vicariance responsables des divergences génétiques mesurées de part et d'autre de l'équateur pour un grand nombre de taxons (Matabos, Thiébaud et al, 2008; Plouviez et al, 2009). De même, les espèces hydrothermales de la dorsale Nord-Est Pacifique (ex. Juan de Fuca, Explorer, Gorda) représentent des taxons vicariants à celles de l'EPR, suite à la subduction de la plaque Farallon sous la plaque américaine (Tunnicliffe, 1988). Egalement à l'échelle globale, le taux d'accrétion semble avoir un rôle sur la biodiversité hydrothermale avec une diversité spécifique plus élevée au niveau des dorsales rapides que sur les dorsales lentes (Van Dover, 2002; Van Dover, 2003).

A l'échelle régionale, le fonctionnement des systèmes hydrothermaux est directement lié à l'activité magmatique et tectonique qui contrôle la circulation du fluide hydrothermal (Haymon et al, 1991). Ainsi les zones volcaniques sont moins stables dans le temps et dans l'espace que les zones tectoniques (Fouquet et al, 1994). Cette variabilité géophysique va donc avoir un rôle important sur la création et la durée de vie des sites et donc sur leur taux de disparition. Ceci n'est pas sans conséquence pour la faune et va avoir un impact important sur le taux d'extinction/recolonisation des espèces hydrothermales (Jollivet et al, 1999). Alors que certains auteurs ont suggéré qu'une forte instabilité de l'habitat, en maintenant des communautés pionnières, seraient à l'origine d'une faible diversité (Juniper and Tunnicliffe, 1997), la distance réduite entre sites peut entraîner une augmentation soudaine du flux génique (Jollivet et al, 1999) qui aurait pour conséquence un taux de recolonisation des sites plus important et donc une plus forte diversité spécifique (Turnipseed et al, 2003; Van Dover and Doerries, 2005). A titre d'exemple, au niveau des moulières associées au sud de l'EPR, une variabilité spatio-temporelle du flux hydrothermal plus élevée dans les zones volcaniques instables a pour conséquence le mélange, au sein d'un même site, des différents stades de succession et donc une diversité plus grande (Matabos et al, 2011). Ainsi une zone volcanique plus instable va abriter plus de sites à des stades de développement variables sur de plus faibles distances qu'une zone tectonique où les sites, plus espacés, sont souvent au même stade de développement. Ces processus vont également avoir un impact sur la diversité génétique, puisque la position dans la succession écologique des espèces va déterminer l'abondance et donc la taille des populations des espèces qui vont pouvoir recoloniser des sites distants (Vrijenhoek, 1997).

Le contexte géodynamique, en contrôlant les variations dans l'intensité du fluide et le type de diffusion, a également un rôle important sur les conditions physico-chimiques subies par les organismes à plus petite échelle, et donc sur les interactions biotiques entre espèces (Mullineaux et al, 2003). Ce rôle imbriqué des facteurs régionaux et locaux démontre la nécessité d'un effort d'échantillonnage plus important (ex. répliqués) afin de déterminer le rôle relatif des facteurs agissant aux différentes échelles (ex. environnement géophysique, paramètres physico-chimiques, interactions biotiques) (Matabos et al, 2011).

A l'échelle d'un site, la succession écologique associée au développement d'une nouvelle communauté est largement influencée par les changements dans le temps des conditions géochimiques (Shank et al, 1998). D'autre part, la mise en place d'approches expérimentales ont permis de mettre en évidence le rôle des interactions biotiques entre organismes sur le développement, la structure et la composition des communautés (Micheli et al, 2002; Mullineaux et al, 2003). Ainsi, les variations des conditions environnementales le long du gradient influence également le développement des communautés en modifiant le type d'interactions biologiques entre espèces : les zones de flux vigoureux, où la productivité et la densité des organismes sont plus élevés, seront caractérisés par des phénomènes d'inhibitions

tandis que des mécanismes de facilitation entre espèces ont été observés dans les zones de diffusion plus faible (Mullineaux et al, 2003). Ces auteurs sont les premiers à souligner le rôle primordial des facteurs biotiques, puisqu'ils ont montré que les interactions biologiques peuvent modifier le développement de la communauté en l'absence de changement dans le temps des conditions biogéochimiques.

Enfin, à micro-échelle, au sein d'un même habitat, une forte variabilité spatio-temporelle des conditions environnementales en termes de température, pH et concentrations d'oxygène, de sulfures et de métaux a été mesurée au niveau des moulières (Johnson et al, 1994; Le Bris et al, 2006), des bouquets de *Riftia* (Le Bris et al, 2006; Le Bris et al, 2003), et des colonies d'alvinellidés (Le Bris et al, 2003; Le Bris et al, 2005). Cette forte variabilité spatio-temporelle se traduit par la présence d'une mosaïque d'habitats sur un même édifice. De plus, la présence d'un petit nombre d'espèces dominantes apparaît comme une caractéristique très générale des communautés hydrothermales, à la fois dans les bouquets de Siboglinidés (Tsurumi, 2003) et dans les moulières (Van Dover, 2002), expliquant, entre autres, les faibles niveaux de diversité observés dans ces communautés.

Nord Est Pacifique

A l'échelle globale de NEP, la stabilité, la disponibilité et le type d'habitat, qui sont fortement liés au taux d'accrétion en réponse à l'activité magmatique, affectent la diversité, la structure et la dynamique des communautés. Le taux d'accrétion, intermédiaire comparé à l'EPR et à la dorsale Atlantique, favoriserait une hétérogénéité régionale du type d'habitats, ce qui serait favorable à une diversité faunistique plus élevée. Il existe sur NEP une grande diversité d'habitats, liée au type d'hydrothermalisme. Par exemple, à Middle Valley sur Juan de Fuca, les fluides hydrothermaux passent à travers des sédiments turbidites et sont associés à une faune particulière constituée d'espèces non présentes sur les structures de sulfure, et caractérisée par une grande proximité avec des espèces non hydrothermales (Juniper et al, 1992). L'activité hydrothermale peut être localisée sur de vieux dépôts de sulfure, comme sur Explorer, ou au contraire dans des fissures (Tunnicliffe et al, 1986). Malgré cette grande hétérogénéité d'habitats, la diversité reste moins élevée sur NEP que sur EPR. Ce résultat serait également lié à un taux d'accrétion plus faible qui limiterait le nombre d'habitats disponibles à l'échelle globale, mais aussi à l'histoire de colonisation des deux systèmes de dorsales (Juniper and Tunnicliffe, 1997). Le taux d'accrétion moins élevé entraîne une plus grande stabilité de l'habitat par rapport à l'EPR. Les cheminées hydrothermales sur NEP ont une durée de vie plus longue et peuvent atteindre des hauteurs de 45 m (Robigou et al, 1993). Ces structures grandissent verticalement par accumulation de cheminées et latéralement par le développement de « collerettes » et le dépôt tardif de silice amorphe renforcerait ces structures, expliquant leur taille inhabituelle (Robigou et al, 1993). La dorsale Explorer au nord, avec un taux d'accrétion de 4 cm/an (Riddihough, 1977), est caractérisée par la présence de vieux dépôts de sulfure avec des champs hydrothermaux actifs sur de vieux socles basaltiques (Tunnicliffe et al, 1986). Les communautés associées au système de dorsale de NEP sont donc plus stables dans le temps, expliquant probablement une plus grande proximité de la faune non hydrothermale (Tunnicliffe, 1988; Tunnicliffe et al, 1986; Tunnicliffe and Jensen, 1987). En effet la présence de faune non inféodée au milieu hydrothermal semble influencée par l'âge de la lave (Milligan and Tunnicliffe, 1994).

A l'échelle locale, la stabilité de l'habitat influence la disponibilité du type de substrat. Ainsi sur NEP les édifices de sulfure, plus grands et plus stables dans le temps, constituent donc un substrat plus abondant que sur l'EPR où l'on retrouve surtout de la diffusion à travers le basalte (Sarrazin and Juniper, 1999). Des études d'écologie sur les communautés faunistiques associées aux structures de sulfure de Juan de Fuca ont montré que le type de substrat exerçait

un rôle significatif sur la structure et composition des communautés (Sarrazin et al, 1999; Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Sur ces grandes structures typiques de la région, l'hétérogénéité locale s'opère à l'échelle du décimètre voire du centimètre. Ainsi, la forme générale des cheminées est stable dans le temps mais les variations morphologiques et volumétriques locales, liées à la croissance ou à la disparition de fumeurs ou à l'écroulement de petites structures, créent d'une part de nouvelles surfaces de colonisation pour les organismes, et perturbent d'autre part les communautés existantes (Sarrazin et al, 1997).

A l'échelle d'une structure, six assemblages faunistiques, associés avec des habitats distincts en terme de conditions physico-chimiques locales, ont été définis sur Juan de Fuca (Sarrazin and Juniper, 1999; Sarrazin et al, 1997):

- (I) une communauté dominée par le ver tubicole alvinellidé *Paralvinella sulfincola* sur les structures de sulfures au niveau des zones de flux élevé à forte température;
- (II) un assemblage à *P. sulfincola* et *P. palmiformis*, ce dernier formant des agrégations sur les excroissances de marcasite (sulfures de fer), également sur les structures de sulfures et associées à des températures de moyennes à fortes dans les zones de diffusion;
- (III) un assemblage dominé par des gastéropodes (*Lepetodrilus fucensis*, *Provanna variabilis* et *Depressigyra globulus*) avec des agrégations de *P. palmiformis* et une forte abondance de vers à écaï lles (*Branchinotogluma tunnicliffae* et *Lepidonotopodium piscesae*) dans des zones de flux et température moyens sur les sulfures ou les basaltes;
- (IV) une communauté composée exclusivement de gastéropodes (*L. fucensis*, *P. variabilis* et *D. globulus*) en forte densité sur des petits tubes du siboglinidé *Ridgeia piscesae*. Cet assemblage est associé aux zones de faible flux avec des températures basses à moyennes et se caractérise par l'absence de *P. palmiformis*;
- (V) un assemblage dominé par la présence du siboglinidé *R. piscesae*, et des gastéropodes. Cette communauté est caractérisée par la plus forte diversité et se développe dans les zones de faible flux et basse température, sur des structures de sulfure ou de basalte;
- (VI) enfin une communauté définie par la présence de tube de siboglinidés morts ou moribonds d'une couleur jaune/marron. Cette communauté est associée avec les zones de faible flux, voire inactives.

L'évolution et la mise en place de ces communautés semblent donc refléter les modifications du flux hydrothermal en termes d'intensité et de type d'hydrothermalisme (fumeur vs diffusion). La précipitation de minéraux de sulfure diminue le diamètre des conduits hydrothermaux et entraîne une redirection du flux. De même, la croissance des organismes peut modifier l'environnement physico-chimique, comme par exemple *P. sulfincola* qui facilite le dépôt de marcasite, créant ainsi une surface tampon entre la cheminée et l'eau de mer environnante (Juniper, Jonasson et al, 1992). Ces variations du flux hydrothermal, en fonction des besoins physiologiques et nutritionnels des différentes espèces, influence non seulement la composition des communautés mais aussi la richesse spécifique avec des indices de diversité plus élevés dans les zones de flux hydrothermal modéré que dans les zones caractérisée par des conditions plus sévères (Sarrazin and Juniper, 1999).

Bien que les changements rapides de communauté et de colonisation suite à la création et à la destruction de microhabitats démontrent la capacité de la faune à exploiter cet environnement dynamique (Sarrazin et al, 1997), des observations ont montré que le recrutement sur des zones dénudées dû à un échantillonnage est faible, mettant en

évidence une certaine fragilité des organismes face aux perturbations (Tunnicliffe, 1990). Les perturbations fréquentes à l'échelle locale représentent une opportunité pour les espèces mobiles de coloniser de nouvelles surfaces en fonction de leur besoins physiologiques et nutritionnels (Bates et al, 2005; Sarrazin et al, 1997) mais sont également une source de mortalité importante pour les espèces sessiles (Tunnicliffe and Juniper, 1990). La composition physico-chimique du fluide influence en partie la distribution des espèces et la structure des communautés (Bates et al, 2010; Bates et al, 2005; Sarrazin et al, 1999). Alors que la température est le plus souvent utilisée comme proxy des conditions environnementales, Sarrazin et coll. (1999) ont mesuré une variété de paramètres environnementaux incluant la température, le sulfure dissous, le fer et le manganèse et ont détecté une influence significative de chaque paramètre sur les caractéristiques de la communauté. Cette influence représente cependant un faible pourcentage de la variabilité observée dans ces communautés, et il est aujourd'hui reconnu que de nombreux autres facteurs, abiotiques et biotiques, jouent un rôle primordial dans la mise en place de ces assemblages.

Facteurs structurants par habitat caractéristique

Suite aux premières descriptions des communautés effectuées dans les années 80/90s, la majorité des études s'intéressant aux facteurs contrôlant la structure et la composition des communautés se sont focalisées sur des habitats particuliers. Ainsi, les moulières le long de l'EPR ont fait l'objet de beaucoup d'études révélant le rôle de l'âge des sites, de la stabilité de l'habitat et de la productivité sur la structure et la diversité des communautés (Dreyer et al, 2005; Matabos et al, 2011; Sarrazin et al, 2006; Van Dover, 2002; Van Dover, 2003). A une échelle globale voire régionale, l'instabilité de l'habitat affecte la distance entre sites qui apparaît comme un facteur important pour le contrôle de la biodiversité, avec des taux de diversité plus faibles quand la distance entre sites augmente, ce qui traduit probablement l'influence des processus de dispersion (Turnipseed et al, 2003). L'influence des facteurs locaux se mesure par les variations des conditions physico-chimiques qui vont varier le long d'un gradient spatial mais aussi avec l'âge du site. Cependant, il a été suggéré qu'au niveau des moulières, l'influence de l'âge des sites sur l'abondance et le volume de la macrofaune n'est pas directement liée aux changements des conditions physico-chimiques mais indirectement aux changements induits par la croissance des moules, soit : (1) une augmentation de la compétition pour le substrat inorganique entre les bactéries symbiotiques et les bactéries autotrophes libres, diminuant ainsi la ressource disponible pour la macrofaune; et (2) une mortalité plus élevée des larves de macrofaune qui seraient consommées par les moules en réponse à des besoins nutritionnels accrus liés à leur taille (Dreyer et al, 2005). Enfin la stabilité de l'habitat va également avoir une influence à l'échelle locale en contrôlant la variabilité intra-sites du flux hydrothermal (Matabos et al, 2011). En parallèle, l'influence des interactions biotiques sur le développement des communautés à bivalves a fait l'objet de peu d'études et semble pourtant avoir un rôle important sur le recrutement des organismes au sein de ces assemblages (Lenihan et al, 2008).

Le rôle des facteurs structurant au niveau de l'habitat à siboglinidés a été principalement appréhendé à l'aide d'approches expérimentales impliquant le déploiement de surfaces de colonisation (Govenar and Fisher, 2007; Hunt et al, 2004; Mullineaux et al, 2000). Le premier colonisateur de ces communautés est *T. jerichonana*, suivi par *R. pachyptila* et *O. alvinae*. Il a été suggéré que *T. jerichonana* émettait des substances chimiques qui facilitent la colonisation par les autres espèces de siboglinidés (Mullineaux et al, 2000). Ainsi le développement de ces communautés est le résultat de l'interaction entre un environnement favorable et des processus de facilitation. D'autre part, le déploiement d'agrégats de tubes artificiels a démontré le rôle de la structure physique complexe formé par les tubes dans le maintien de la

diversité locale (Govenar and Fisher, 2007). A l'inverse, les facteurs structurant le développement et la composition des communautés associées à l'habitat à alvinellidés sont peu connus. *A. pompejana* est capable de contrôler et modifier son environnement physico-chimique, créant ainsi des microenvironnements régulés ou micro-niches (Le Bris et al, 2005) qui favorisent le recrutement d'espèces de macrofaunes mobiles moins tolérantes (Pradillon et al, 2009). Seuls les gastéropodes ont fait l'objet d'études au sein de cet habitat (Matabos, Le Bris et al, 2008; Mills et al, 2007).

Comme le montre l'état des lieux détaillé ci-dessus des études de diversité de la macrofaune sur les différents sites hydrothermaux à l'échelle globale, il y a un fort contraste entre des zones bien explorées (NP, EPR, MAR-Nord), et des zones encore insuffisamment décrites (WP, IO, MAR-Sud), sans parler des dorsales encore quasiment inexplorées (Arctique, Pacifique-Antarctique). Les assemblages faunistiques montrent des compositions variées d'une zone à l'autre, définissant des provinces biogéographiques bien distinctes mais connectées. Mais il faut noter que même sur les zones les mieux décrites, de nouvelles espèces continuent à être découvertes.

A l'échelle régionale ou locale, les grands principes de la distribution spatiale des espèces de macrofaune sont comparables, contraints par les gradients thermiques et chimiques, avec des espèces ingénieuses étroitement associées à des bactéries (ecto- ou endosymbioses). Mais si cette distribution est assez bien comprise pour certains habitats (moulières, gastéropodes WP, siboglinidés,...), elle l'est beaucoup moins pour d'autres (alvinellidés, caridés,...) plus difficiles à appréhender.

Il manque néanmoins encore des données sur le compartiment méiofaune pour pouvoir comprendre et comparer la globalité des réseaux trophiques qui s'établissent autour des sites hydrothermaux actifs.

En revanche, extrêmement peu de données sont disponibles pour les sites inactifs, même lorsque l'on connaît leur existence à proximité des sites actifs.

4.3.3.3. Dynamique temporelle (MAR, NEP et EPR)

Alors que la distribution spatiale de la faune hydrothermale commence à être mieux comprise, il existe beaucoup moins de données sur la variation temporelle des communautés hydrothermales et les facteurs abiotiques du milieu (Glover et al, 2010; Tokeshi, 2011). La plupart des études temporelles qui ont été réalisées dans l'environnement hydrothermal ne sont pas basées sur un suivi temporel en continu mais plutôt sur des visites récurrentes, plus ou moins régulières, annuelles ou pluriannuelles, de submersibles habités ou téléguidés. Plusieurs tentatives de déploiement de caméras vidéo ont été effectuées depuis la découverte des sources hydrothermales en 1977, mais en raison d'un très grand nombre d'échecs, très peu d'entre elles ont donné lieu à une étude de la dynamique temporelle de cet écosystème (Glover et al, 2010). Les contraintes technologiques liées au déploiement de caméras « grand fond » pour de longues périodes de temps demeurent encore considérables, quoique le développement des observatoires fond de mer ouvre de nouvelles perspectives, tant au niveau de la qualité de l'imagerie que du potentiel d'observation sur le long terme et quelquefois même, en temps réel (cas des observatoires câblés).

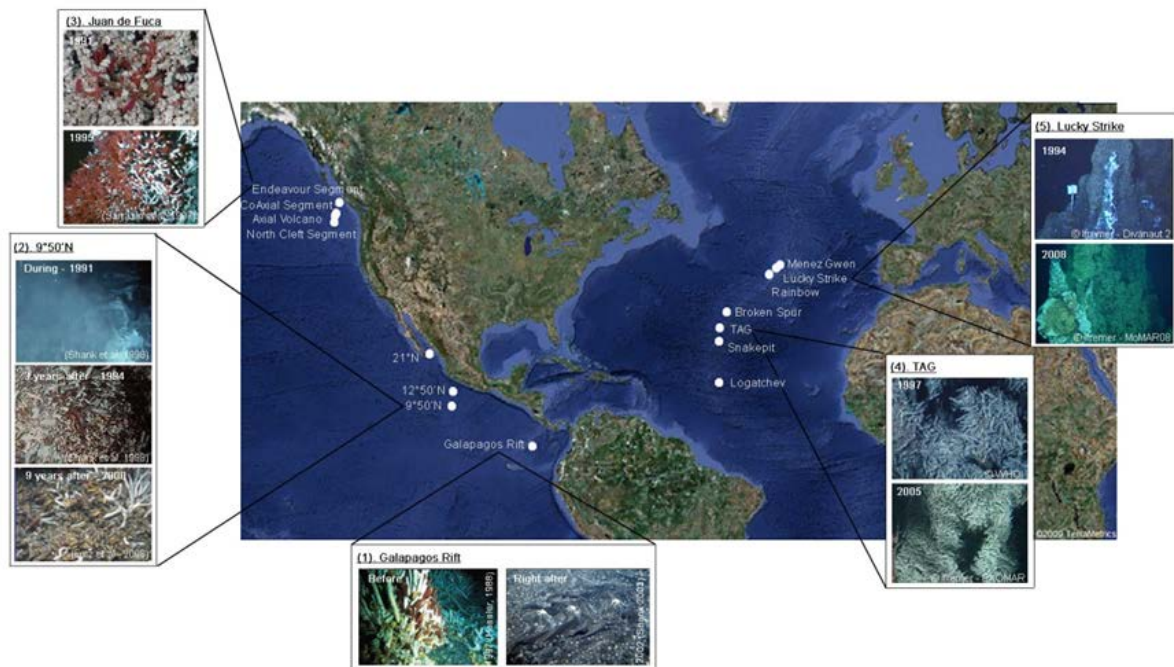


Figure 4-37 Aperçu des principaux champs hydrothermaux où ont été effectuées les études temporelles. Tiré de la thèse de D. Cuvelier (2011).

- (1) Le premier site hydrothermal découvert sur la dorsale des Galápagos était colonisé par de luxuriants assemblages de vers polychètes siboglinidés du genre *Riftia*. Il a fait l'objet d'une courte étude temporelle entre 1979 et 1985 (Hessler et al, 1988). Cependant, 13 ans plus tard, un retour sur zone a montré que ce site a été complètement détruit et couvert de lave (Shank et al, 2003).
- (2) La première étude suivant une éruption (T_0) a été effectuée à $9^{\circ}50'N$ sur l'EPR. L'éruption de 1991 a été suivie d'une étude de 4 ans (Shank et al, 1998). La colonisation par des espèces pionnières de siboglinidés, suivie par l'arrivée de modioles du genre *Bathymodiolus* est décrite. Des retours sur zone et des expérimentations ont eu lieu sur ce site jusqu'en 2006 où une nouvelle éruption a totalement détruit le site (Lutz et al, 2008).
- (3) Un édifice hydrothermal situé sur le segment Endeavour de la dorsale Juan de Fuca a fait l'objet d'une étude temporelle de 1991 à 1995 (Sarrazin et al, 1997). La figure montre l'un des transferts les plus fréquents entre un assemblage dominé par deux espèces de *Paralvinella* à un assemblage colonisé par *Ridgeia piscesae* et *Paralvinella palmiformis*. Ce suivi a permis la proposition d'un premier modèle de succession (Sarrazin et al, 1997).
- (4) Le mont TAG est l'un des sites les plus étudiés de la dorsale médio-atlantique et a fait l'objet, de 1994 à 2004, d'une étude temporelle (Copley et al, 2007). Une certaine stabilité à 10 ans a été observée au niveau de la distribution et de la densité de la faune (Copley et al, 2007).
- (5) L'édifice Sintra en 1994 et en 2008 sur le champ hydrothermal Lucky Strike. L'édifice resté actif est dominé par les modioles.

Variation temporelle à l'échelle des organismes ou de l'assemblage

Les variations des conditions physico-chimiques à des échelles spatio-temporelles réduites sont une des caractéristiques majeures des écosystèmes hydrothermaux. Au niveau des zones de diffusion, le flux hydrothermal affiche des températures allant de l'eau de mer ambiante ($\sim 2^{\circ}C$) jusqu'à $30-50^{\circ}C$ sur des distances de quelques centimètres (Delaney et al, 1992; Johnson et al, 1988; Sarrazin et al, 1999; Sarradin et al, 1998 et 1999; Desbruyères et al, 2001; Le Bris et al, 2000; Podowski et al, 2009). De plus, la variabilité temporelle de la température présente des variations dépassant parfois $10^{\circ}C$ sur des échelles de temps inférieure à l'heure (Johnson et al, 1988; Le Bris et al, 2006; Moore et al, 2009) et une périodicité en phase avec le rythme des marées (Johnson et Tunnicliffe, 1985; Tivey et al, 2002; Sarrazin et al, soumis DSR). Les espèces associées aux sources hydrothermales du Nord-Est Pacifique choisissent des températures bien inférieures à leurs limites thermiques afin de préserver une marge de sécurité face aux fluctuations thermiques (Bates et al, 2010). D'autres sont qualifiées d'extrémophiles et colonisent les parois de cheminées actives où la température dépasse largement leur tolérance thermique mais dont elles se protègent grâce à

la ventilation de leur tube (Zbinden et al, 2004; Le Bris et al, 2005; Sarradin et al, 2008). D'autre part, si la température varie sur des échelles spatio-temporelles réduites, c'est également le cas pour d'autres paramètres chimiques comme le sulfure et l'oxygène et les éléments métalliques (Luther et al, 2001; Le Bris et al, 2006; Sarradin et al, 2008), ainsi que la disponibilité de la ressource qui présente des gradients à l'échelle du cm (Levesque et al, 2005; Limen et al, 2007; De Busserolles et al, 2009). Les espèces exploitant les zones de diffusion vigoureuses habitent donc l'un des systèmes les plus variables de l'environnement marin en termes de température, de toxicité et de ressources. Ainsi on peut s'attendre à ce que les organismes ajustent leur position afin d'optimiser leur thermorégulation et de maximiser la disponibilité de la ressource (Fisher and Childress, 1992; Schmidt et al, 2008; Le Bris and Gaill, 2007; Le Bris et al, 2008).

Variation temporelle des communautés à l'échelle d'un site

Les études temporelles existantes sont restreintes à une poignée de sites bien connus, la plupart localisés sur la dorsale de l'Est du Pacifique. Dans l'océan Atlantique, seules deux études publiées (Copley et al, 2007; Cuvelier, 2011) sont disponibles et ce malgré une fréquence élevée de campagnes dans cette région. Ainsi, environ 30 campagnes avec submersibles ou ROV y ont été réalisées depuis 18 ans. Les études temporelles effectuées au niveau des sources hydrothermales peuvent être divisées en deux catégories : (I) celles qui ont commencé pendant ou tout de suite après une éruption et (II) celles qui se sont effectuées sur des sites caractérisés par une activité hydrothermale continue. Les premières sont toutes localisées dans l'océan Pacifique en raison notamment de la fréquence des événements sismiques et de l'activité volcanique qui sont plus importantes sur les dorsales à t aux d'accrétion rapides que sur celles à faibles taux d'accrétion (Baker et al, 1995). En effet, seul un événement d'importance a été enregistré sur la dorsale médio-atlantique depuis les 20 dernières années (Dziak et al, 2001) comparativement à plusieurs dizaines dans le Pacifique (Haymon et al, 1993).

Etudes temporelles liées à une éruption

Galápagos

Découvert en 1977 sur la dorsale des Galápagos, Rose Garden est le premier site hydrothermal connu (Lonsdale, 1977). Au cours de la première visite avec le sous-marin Alvin (Corliss et al, 1979), ce site est nommé "Rose Garden" en raison de la ressemblance entre les buissons de vers et des bouquets de roses. Dans les années 80, plusieurs études ont eu lieu dans ce champ hydrothermal. En 2002, après 13 ans d'absence, ce site est revisité pour y découvrir que les communautés hydrothermales luxuriantes de l'époque ont été ensevelies sous une coulée de basalte frais (Figure 4-37, Shank et al, 2003). Cependant, environ 300m au nord-ouest, un nouveau site d'émissions diffuses de faible température est découvert. Ce site appelé « Rosebud » et situé à 2470m de profondeur est caractérisé par la présence d'assemblages de petits siboglinidés (<6cm), de modioles, d'anémones et de vésicomysidés colonisant les fissures des coulées basaltiques fraîches (Shank et al, 2003).

Dorsale de l'Est Pacifique à 9°50'N

En avril 1991, une série d'éruptions volcaniques sous-marines ont initié la formation de plusieurs sites hydrothermaux entre 9°45 et 9°52N le long de la dorsale de l'EPR. Depuis cette éruption, plusieurs campagnes ont eu lieu autour de 9°50N (Figure 4-37). Les observations ont permis de mettre en évidence que cet événement éruptif a entraîné le recouvrement d'une large étendue du sommet de la ride, anéantissant la presque totalité des

communautés animales présentes, d'où l'appellation de "Tubeworm Barbecue" (Desbruyères, 1998; Lutz et al, 2001). Les vieux sites ont été ensevelis sous la lave et de nouveaux sites, dépourvus de mégafaune, se sont développés. La première étude temporelle d'un nouveau site hydrothermal, débutée à t0, s'est effectuée le long d'un transect de 1,37 km de long sur le sommet de la caldera. De larges étendues de tapis microbiens entouraient les nouveaux sites d'émissions et blanchissaient les coulées de lave fraîches. L'eau du fond était laiteuse avec la présence de « floes » de micro-organismes (Haymon et al, 1993; Shank et al, 1998). De larges populations de crabes *Bythograea thermydron* et d'autres espèces mobiles ont été observées, s'alimentant probablement de cette nouvelle production biologique (Desbruyères, 1998). Neuf mois plus tard, la couverture microbienne avait largement diminuée (~60%) et les émissions hydrothermales étaient limitées à des zones restreintes. Les fissures étaient occupées par de denses populations de vers polychètes siboglinidés *Tevnia jerichonana* (Desbruyères, 1998; Shank et al, 1998). Au bout de 32 mois, de grandes colonies de siboglinidés *Riftia pachyptila* étaient présentes dans chacune des colonies préexistantes de *Tevnia* (Figure 4-37). Les grandes étendues de tapis microbiens avaient disparu. Des petits individus de mytilidés *Bathymodiolus thermophilus* ont été observés à proximité des buissons de siboglinidés, 10 mois après l'établissement de *Riftia* et 13 mois plus tard, on les retrouvait fixés sur les tubes des siboglinidés (Shank et al, 1998). Plus tard dans la séquence, soit 55 mois après le début de l'éruption, les modioles *Bathymodiolus thermophilus* entouraient tous les assemblages de siboglinidés encore vivants (Shank et al, 1998), remplaçant même certains assemblages. L'hypothèse avancée par ces auteurs est que, du fait de leur capacité à distribuer horizontalement les fluides dans leurs agrégations, les modioles ont pu entraîner une diminution significative du H₂S disponible pour les vers (Lutz et al, 2008). La succession temporelle observée est probablement fortement liée aux variations des conditions environnementales (température et chimie des fluides, Shank et al, 1998). *Tevnia jerichonana* a donc été identifié comme une espèce pionnière, remplacée par des buissons de siboglinidés de l'espèce *Riftia pachyptila*, eux-mêmes exclus par les modioles *Bathymodiolus thermophilus* (Shank et al, 1998; Lutz et al, 2008). Les clams de la famille des Vésycomyidés ne semblent pas avoir colonisé les nouveaux sites actifs avec succès quoique Mullineaux et al, (1998) aient rapporté la présence de 2 individus et des individus étaient également présents en 2002 sur l'un des sites concernés.

Une deuxième forte éruption s'est produite en janvier 2006, détruisant la totalité d'un site hydrothermal à 9°50'N (Lutz et al, 2008). Alors que la plupart du système hydrothermal à 9°50'N était dominé par les modioles avant cette éruption, les vers polychètes siboglinidés ont repris le dessus en 2006 (Nees et al, 2008; Mullineaux et al, 2012), appuyant la succession proposée par différents auteurs (Shank et al, 1998; Desbruyères et al, 1998). Les vers siboglinidés *Tevnia jerichonana* ont rapidement colonisé les nouveaux sites d'émissions caractérisés par une augmentation de température et de concentrations en sulfures. A terme, quand les concentrations de sulfures retrouveront leurs niveaux avant éruption et si le modèle de succession est valide, les modioles finiront par repeupler la zone (Nees et al, 2008). Cette succession d'espèces dominantes a été confirmée récemment, de même que la relative reproductibilité des conditions chimiques des habitats (Contreira et al, 2013; Nedoncelle et al, 2013)

Dorsale du Nord-Est Pacifique

Au nord de l'EPR sont retrouvés les dorsales Gorda, Juan de Fuca et Explorer. Parmi les trois, la dorsale Juan de Fuca (JdF) est celle qui a été le mieux étudiée avec plus de 20 ans de recherche. Elle est formée de sept segments différents, la plupart abritant des sites hydrothermaux actifs (Baker and Hammond, 1992).

Segment CoAxial

Une étude de Tunnicliffe et coll. (1997) s'est intéressée aux conséquences d'une éruption qui a eu lieu sur le segment CoAxial en 1993. Durant deux ans (1993-1995), la colonisation des nouveaux sites hydrothermaux a été suivie. L'éruption a été entraînée par une intrusion de lave (Dziak et al, 1995) et caractérisée par une forte émission de micro-organismes provenant des couches de subsurface (Juniper et al, 1995). Cette population microbienne semble avoir joué un rôle important dans le recrutement de la macrofaune puisque les sites où les concentrations de microbes étaient les plus fortes étaient caractérisés par une densité de faune plus importante (Tunnicliffe et al, 1997). Sept mois après l'éruption, plusieurs espèces avaient colonisé les sites actifs et ce malgré l'absence d'autres sites actifs à proximité (Tunnicliffe et al, 1997). Les espèces les plus abondantes incluaient les vers siboglinidés *Ridgeia piscesae*, les vers polychètes alvinellidés (*Paralvinella pandorae*) ainsi que les némerthes. En deux ans, le tiers du pool régional d'espèces était présent sur le site (Tunnicliffe et al, 1997). Cette colonisation était fortement liée à une augmentation de la température et des concentrations de H₂S au cours du temps. Cependant, certains des sites semblaient être en déclin au bout de 2 ans. La succession d'espèces sur ces sites sénescents était différente de celle observée sur les sites actifs, puisque les populations d'alvinellidés avaient disparu et d'abondants prédateurs (crabes et poulpes) étaient observés (Tunnicliffe et al, 1997).

Segment North-Cleft

La mise en évidence de grands panaches hydrothermaux près de la portion Nord du segment Cleft a laissé supposer que ce segment, qui est le plus au sud de la dorsale Juan de Fuca, a été l'objet d'intenses activités tectoniques au cours des années 80s. Cette hypothèse a été confirmée plus tard par la formation de monts en forme d'oreillers (Embley and Chadwick, 1994). Un grand panache d'eau chaude s'est élevé à 800 m au-dessus du plancher océanique en 1986 et un second méga-panache a été observé en 1987 (Baker et al, 1989). L'éruption de 1986 a permis d'observer les patrons de succession de la faune entre 1988 et 1994 (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Les communautés observées en 1988 étaient vraiment similaires à celles observées sur le segment CoAxial deux ans après les éruptions (Tunnicliffe et al, 1997). Ainsi, de grandes étendues de tapis microbiens, d'épais buissons de vers siboglinidés *Ridgeia piscesae*, de fortes densités de *Paralvinella pandorae* et la présence de fissures dans le basalte, émettant des « flocs » de particules ont été observés (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Deux ans après l'éruption, plus de la moitié des espèces de Cleft étaient présentes sur North Cleft. De 1988 à 1990, la couverture microbienne et l'étendue de colonisation par *P. pandorae* ont diminué, les siboglinidés se sont allongés et les « flocs » de particules avaient disparu (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Cinq ans après l'éruption, la plupart des sites de faible température étaient éteints et en 1994, ils avaient tous disparu. Les émissions de haute température, elles, ont continué (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Malgré la présence de changements importants, la faune des sites hydrothermaux étudiés entre les années 1988 et 1994 ne s'est pas regroupée par année ou par région géographique. Il a donc été proposé que les caractéristiques locales des habitats (apport en sulfures, disponibilité de la nourriture, compétition) étaient des facteurs structurants clés de ces communautés (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001). Les espèces hydrothermales semblent s'être adaptées à de fréquentes éruptions épisodiques. Les changements de composition des fluides semblent avoir entraîné une perte d'habitat en place en raison de la forte diminution de sulfures disponibles (Tsurumi and Tunnicliffe, 2001).

Volcan Axial

En 1998, des tremblements de terre intenses ont été détectés sur le volcan Axial et une nouvelle coulée de lave, recouvrant les communautés animales en place a été observée

quelques mois plus tard (Embley et al, 1999). Cette nouvelle activité hydrothermale de fluides chauds (80°C) a attiré plusieurs espèces hydrothermales (Embley et al, 1999). Les nouveaux sites actifs furent échantillonnés pendant les 4 ans suivant cette éruption (Marcus et al, 2009). Le plancher basaltique était couvert de tapis microbiens blancs sur lesquels des vers polychètes alvinellidés et polynoïdés s'alimentaient. En juin 1999, des vers siboglinidés et d'autres espèces ont commencé à coloniser le site (Levesque and Juniper, 2002). Contrairement à ce qui était attendu et à ce qui avait été observé sur le segment CoAxial (Tunnicliffe et al, 1997), les vers polychètes ont mis plus de trois ans pour coloniser tous les nouveaux sites actifs et ce malgré la présence d'une population source (Marcus et al, 2009). Le polychète *Paralvinella pandorae* a dominé tous les assemblages de siboglinidés dans la première année. 30 mois après l'éruption, tous les nouveaux sites actifs étaient colonisés par des siboglinidés et plus de 64% des espèces connues de ce volcan étaient présentes (Marcus et al, 2009). Les causes de ce « retard » de colonisation par les siboglinidés sont inconnues mais le ratio H₂S/chaleur était plus élevé sur les sites avant l'arrivée des vers et tendait à décroître au cours des 3 années (Marcus et al, 2009). Au cours de la deuxième année, les patelles (*Lepetodrilus fucensis*) devinrent plus abondantes, surpassant les densités de *P. pandorae* dès l'an trois, dominant ainsi en nombre d'individus les communautés animales (Marcus et al, 2009).

Etudes temporelles sur des sites actifs

Galápagos

Après une première visite en 1979, ce site a été revisité en 1985. Au cours de cet intervalle de 5,5 ans, des changements majeurs de faune ont été observés et ce malgré le fait que les patrons d'émissions étaient demeurés les mêmes (Hessler et al, 1988). Les vers polychètes siboglinidés *Riftia pachyptila* étaient abondants et dominaient presque tous les sites actifs en 1979 alors qu'en 1985, leur abondance était réduite à 10% (Hessler et al, 1988). Les modioles *Bathymodiolus thermophilus* étaient devenues dominantes (Hessler et al, 1988). L'abondance des galathées *Munidopsis subsquamosa* s'était largement accrue, probablement en raison d'une forte immigration (Hessler et al, 1988). Même patron pour le buccin *Phymorhynchus* sp., qui vit en périphérie et près des sites en sénescence et dont la densité avait aussi augmenté (Hessler et al, 1988). En 1985, la population de palourdes *Calypptogena magnifica* s'était accrue, si bien qu'en 1988, elle entourait les assemblages de modioles, probablement en raison d'une diminution des émissions (les palourdes peuvent insérer leur pied dans les fissures pour atteindre les zones riches en sulfures (Desbruyères, 1998)). Une diminution des organismes filtreurs (siphonophores, vers serpulidés et anémones) a également été observée (Hessler et al, 1988; Desbruyères, 1998). Entre 1985 et 1990, la communauté a très peu changé, malgré une augmentation de l'abondance de la faune périphérique qui s'est rapprochée des sites actifs (Desbruyères, 1998).

Dorsale de l'Est Pacifique

12°50'N

Ce champ, souvent appelé 13°N, renferme plusieurs sites actifs. Les variations temporelles de la faune sur trois sites furent analysées entre 1982 et 1984 par Fustec et coll. (1987). Les variations les plus importantes étaient liées à la croissance ou à la diminution des communautés de *Riftia* et des édifices de sulfure, à la disparition de certaines espèces, à l'effondrement de laves (Fustec et al, 1987), ainsi qu'à la migration d'*Alvinella pompejana* le long des parois des édifices (Desbruyères, 1998). Entre 1984 et 1987, une modification de la

circulation de subsurface a entraîné la cessation de l'activité de deux sites actifs et la réactivation d'une zone préalablement non active (Desbruyères, 1998). En 1984, la température sur l'édifice Genesis était celle de l'eau de mer et seul un petit assemblage de petites modioles et quelques tubes vides de *Tevnia jerichonana* étaient présents. En 1987, cependant, Genesis semble réactivé et des fluides chauds (<23°C) ainsi que des tapis microbiens sont visibles près des zones d'émission. La faune est dominée par le crabe *Bythograea thermydron* ainsi que par d'importantes populations de *T. jerichonana*, mixées à de petits *Riftia pachyptila* (Desbruyères, 1998). Trois ans plus tard, les populations de *T. jerichonana* ont été remplacées par des petits monticules de *R. pachyptila*. Des édifices actifs de plus de 5 m de hauteur se sont développés, colonisés par d'importantes populations d'alvinellidés dominés par *Alvinella pompejana* (Desbruyères, 1998). En 1991 et 1992, une certaine stabilisation des émissions hydrothermales est observée et les communautés décrites demeurent les mêmes (Desbruyères, 1998). En 1996, plusieurs édifices se sont effondrés, ce qui sous-tend la courte durée de vie (~ 5 ans) des sites actifs dans ce champ (Desbruyères, 1998).

21°N

Un site appelé "Clam Acres" et localisé à 21°N, a été visité en 1979, 1982 et 1990 (Desbruyères, 1998). Comme le nom le suggère, ce site est dominé par des palourdes du genre *Calypptogena*, vivant avec des siboglinidés en proportions variables alors que les modioles *Bathymodiolus* sont absentes (Hessler et al, 1985). Les palourdes dominent les parties les plus planes du champ hydrothermal, se concentrant autour des fissures sur les laves en coussin (Hessler et al, 1985). Les sorties des émissions hydrothermales sont peuplées de larges buissons de siboglinidés du genre *Riftia*, dont les tubes sont quelquefois densément colonisés par des patelles. Le sommet des édifices est colonisé par des tubes minéralisés d'*Alvinella pompejana* (Hessler et al, 1985). Les zones périphériques sont recouvertes d'un plus fort pourcentage de coquilles de vésicomidés mortes (Hessler et al, 1985). Les émissions et la distribution des communautés semblent avoir été stables entre 1979 et 1990, ce qui indique une certaine stabilité décennale (Desbruyères, 1998).

Nord-Est Pacifique

Volcan Axial

Les espèces hydrothermales de ce volcan sont distribuées le long d'un gradient horizontal qui s'échelonne du centre vers la périphérie du site (Marcus and Tunnicliffe, 2002). La zonation change en s'éloignant des sites d'émissions. Le long de ce gradient, les vers siboglinidés *Ridgeia piscesae* ainsi que les polychètes alvinellidés *Paralvinella pandorae* et *Paralvinella palmiformis* sont retrouvés à proximité des sources et tendent à disparaître vers les zones périphériques alors que les gastéropodes (*Lepetodrilus fucensis* et *Depressigyra globulus*) semblent être distribués de façon équitable, malgré que l'abondance relative de *L. fucensis* semble augmenter vers la périphérie (Marcus and Tunnicliffe, 2002). En 1986, une caméra vidéo a été déployée pour des durées de 1, 5 et 26 jours sur le site Mushroom, situé sur ce volcan. Le phénomène le plus remarquable fut la croissance et l'effondrement rapide de petites cheminées d'anhydrite qui ont entraîné la mort de 44% des vers *Ridgeia piscesae* étudié au cours des 26 jours (Tunnicliffe, 1990). L'effet destructeur de l'effondrement de cheminées ou par des glissements de terrain pourrait être fréquent dans l'habitat hydrothermal et avoir un impact significatif sur les communautés animales (Tunnicliffe, 1990; Sarrazin et al, 1997).

Endeavour

Six assemblages de faune ont été identifiés sur un large édifice hydrothermal du champ hydrothermal Endeavour appelé S&M. Ces assemblages sont distribués en mosaïque en fonction des variations des conditions environnementales (Sarrazin et al, 1997 et 1999). Quatre de ces assemblages contiennent le ver polychète siboglinidé *Ridgeia piscesae*, différant les uns des autres en fonction de la longueur des tubes et des espèces associées (gastéropodes et polychètes). Les deux autres assemblages contiennent seulement des polychètes alvinellidés (*Paralvinella sulfincola* et *P. palmiformis*) (Sarrazin et al, 1997). La dynamique des communautés a été suivie pendant 4 ans, au cours de visites répétées sur l'édifice (entre 1991 et 1995, pendant lesquelles 5 visites ont été effectuées, 2 en 1991, 1 en 1994 et 2 en 1995) (Figure 4-37). L'abondance relative ou le pourcentage de couverture des différents assemblages a varié au cours des différents intervalles de temps (3 et 1 an), et plusieurs assemblages ont colonisé des surfaces inhabitées. Les assemblages de *P. palmiformis*, de patelles *Lepetodrilus fucensis* et de gastéropodes (*Provanna variabilis* et *Depressigyra globulus*) (Figure 4-37) ainsi que les assemblages de vers siboglinidés en sénescence ont augmenté de façon substantielle (Sarrazin et al, 1997). L'augmentation des assemblages en sénescence peut être indicatrice d'une diminution des apports de fluides. Le polychète *Paralvinella sulfincola* est considéré comme étant un colonisateur pionnier des nouvelles surfaces de haute température (Juniper et al, 1992; Sarrazin et al, 1997). Les assemblages identifiés présentent différents stades de succession où les transferts sont initiés par des variations du débit des fluides et de la porosité. La minéralisation progressive des édifices entraîne des modifications de flux à petite échelle spatiale et la succession intervient en même temps que le substrat évolue (Sarrazin et al, 2002). Au fur et à mesure que la minéralisation et la succession progressent sur l'édifice, l'influence d'autres facteurs biotiques comme la prédation et la compétition joueraient un rôle croissant (Sarrazin et al, 2002). Au cours de cette succession, les facteurs abiotiques semblent prédominer au cours des premiers stades alors que les facteurs biotiques modèleraient les stades plus avancés comme ceux des assemblages de siboglinidés où les tubes peuvent être considérés comme des surfaces secondaires pour la colonisation par d'autres organismes (Tunnicliffe, 1997; Sarrazin and Juniper 1999; Sarrazin et al, 2002). Les processus biotiques interagiraient avec les conditions environnementales pour initier les patrons de succession au niveau des écosystèmes hydrothermaux (Sarrazin et al, 1997 et 2002).

Dorsale médio-atlantique

Au cours des 20 dernières années, plusieurs champs hydrothermaux situés dans la partie septentrionale de la dorsale médio-atlantique (MAR), au sud des Açores, ont été étudiés à plusieurs reprises au cours de campagnes océanographiques impliquant des équipes de recherche internationales.

TAG

Le mont hydrothermal TAG (Trans-Atlantic Geotraverse), situé dans les profondeurs de l'océan Atlantique (3600 m), fut le premier site hydrothermal découvert de cette dorsale. La communauté hydrothermale qui y vit est donc connue depuis longtemps (Rona et al, 1986) et une étude temporelle de cette faune a été menée entre 1994 et 2004 (Copley et al, 2007). La distribution et l'abondance de la faune présente sur les cheminées centrales et la périphérie, sur la terrasse supérieure du mont, ont été évaluées (Copley et al, 2007). Cette étude a montré qu'il n'existait aucune différence significative dans la couverture et l'abondance des crevettes *Rimicaris exoculata* (caractéristiques des cheminées centrales, Figure 4-37). Des anémones *Mariactis rimicarivora*, distribuées en périphérie, ont aussi été observées. Au final, une

certaine stabilité décennale au niveau de la structure des communautés a été reportée sur TAG (Copley et al, 2007). Même si cela n'a pas été quantifié, il semble que les espèces montrent des patrons de distribution similaires en 1985 (Rona et al, 1986), ce qui suggère une stabilité des communautés sur deux décennies. Cette stabilité coïncide avec une certaine constance au niveau des paramètres physico-chimiques sur la même échelle de temps : la géochimie des fluides de haute température semble être invariable au cours de 10 ans (Parker et al, 2005). En 1994, une caméra vidéo a été déployée pendant neuf mois dans le quadrant NE de TAG, où les changements à petites échelles de temps, particulièrement au niveau d'un forage ODP, ont été suivis (Copley et al, 1999). L'opération de forage a entraîné une augmentation de la température au niveau du plancher océanique, stimulant l'arrivée de denses agrégations de crevettes. La distribution des anémones dans cette zone est cependant demeurée inchangée (Copley et al, 1999). L'augmentation des crevettes était momentanée et les densités de crevettes ont retrouvé leur niveau de base et ce même avant que la température ne retourne à la température initiale. Le complexe de cheminées central demeure le point principal d'émissions de température à TAG (Copley et al, 1999). En 2004, le quadrant NE du mont a retrouvé sa quiétude et les agrégations de crevettes n'y sont plus présentes (Copley et al, 2007).

Broken Spur

Contrairement aux denses agrégations de *Rimicaris exoculata* observées sur les sites TAG et Snake Pit, les assemblages de crevettes du champ hydrothermal Broken Spur (3100 m) sont beaucoup moins denses. La présence limitée de substrats de colonisation exposés aux fluides est peut-être le facteur qui peut expliquer ces densités réduites (Copley et al, 1997). Des observations similaires ont été faites dans le champ hydrothermal Logatchev, également situé en profondeur dans l'Atlantique (Gebruk et al, 2000). Quand le substrat de colonisation optimal est présent, comme sur le site Bogdanov du champ Broken Spur, où le sommet large et plat est baigné par le fluide hydrothermal, d'importants essaims de crevettes sont présents (Copley et al, 1997). La présence de faibles abondances de faune au sein d'un champ hydrothermal bien établi et actif pourrait être dû à une réactivation récente après une période d'inactivité ou à l'occurrence d'un événement catastrophique qui aurait entraîné une réduction drastique de la faune (Murton et al, 1995). Dans le cas d'un tel scénario, la communauté hydrothermale se remettrait de cette perturbation, avec la faune qui recolonise lentement le système (Van Dover, 1995). Les variations interannuelles au niveau de la distribution de la faune sur le site Broken Spur ne supportent pas l'hypothèse d'une perturbation mais plutôt que les faibles densités de crevettes représentent un stade climax dans un environnement où les habitats optimaux sont rares (Copley et al, 1997). Cependant, ceci n'exclut pas la possibilité que le site Broken Spur ait expérimenté une ou certaines périodes de perturbations au cours de son passé géologique (Copley et al, 1997).

Rainbow

Le site hydrothermal Rainbow (2300 m) semble être un représentant intermédiaire entre les sites peu profonds et les sites profonds de la dorsale médio-atlantique. Il est constitué de grandes cheminées de sulfure qui abritent d'importants assemblages de crevettes *R. exoculata* et quelques « patchs » isolés de *Bathymodiolus azoricus*. L'activité hydrothermale de ce site semble être en déclin. En 2006, la plupart des assemblages de modioles avaient disparu et les agrégations de crevettes étaient moins importantes que dans les années précédentes. Néanmoins, un retour en 2013 (campagne BIOBAZ) a permis de localiser plusieurs assemblages de modioles assez étendus sur les édifices actifs.

Lucky Strike

Les assemblages faunistiques du champ hydrothermal Lucky Strike sont distribués en mosaïque, répartis au sein de différents édifices de sulfures actifs (van Dover et al, 1996; Desbruyères et al, 2000 et 2001). Deux types d'assemblages de faune sont largement représentés dans le champ Lucky Strike : les assemblages dominés visuellement par les modioles *Bathymodiolus azoricus* et un assemblage dominé visuellement par les crevettes alvinocarididés *Mirocaris fortunata* (De Busserolles et al, 2009; Cuvelier et al, 2009 et 2011). La structure et la composition de ces assemblages sont contrôlées par leurs positions dans la zone de mélange, situées entre les fluides hydrothermaux chauds et l'eau de mer froide (Cuvelier et al, 2009; Sarradin et al, 2009). Les assemblages de moules se trouvent dans les microhabitats froids (4,4-6,1°C) de l'écosystème alors que les assemblages de crevettes colonisent les microhabitats légèrement plus chauds (5,2 - 9,5°C), avec un chevauchement de leurs niches de température (Cuvelier et al, 2011). Les conditions environnementales trouvées dans les différents habitats hydrothermaux ont un impact significatif sur la production microbienne car ils influent sur la disponibilité de sources d'énergie (De Busserolles et al, 2009) et induisent des modifications au niveau de la proportion des endosymbiotes dans les branchies de *B. azoricus* (Halary et al, 2008). En outre, elles influencent de manière significative la biodisponibilité des composés potentiellement toxiques, tels que les sulfures et les métaux lourds (Cosson et al, 2008; Sarradin et al, 2009). Le rôle des facteurs abiotiques sur le contrôle de la structure et le fonctionnement des communautés hydrothermales à l'échelle d'un seul édifice a été récemment évalué par des analyses multivariées, avec l'ajout du compartiment de la méiofaune dans nos études sur la biodiversité (De Busserolles et al, 2009; Cuvelier et al, 2011). En outre, des expériences de colonisation à long terme ont été initiées afin de recueillir des informations sur le rôle de l'activité hydrothermale dans les processus de colonisation et sur la diversité des espèces (Cuvelier et al, soumis DSR).

Tour Eiffel

Les connaissances sur les processus biologiques fondamentaux tels que la reproduction, le recrutement, les rythmes biologiques et les interactions entre les espèces restent limitées.

Récemment, les images vidéo recueillies pendant plus de 14 ans de missions avec submersibles sur le champ hydrothermal Lucky Strike ont été utilisées pour évaluer les changements temporels de la distribution des assemblages faunistiques sur l'édifice Tour Eiffel. Les résultats montrent la présence d'une stabilité globale relative sur une échelle décennale (Cuvelier et al, 2011). Pour la même période, une étude de mosaïques d'images du plancher océanique sur cette zone indiquent une baisse générale des sorties de fluides diffusés au niveau de l'ensemble du champ (Barreyre et al, 2012), bien que cette observation n'ait pas pu être vérifiée pour l'édifice Tour Eiffel en particulier (Cuvelier et al, 2011).

La variabilité temporelle de la température est utilisée sur Tour Eiffel comme un proxy des émissions hydrothermales (Sarradin et al, 2009). Les résultats préliminaires montrent que les processus hydrodynamiques et la localisation spatiale des sondes influencent la variabilité des données de température enregistrées, ce qui suggère que chaque microhabitat est limité dans l'espace et le temps (Cuvelier, 2011). Néanmoins, puisque la plupart des campagnes océanographiques dans la région des Açores se déroulent uniquement en été et fonctionnent sur une courte période de temps, **les variations infra-annuelles dans les communautés de faune, les conditions environnementales associées et leurs interactions sont difficiles à évaluer.**

Les objectifs de l'étude écologique effectuée sur l'édifice Tour Eiffel dans le cadre de l'observatoire MoMAR sont d'obtenir des connaissances de base sur la variation au jour le

jour des facteurs biotiques et abiotiques dans un assemblage de moules hydrothermales sur un édifice de sulfure actif, en utilisant les données collectées par le module TEMPO (Sarrazin et al, 2007) et d'examiner les liens entre la dynamique de la faune et de l'environnement. L'imagerie vidéo seule est utilisée pour évaluer les changements dans la structure de l'assemblage de modioles et, éventuellement, pour décrire les processus de colonisation et de succession à l'échelle infra-annuelle (Sarrazin et al, soumis DSR). L'imagerie permet aussi d'identifier la présence de rythmes biologiques et de mieux comprendre les interactions des espèces (prédation, compétition, comportement trophique et reproduction). Les données de l'imagerie et celles de l'environnement sont ensuite couplées pour examiner la réponse de la faune aux variations de leur habitat ainsi qu'à des événements catastrophiques. Les données recueillies permettent une meilleure compréhension de la dynamique temporelle des écosystèmes hydrothermaux à l'échelle infra-annuelle (Sarrazin et al, soumis DSR).

Différents substrats de colonisation instrumentés (bois et ardoises) ont été déployés en 2006 sur trois sites représentant un gradient décroissant d'activité hydrothermale autour de l'édifice Tour Eiffel. Ces substrats, récupérés en 2008, permettent d'évaluer la colonisation de la faune en fonction du type d'environnement où ils sont posés et aussi selon la nature du substrat. Les sondes de température associées permettent de suivre l'évolution de l'environnement de la faune dans le temps. La composition et le recrutement de la faune (macrofaune et méiofaune) ont été étudiés à l'aide de l'analyse des images des sites de déploiements (2006 et 2008) et les résultats ne montrent aucune différence en fonction du type de substrats (organiques/bois et inorganiques/ardoises). Cependant, la localisation du site de déploiement et plus spécifiquement, les conditions environnementales semblent influencer de façon importante la composition taxonomique. Une relation négative est présente entre l'activité hydrothermale et la diversité taxonomique. A l'inverse, le taux de recrutement et la densité de la faune sont plus importants dans les zones où l'activité hydrothermale est plus élevée. La variabilité environnementale des microhabitats et les interactions biologiques semblent donc interagir pour structurer les nouvelles communautés de faune à proximité des sources hydrothermales (Cuvelier et al, en révision DSR).

4.4. Facteurs gouvernant la dynamique des écosystèmes et les relations avec d'autres écosystèmes ou compartiments de la biosphère

4.4.1. Habitats

4.4.1.1. Propriétés du milieu et relations espèces – habitats

Nature du substrat

Comme pour l'ensemble des fonds marins, les habitats benthiques associés aux ressources minérales sont relatifs à **deux types de biotopes : ceux des sédiments ou substrats meubles et ceux des substrats durs**. Ces derniers sont constitués de roches : précipitations hydrothermales, basaltes et roches issus du volcanisme océanique, ou encore biominéralisations de type nodule ou encroûtements (Wang and Müller, 2009).

L'état des connaissances est très différent pour ces deux types d'habitats profonds. Les environnements sédimentaires ont bénéficié d'approches à grande échelle grâce à des échantillonnages «de surface» réalisés à partir de navires par des méthodes quantitatives. Les études comparatives de la distribution et de la dynamique temporelle des communautés des milieux profonds en relation avec la variabilité de la ressource et de la profondeur portent

surtout sur ce compartiment (Levin et al, 2001). L'étude de la dynamique et du fonctionnement des communautés de substrat dur reste par contre essentiellement liée à l'utilisation de submersibles permettant des approches à petite échelle centrées sur les processus (Etter and Mullineaux, 2001).

Dans le cas des nodules, l'habitat de substrat dur est formé par les nodules eux-mêmes, tandis que les sédiments meubles sur lesquels ils sont posés constituent un habitat pour la faune qui vit à la surface ou dans les premiers centimètres du sédiment. C'est surtout sur ce compartiment meuble qu'ont été réalisées les études sur la biodiversité des environnements associés aux nodules.

Les habitats de substrat dur prédominent, au contraire, pour la grande majorité des environnements hydrothermaux actifs et inactifs. Ceux-ci sont en effet situés sur les dorsales océaniques, les bassins arrière-arc ou les flancs de volcans sous-marins qui sont le siège de formation de la croûte océanique et de précipitation des minéraux hydrothermaux. Les accumulations sédimentaires y sont plus rares, sauf sur les marges continentales, là où les eaux de surface sont fortement productives et la sédimentation importante (Levin et al, 2009). Les activités minières ne prévoient pas à ce jour d'exploiter des sulfures minéraux enfouis sous des couches de sédiment mais seulement les minéraux qui affleurent sur les fonds marins. Il faut cependant distinguer les sédiments dans lesquels migrent des fluides hydrothermaux, *a priori* non ciblés par les activités minières, des sédiments hydrothermaux en partie formés par des particules issues de panaches de fumeurs noirs rencontrés sur les monts de sulfure et qui sont colonisés par des communautés de faune endogée et de micro-organismes spécialisés (Rona et al, 1980; Schauer et al, 2011; Levin et al, 2009).

Les biocénoses de substrats durs sont également caractéristiques des monts sous-marins sur lesquels les encroûtements de ferromanganèse sont localisés. Les encroûtements sont formés sur des roches exposées et de fait sont associés à une variété d'habitats de substrats durs. Cependant, des accumulations sédimentaires sont aussi décrites sur les monts sous-marins à proximité des substrats rocheux et ces environnements doivent donc être considérés comme une mosaïque d'habitats de substrats durs et meubles (Etter and Mullineaux, 2001).

Hétérogénéité de l'habitat

L'hétérogénéité spatiale est la caractéristique principale des habitats associés aux ressources minérales, à différentes échelles, du micron au kilomètre (et au-delà pour les champs de nodules). Les échelles les plus fines qui caractérisent les habitats microbiens sont souvent appréhendées par des études en laboratoire sur la base d'échantillons de roches ou de sédiments. Les échelles millimétriques à décimétriques, caractéristiques des assemblages de faune, sont difficiles à appréhender en grande profondeur car la résolution spatiale des outils utilisés est souvent grossière au regard des échelles concernées. Pour autant, la distribution de la macro ou plutôt mégafaune est accessible grâce aux submersibles, qui offrent des capacités de manipulation et de cartographie à l'échelle centimétrique (Chapitre 3).

En milieu hydrothermal, de nombreux travaux ont caractérisé les liens entre la zonation en patch des espèces dominantes sur des distances de quelques mètres (Jollivet, 1993; Hessler et Kaharl, 1995; Sarrazin et al, 1997 et 1999; Cuvelier et al, 2009). Le schéma théorique d'une distribution concentrique autour des sources, établi à partir des premiers travaux, n'est pas toujours validé spatialement mais reste conceptuellement valable à l'échelle d'un site. Cette distribution reflète le gradient d'influence du fluide hydrothermal avec la distance à la source de fluide, indiqué par des gammes de température décroissantes (Hessler and Kaharl, 1995;

Tunnicliffe, 1991). Ce schéma suppose cependant l'existence d'une source unique de fluide de haute température qui se distribue spatialement en sources ponctuelles dont le degré de dilution avec l'eau de mer est variable. La cartographie à l'échelle d'un champ hydrothermal sur des distances de plusieurs centaines de mètres intégrant de nombreuses sorties de fluide parfois proches les unes des autres conduit en fait à un patchwork d'habitats plus ou moins imbriqués. La capacité de décrire cette distribution à l'échelle de quelques mètres est largement facilitée par les outils actuels permettant de construire des mosaïques photographiques à partir d'acquisition d'images par ROV ou HOV, horizontalement (Marcon et al, 2013) ou verticalement (Cuvelier et al, 2012; Marsh et al, 2012).

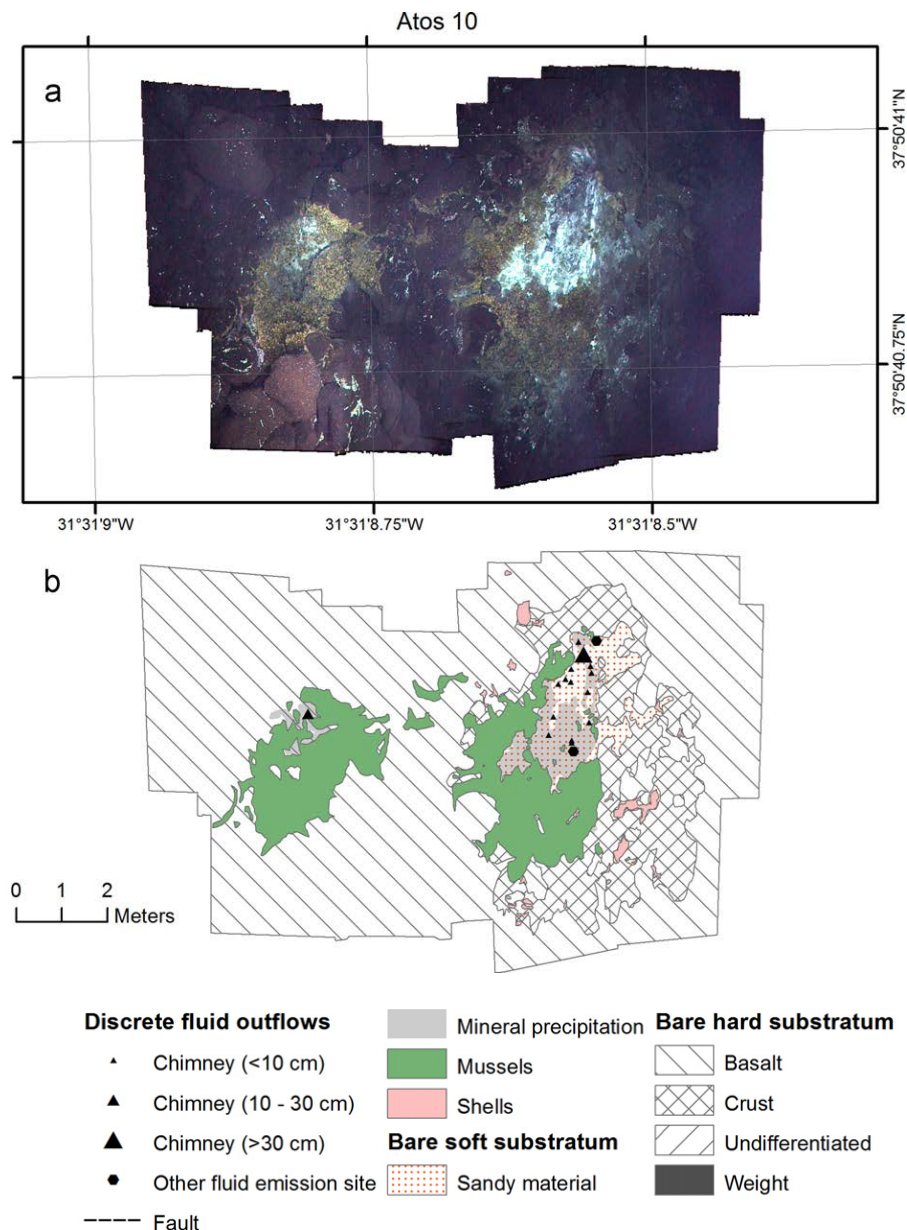


Figure 4-38 Mosaïque photographique du site ATOS 10 sur le champ hydrothermal Menez Gwen (Dorsale médio-atlantique) identifiant les sorties de fluides et la distribution des bivalves qui domine la mégafaune de cet habitat (Marcon et al, 2013).

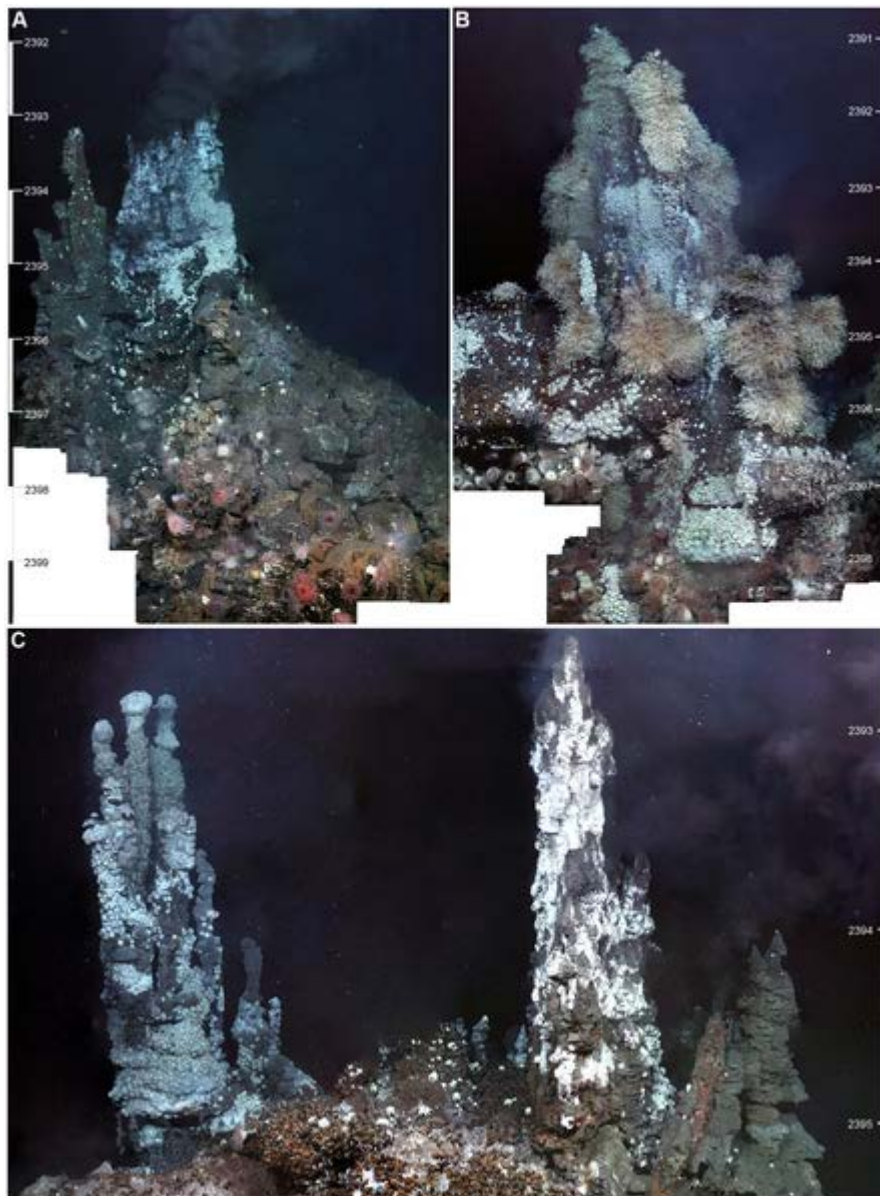


Figure 4-39 Mosaïques verticales d'assemblages de sources hydrothermales de la Scotia Ridge créées en utilisant des captures d'images de vidéos HD (Marsh et al, 2012).

L'hétérogénéité spatiale de l'habitat de substrat dur des champs de nodules est intrinsèque à la présence de ces sphères minérales qui constituent un substrat dur fragmenté reparti sur le sédiment meuble. La disponibilité de l'interface minéral-eau de mer rend cet habitat accessible à des espèces de substrats durs et notamment des éponges, ou des organismes unicellulaires, tels les foraminifères qui prédominent. La couverture moyenne des nodules est estimée à 10% pour deux régions du Pacifique (Mullineaux et al, 1987). Certaines études ont exploré le rôle de cette hétérogénéité sur la diversité des communautés, cette fois à des échelles inférieures au décimètre (Veillette et al, 2007). Ces auteurs montrent que le nombre d'espèces augmente de façon logarithmique avec la surface exposée des nodules.

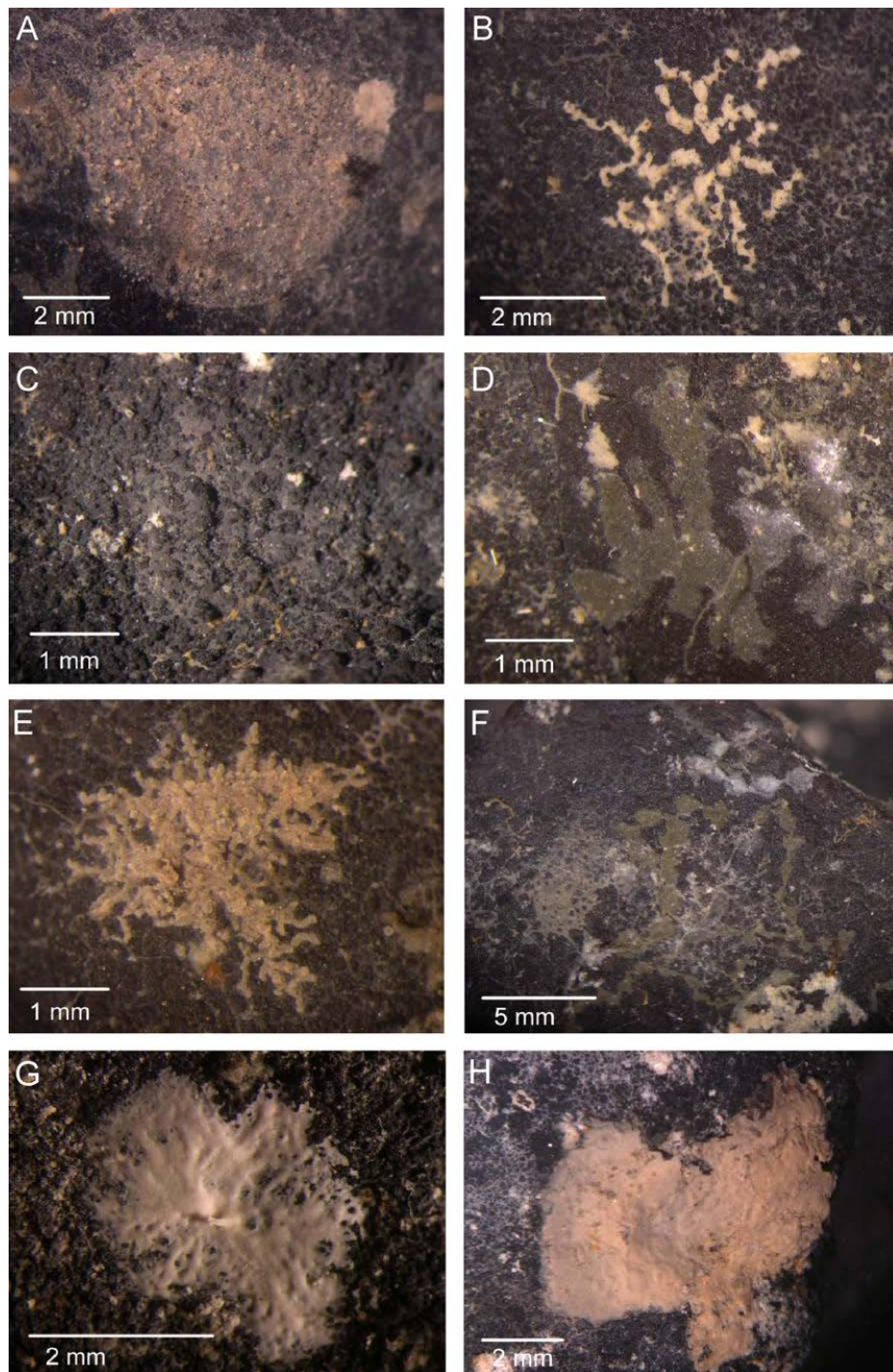


Figure 4-40 Foraminifères colonisant les parois des nodules (Veillette et al, 2007).

Les encroûtements de manganèse sont également colonisés par des foraminifères, mais avec des densités inférieures à celle des nodules (Verlaan, 1992). Les encroûtements sont localisés en particulier sur les monts sous-marins qui abritent une faune abondante de substrats durs. D'une manière générale, les habitats associés aux encroûtements sont caractérisés par l'hétérogénéité à multi-échelle de l'habitat des monts sous-marins, tant concernant le substrat que la présence d'habitat biogénique de type coraux ou gorgones (Rowden et al, 2010; Tracey et al, 2011).

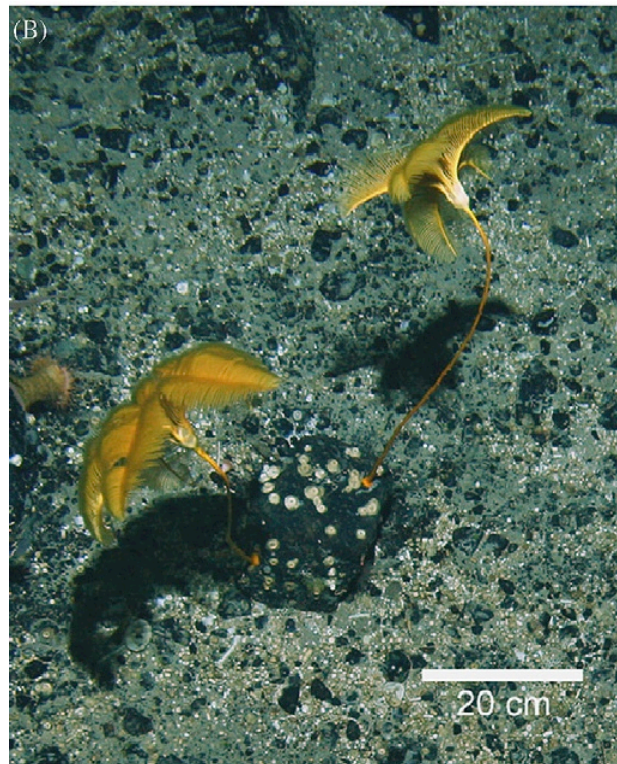


Figure 4-41 Crinoides de substrat dur découverts sur deux monts sous-marins Antarctique abritant des assemblages considérés comme des «fossiles vivants» (Bowden et al, 2011).

L'hétérogénéité de l'habitat est une caractéristique majeure, commune aux écosystèmes associés aux ressources minérales profondes. Cette hétérogénéité tient autant à l'imbrication de substrats durs (roches et minéraux constitutifs des ressources) et meubles (sédiments), qu'à la mosaïque de peuplements qui les caractérisent à différentes échelles spatiales. Les espèces dominantes elles-mêmes participent à la structuration de l'habitat. Cette fragmentation implique des approches à échelles multiples. Seuls des travaux in situ avec des engins submersibles peuvent appréhender cette hétérogénéité, que ce soit pour la cartographie par imagerie, l'échantillonnage des communautés biologiques ou l'étude expérimentale des processus écologiques, de l'échelle d'un champ de nodule ou d'un mont sous-marin, à l'échelle sub-centimétrique pour la faune, voir micrométrique pour les communautés microbiennes.

Propriétés chimiques des masses d'eau profondes

Les conditions chimiques des eaux océaniques profondes reflètent la circulation thermohaline globale et les processus de reminéralisation de la matière organique sous la couche photique de l'océan. Les masses d'eau dont le temps de résidence en grande profondeur est long ont des teneurs réduites en oxygène et plus élevées en nitrate. Les modèles globaux font apparaître des disparités importantes entre les eaux profondes des grands bassins océaniques, notamment dans l'hémisphère Nord, avec des eaux profondes riches en oxygène pour l'Atlantique et nettement appauvries pour le Pacifique (Figure 4-42).

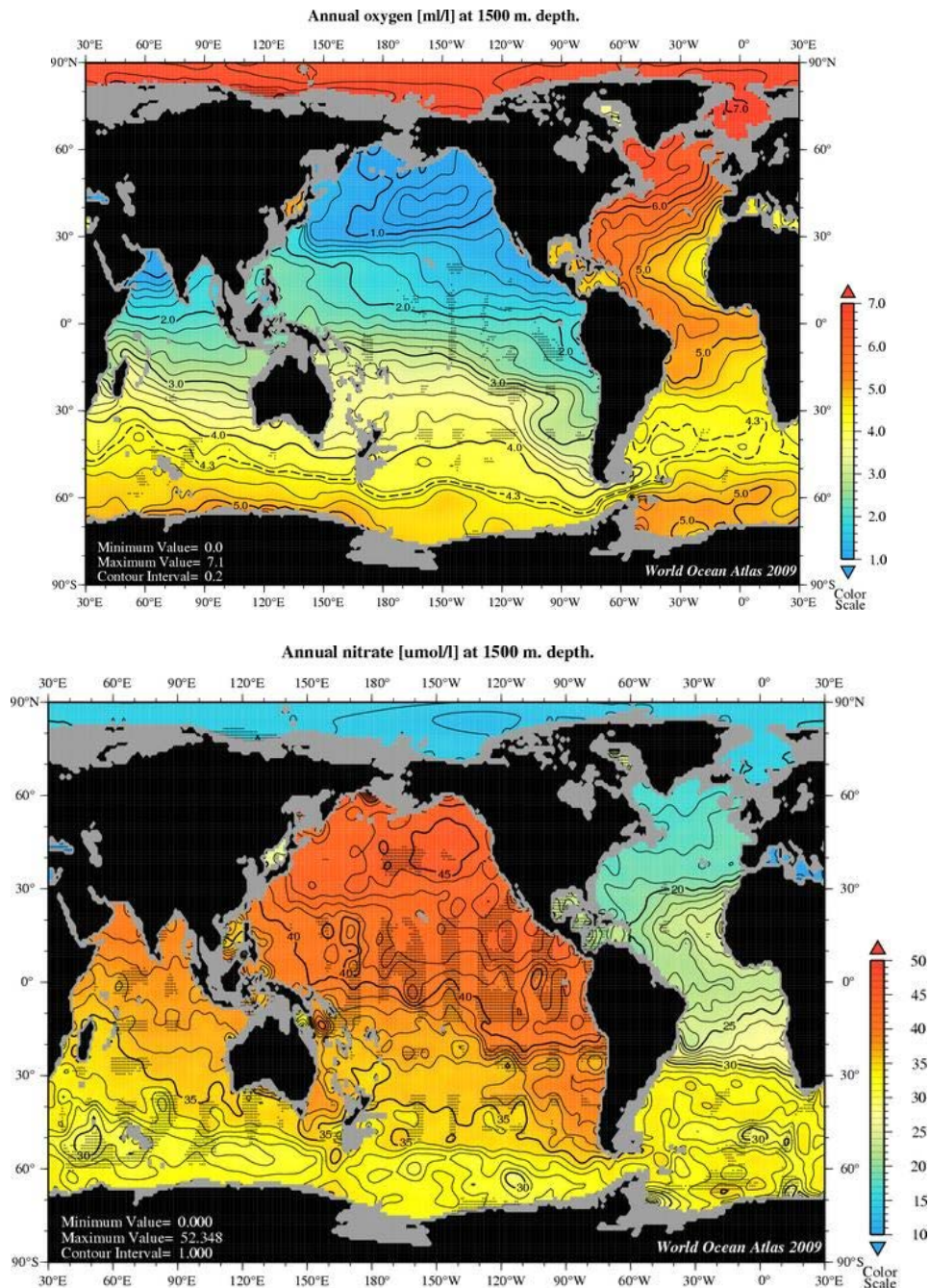


Figure 4-42 Concentrations annuelles moyennes d'oxygène et de nitrate dans l'océan global à 1500m de profondeur (Garcia et al, 2009; 2010).

Ces eaux profondes sont pauvres en métaux et de pH légèrement plus faible que celui des eaux de surface, du fait de la reminéralisation de la matière organique. Cette cartographie à grande échelle ne reflète cependant pas les minima d'oxygène qui peuvent être liés à des phénomènes locaux d'upwelling dans les régions à forte topographie et les anomalies correspondantes sur les concentrations de nutriments et de métaux. Même dans les zones de minimum d'oxygène, les eaux profondes ne contiennent pas de sulfure sous forme dissoute ou particulaire car les sulfures produits sont immédiatement consommés par les micro-organismes (Ulloa et al, 2012).

Propriétés des interfaces et cycles biogéochimiques

Les gradients chimiques à l'interface entre les sédiments et l'eau de mer sont une caractéristique générale des milieux sédimentaires, même en l'absence de migration de fluide (Shulz and Zabel, 2006). La profondeur de diffusion de l'oxygène dans les sédiments et sa disponibilité pour les micro-organismes et la faune varient selon l'importance de la matière organique enfouie. Comme pour l'oxygène, une zonation verticale est observée pour les composés oxydés (nitrates, sulfates, oxydes de fer ou de manganèse) et leurs formes réduites (ammonium, sulfure, Mn(II), Fe(II)). Ces gradients reflètent les transformations biogéochimiques de ces éléments dans les eaux interstitielles des sédiments. Les cycles du carbone, du soufre, du fer et du manganèse y sont étroitement liés et font intervenir des réactions abiotiques et l'utilisation des réactions d'oxydo-réduction par les micro-organismes.

Cette zonation biogéochimique décrite pour de nombreux types de sédiments marins, est encore peu documentée dans les environnements associés aux ressources minérales. Les environnements sédimentaires associés aux encroûtements cobaltifères et aux nodules ont aussi la particularité d'être riches en fer, ainsi qu'en manganèse, mais sous forme particulière d'oxydes enfouis dans les sédiments. Ces métaux peuvent intervenir dans les processus de diagenèse (dégradation de composés organiques) et leurs formes réduites dissoutes peuvent alors contribuer à la consommation d'oxygène dans les sédiments (Wang et al, 2010; Li Liao et al, 2011; Müller et al, 2010). Pour les champs de nodules la couche enrichie en métaux se limiterait aux premiers centimètres des sédiments (Koschinski et al, 2001). L'étude de Müller et coll. (2010) pour les sédiments du mont de sulfure TAG montrent que la zonation biogéochimique qui caractérise l'altération des sulfures minéraux ne se distingue pas significativement de ce qui est rencontré dans les couches sédimentaires.

Par rapport aux communautés microbiennes des cheminées hydrothermales actives, cependant, très peu d'informations sont actuellement disponibles sur la colonisation, la diversité, la structure ou encore l'activité des micro-organismes peuplant les sulfures hydrothermaux inactifs. Il est toutefois établi que les communautés des édifices hydrothermaux éteints sont très différentes de celles des édifices actifs (Sylvan et al, 2012; Toner et al, 2013; Suzuki et al, 2004; Kato et al, 2010). Il semble aussi que les communautés microbiennes des structures hydrothermales inactives soient impliquées, tout comme celles des cheminées hydrothermales actives, dans les cycles biogéochimiques du soufre, de l'azote et du fer (Sylvan et al, 2012) et que la minéralogie du site impacte l'établissement et la structure des communautés microbiennes (Toner et al, 2013). En accord avec les types microbiens dominants, le cycle du fer apparaît comme central dans les transformations biogéochimiques associées aux sulfures minéraux.

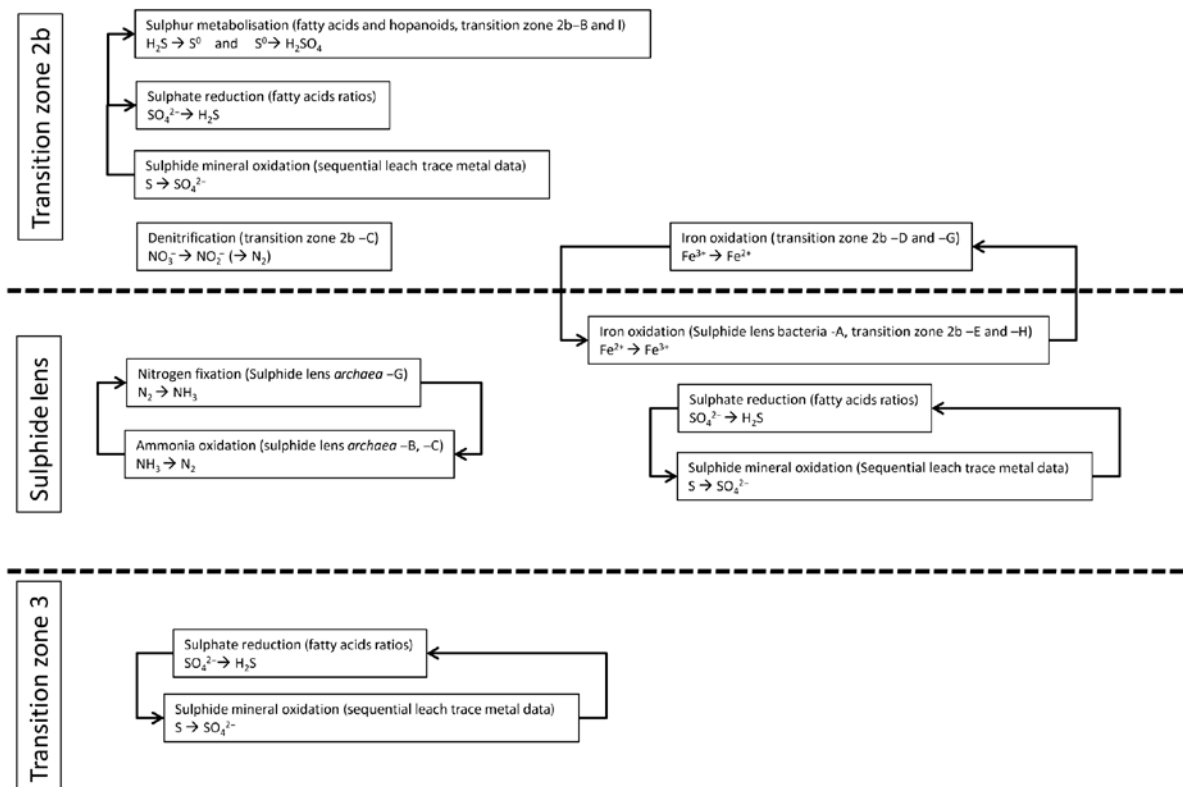


Figure 4-43 Schéma des différents métabolismes microbiens suggérés par l'analyse de la diversité microbienne et les propriétés géochimiques des sédiments du mont de soufre TAG (Müller et al, 2010).

Les recherches sur les habitats des sources hydrothermales se sont plus largement intéressées aux gradients thermiques et chimiques à petite échelle dans les panaches de sources diffuses, autour des assemblages de faune hydrothermale (< 1m) (Hessler and Kaharl, 1995; Sarrazin et al, 1997, Sarradin et al, 1998, Desbruyères et al, 2000; Bates et al, 2005; Schmidt et al, 2008; Podowski et al, 2009). Ces gradients qui reflètent le mélange du fluide hydrothermal et de l'eau de mer n'existent donc que sur les zones actives. **La température et les paramètres chimiques covarient dans les milieux hydrothermaux actifs. Ces gradients définissent des fenêtres environnementales étroites pour certaines espèces fondatrices qui jouent un rôle-clé dans l'établissement de la biodiversité de ces habitats.**

La définition de conditions d'habitats propices aux espèces hydrothermales se limite souvent à l'établissement de préférences thermiques, complété par l'analyse chimique de prélèvements de fluides dans l'environnement des organismes. Plus rarement, des mesures chimiques *in situ* sont réalisées à partir de submersibles grâce à des sondes électrochimiques ou des analyseurs immergeables. La résolution centimétrique des mesures *in situ* permet de définir précisément les contours de l'habitat. Des cartographies de distribution de la faune, combinées à ces gradients physico-chimiques, ont pu être établies (Podowski et al, 2009, Sarrazin et al, 1999; Cuvelier et al, 2012) et complètent celles obtenues à partir de simples mesures de température (Hessler and Smithey, 1983; Sarradin et al, 1998, Bates et al, 2005).

La connaissance des processus biogéochimiques dans cette interface fluide-eau de mer est surtout considérée au regard de la disponibilité de l'énergie pour les micro-organismes qui fixent le CO₂ en biomasse (voir ci-après). La combinaison des cycles du carbone, de l'azote, du soufre, du fer et du manganèse dans les systèmes aquatiques (Falkowski et al, 2008) ne diffère pas fondamentalement de celle qui s'opère dans les sédiments, à l'exception du transport des composés réduits et oxydants. La circulation hydrothermale favorise ces processus, par la transformation des sulfates de l'eau de mer en sulfure et la remobilisation de

métaux sous forme réduite à partir des roches. Ces composés sont ensuite réinjectés sur le plancher océanique (Holden et al, 2012; Orcutt et al, 2011). Le soufre y est présent sous différents degrés d'oxydation et les micro-organismes participent largement aux processus d'oxydation et de réduction impliquant cet élément (Sievert et al, 2008). Lorsqu'ils sont enrichis dans les fluides, d'autres composés réduits, tels que le fer, le méthane ou l'hydrogène, sont utilisés comme sources d'énergie par les micro-organismes (cf. 4.3.3.1, Callac, 2013).

Enrichissement de l'habitat en métaux et processus de biominéralisation

L'exposition aux métaux est une caractéristique principale des environnements associés aux ressources minérales, même si les gammes de concentration sont fortement variables d'un habitat à l'autre. Ces métaux sont issus des processus d'altération abiotique de la croûte océanique par l'eau de mer comme dans le cas des sulfures hydrothermaux (Staudigel and Hart, 1983; Wheat and Mottl, 2000) ou de l'accumulation à long terme de métaux dissous dans l'eau de mer, comme dans le cas des nodules et des encroûtements (Wang and Müller, 2009). Certains minéraux de la croûte océanique, tels que les basaltes, peuvent également être altérés à basse température par les organismes et libérer du fer ferreux et d'autres métaux (Bach and Edwards, 2003; Rouxel et al, 2003). Les processus de reminéralisation sur le plancher océanique sont de nature purement abiotique lorsqu'ils se produisent à haute température dans les cheminées hydrothermales, mais ils peuvent aussi impliquer des processus microbiens dès que les températures sont plus compatibles avec le vivant.

L'hypothèse formulée dès les années 1960 et 1970 est que les nodules sont formés de minéraux à la fois abiogéniques et biogéniques (Ehrlich, 1963; Ehrlich, 1968; Greenslate, 1974). Les outils actuels d'imagerie en microscopie montrent que chaque nodule est lui-même constitué de plusieurs micronodules (Figure 4-44). Les micronodules sont des structures de petite taille (de 100 à 450 μm) qui sont assemblés par une matrice blanchâtre qui remplit les interstices entre les micronodules. Dans ces micronodules, une importante densité de structures semblables à des micro-organismes (morphotypes coque et bâtonnet) a été détectée (Figure 4-44) (Wang et al, 2009; Wang and Müller, 2009). Les micro-organismes adhérant à des grains de sable ou d'argile, formeraient les sites de nucléation ou « bio-seed » à l'origine de la formation des micronodules (Figure 4-44) (Wang and Müller, 2009).

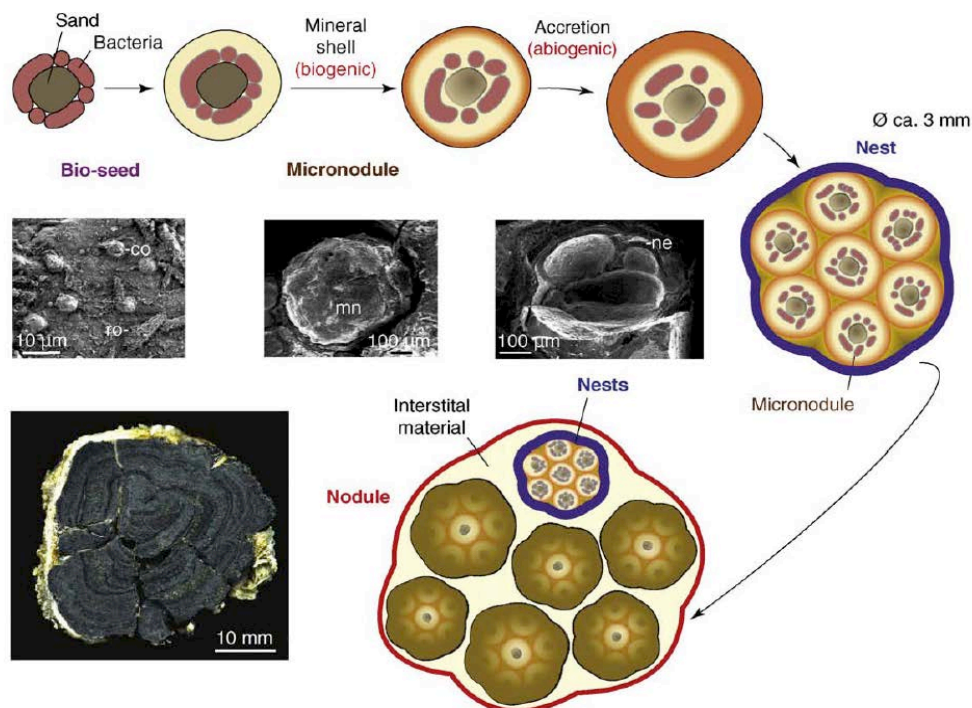


Figure 4-44 Schéma de la formation de nodules polymétalliques à partir de micronodules (Wang and Müller, 2009).

Les photographies réalisées en microscopie électronique à transmission en haute résolution illustrent, de gauche à droite : des 'noyaux' formés à partir de bactéries (bâtonnet [ro] et coques [co]); micronodules (mn), et un nid (ne). La photo en microscopie optique montre une section transversale de nodule.

Les nodules seraient ainsi formés lors des mouvements de rotation induits notamment par les courants sur les fonds marins, permettant l'incorporation de métaux par voie abiotique et microbienne. Il semblerait aussi que les micro-organismes puissent constituer une matrice de bio-minéralisation *via* l'action d'une enzyme qui permettrait l'oxydation du Mn(II) en Mn(IV) insoluble (Wang et al, 2009) (Figure 4-45).

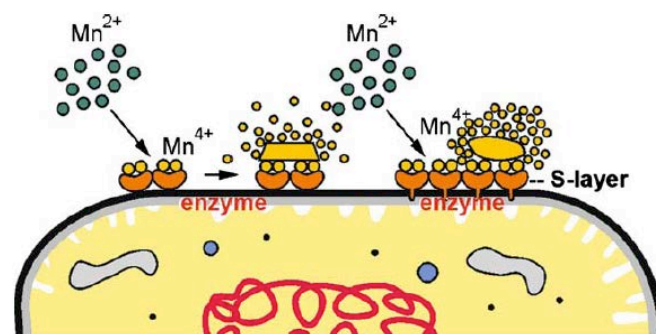


Figure 4-45 Schéma proposant la formation d'un dépôt minéral d'origine biogénique sur la surface des micro-organismes (Wang et al, 2009).

La couche de surface ainsi formée pourrait être à l'origine de la croissance des nodules, en favorisant l'oxydation enzymatique du Mn(II) en Mn(IV) insoluble, à la base du processus de minéralisation. Des travaux futurs portant, notamment, sur les biofilms microbiens endolithiques des zones riches en manganèse, et sur le rôle et les fonctions des micro-organismes associés aux nodules restent à mener pour confirmer l'origine biologique des nodules polymétalliques (Wang et al, 2009; Wang et al, 2009).

Les processus abiotiques de précipitation et d'oxydation lors du mélange fluide hydrothermal-eau de mer qui conduisent à la formation de composés insolubles de sulfures de fer, de cuivre et de zinc à haute température dans les systèmes hydrothermaux actifs est décrite au chapitre 2 et n'est pas reprise ici. **La totalité des métaux transportés par le fluide n'est pas immobilisée par ces processus de précipitation. Les études sur les panaches hydrothermaux nous renseignent sur le devenir des métaux dans les masses d'eau océaniques.** Les conditions qui permettent ce piégeage sous forme particulaire ou au contraire le transport de ces métaux sous forme de colloïdes organiques (Toner et al, 2012) ou de nanoparticules de sulfure (Yücel et al, 2010) dépendent des transformations chimiques dans les panaches hydrothermaux (Breier et al, 2012; Statham et al, 2005; Feely et al, 1991; Bennett et al, 2008). Les conditions environnementales telles que le pH et l'oxygénation du milieu et la présence de macromolécules organiques contrôlent la formation de précipités d'oxyhydroxydes de fer (Bennett et al, 2008; Sander and Koschinsky, 2011; Toner et al, 2012), qui conditionne à son tour le partitionnement d'autres métaux entre formes minérales (qui sédimentent près des sources) et formes dissoutes ou colloïdales (transportables sur de plus grandes distances).

Dans les habitats hydrothermaux actifs, les teneurs et la biodisponibilité des métaux sont très variables (Desbruyères et al, 1998; Kadar et al, 2005; Sarradin et al, 2009). Les concentrations en fer dissous dans les fluides varient fortement et peuvent être utilisées pour comparer l'exposition aux métaux d'une espèce, même sur différents sites (Le Bris and Gaill, 2007). A l'échelle d'un site, Sarradin et coll. (2008) montrent que la concentration en fer particulaire peut aussi être utilisée comme traceur de l'exposition au cadmium et au plomb particulaire. Ces auteurs soulignent également l'enrichissement relatif de l'habitat de la faune sur une cheminée de la dorsale Atlantique, suggérant un processus de concentration locale de ces métaux par rapport aux prédictions d'un simple gradient de dilution.

La question qui se pose, si l'on cherche à mieux cerner la toxicité du milieu, est la distribution des métaux lourds entre fraction particulaire et dissoute, cette dernière étant supposée plus toxique même si l'ingestion de particules peut aussi conduire à une accumulation dans les tissus (Geret et al, 2002; Kadar et al, 2006; Sarradin et al, 2009). Comme dans les panaches des fumeurs noirs, les processus de remobilisation des métaux dans l'habitat de la faune font intervenir des processus chimiques et microbiens qui ne sont pas spécifiques aux milieux étudiés, sauf pour ce qui concerne la diversité des micro-organismes impliqués (Callac, 2013), (4.3.3.1). On manque cependant encore d'une vision synthétique des processus associés aux métaux dans ces environnements.

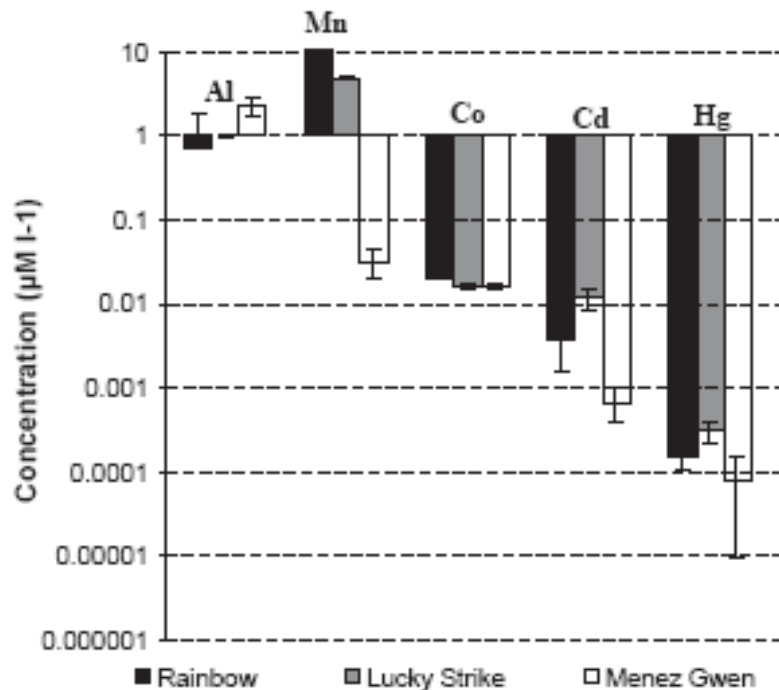


Figure 4-46 Concentrations en métaux dans l'environnement de la faune hydrothermale sur trois sites de la dorsale médio-atlantique (Kadar et al, 2005).

Indépendamment de sa nature chimique, la **charge particulaire élevée du milieu ambiant**, conséquence des processus de précipitations qui s'y produisent, paraît aussi constituer une contrainte importante pour les communautés biologiques, par les effets physiques néfastes qu'elle exerce sur les animaux filtreurs (Desbruyères et al, 2000). Ce type de contrainte naturelle n'existe pas *a priori* sur les champs de nodules. Des charges particulaires plus importantes que dans les eaux profondes sont décrites autour des monts sous-marins sans toutefois être comparable en composition et en densité à celles des panaches hydrothermaux (sauf si des événements de transport sédimentaire de type turbidites ou cascading sont localement rencontrés comme c'est le cas sur certaines marges continentales).

Diversité des sources d'énergie alimentant l'écosystème

D'une manière générale, la notion d'habitat dans ces milieux de grande profondeur doit être appréciée relativement aux **sources d'énergies disponibles** qui diffèrent radicalement de celles accessibles dans les couches de surface de l'océan et les milieux littoraux peu profonds où la photosynthèse est à la base des transferts d'énergie. Les environnements abyssaux sont considérés comme oligotrophes (pauvres en énergie), puisque seul un faible pourcentage de la matière produite en surface atteint ces profondeurs (McClain, 2010; Etter and Mullineaux, 2001). On sait cependant que certains points chauds («hot-spots») concentrent des biomasses abondantes, tels que les écosystèmes chimiosynthétiques et ceux associés à des accumulations de matière organique.

Orcutt et coll. (2011) identifient la **chimiosynthèse** autotrophe comme une source d'énergie alternative dans toutes les régions obscures de l'océan. Les micro-organismes chimioautotrophes sont en effet capables d'utiliser l'énergie libérée par l'oxydation d'un élément chimique (donneurs d'électron) sous forme réduite par un oxydant (accepteur d'électron) présent sous forme dissoute dans l'eau de mer comme l'oxygène, nitrate, sulfate,

ou sous forme solide et colloïdale dans les sédiments et les panaches de particules (oxydes de fer, de manganèse, ...). Les micro-organismes, bactéries ou archées, exploitent ainsi les propriétés de déséquilibres chimiques créés par le contact de fluides de propriétés différentes (Jannasch, 1995, Takai and Nakamura 2007). La disponibilité de composés chimiques permettant cette production de matière organique nouvelle à partir du carbone inorganique dissous (carbonates) pour former de la biomasse dépend donc directement des conditions chimiques locales de l'environnement (Figure 4-47).

De nombreux travaux de modélisation ont cherché à caractériser la diversité des habitats pouvant soutenir différents métabolismes microbiens capable de fixer le CO₂ en comparant l'énergie nécessaire pour leur croissance (Amend et al, 2011) à celle disponible dans l'environnement. Différents modèles ont ainsi été établis dans les cheminées hydrothermales (McCollom and Shock, 1997; Tivey 1995 et 2004), dans les panaches de fumeurs noirs (McCollom, 2000) et la zone de mélange des zones de diffusion hydrothermale (Schmidt et al, 2008; McCollom 2007; Takai and Nakamura, 2011). Les gradients chimiques modélisés au sein des cheminées hydrothermales s'accordent avec l'extrême diversité métabolique des micro-organismes hydrothermaux, bactéries ou archées, qu'ils soient impliqués dans des symbioses ou formant des mattes libres, même à l'échelle d'une simple cheminée hydrothermale. En accord avec les calculs des géochimistes, les espèces réduites du soufre, sulfures principalement, le méthane et l'hydrogène apparaissent comme les principaux donneurs d'électrons utilisés pour la chimiosynthèse. La diversité des micro-organismes associés aux sources hydrothermales actives décrite au 4.3.3.1 reflète cette disponibilité de ces composés réducteurs. Les métaux et en particulier le fer ferreux, lorsqu'il est présent en abondance, constituent également une source d'énergie utilisée par certains micro-organismes (De Angelis et al, 1991; Emerson and Moyer, 2002; Jeanthon, 2000; Edwards et al, 2003). Compte-tenu de la variabilité des fluides, des conditions de mélange, et de la gamme extraordinairement large de température et de sources d'énergie disponibles, les habitats hydrothermaux sont considérés comme ayant favorisé le développement de nombreuses lignées de *Bacteria* et d'*Archaea* (Takai and Nakamura, 2011).

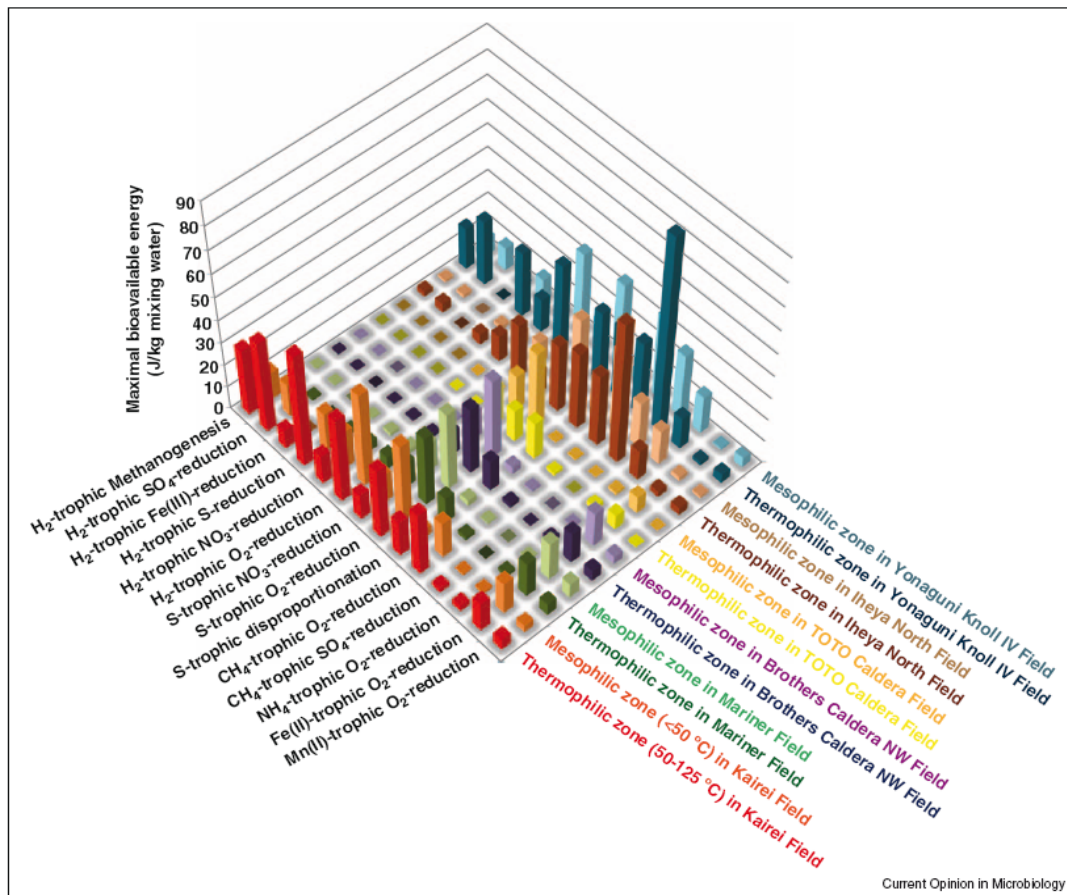


Figure 4-47 Energie disponible pour différents métabolismes microbien chimiolithoautotrophes dans différents habitats de six champs hydrothermaux de l'arc des Mariannes (Takai et Nakamura 2011).

Dans les environnements associés aux dépôts sulfurés inactifs, les sédiments des champs de nodules ou des encroûtements de manganèse, les composés réduits sont présents sous forme solide d'oxydes ou de sulfures métalliques. Peu d'études sont encore disponibles pour caractériser la diversité des communautés microbiennes propres à ces habitats mais leur proximité avec celles des cheminées hydrothermales, du plancher basaltique, des sédiments hydrothermaux ou des profondeurs de la croûte fracturée est probable, comme le soulignent plusieurs revues récentes (Orcutt et al, 2011; Edwards et al 2011). L'analyse de la diversité microbienne des sédiments d'une région où les encroûtements de manganèse sont abondants suggère aussi que la chimiosynthèse basée sur l'oxydation des métaux et sur la chimie du soufre reste une composante importante de l'écosystème (Liao et al, 2011). Selon ces auteurs, le recouvrement entre les communautés bactériennes de la croûte océanique (dorsales) et celles des sédiments riches en Mn et Co des champs de nodules et d'encroûtements suggère que des processus similaires sont mis en jeu. Les champs de nodules à très grande profondeur sont, eux, dépourvus de sources d'énergie majeures, relativement aux autres types d'écosystèmes concernés. Cependant, des conditions énergétiquement plus favorables que dans les plaines abyssales adjacentes, telles que la présence de composés chimiques sous forme réduite (nodules eux même ou dans les sédiments associés), et l'hydrodynamique locale (rugosité du fond liée à la présence des nodules) sont aussi évoquées.

L'importance relative de la chimiosynthèse et des apports de matière d'origine photosynthétique varie des masses d'eaux profondes aux plaines abyssales, en passant par les marges continentales et les flancs de dorsales. Bach et coll. (2006) ont proposé une classification des différents types d'écosystèmes selon l'importance des apports de surface

(production allochtone de matière organique photosynthétique) ou de la production locale (production locale de carbone organique chimioautotrophe) (Figure 4-48).

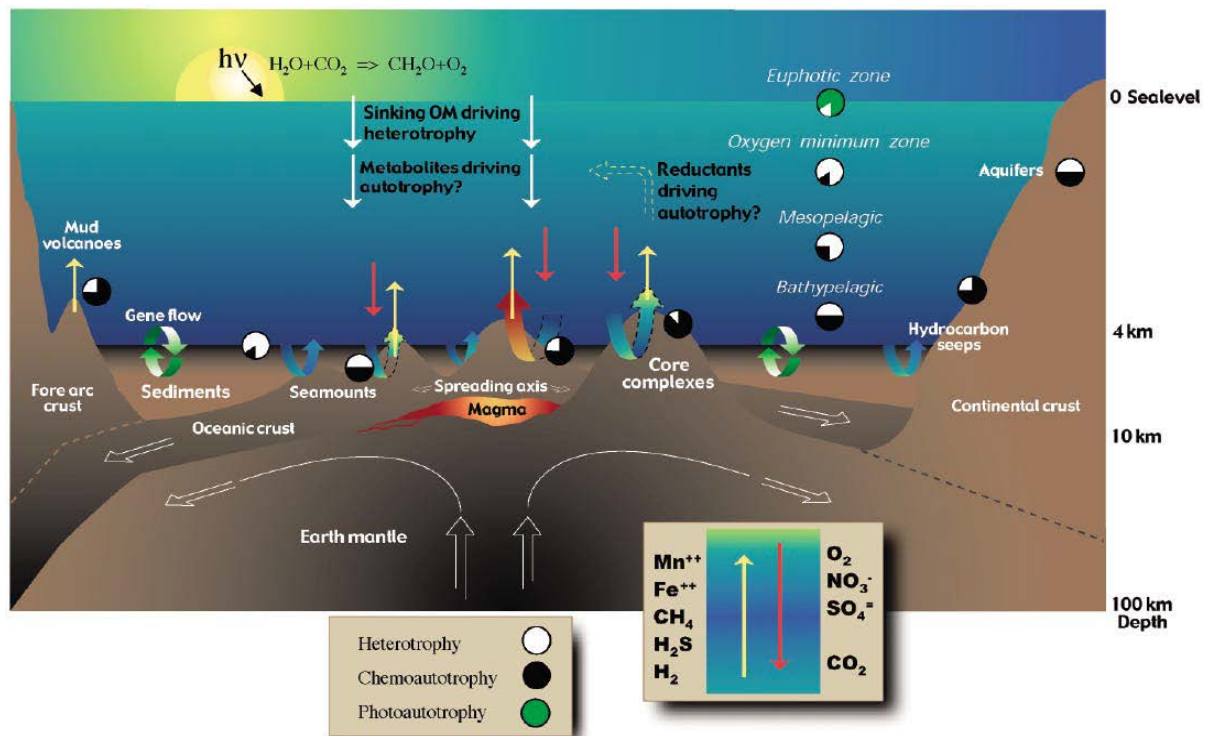


Figure 4-48 Représentation des sources d'énergie disponibles dans des différents types d'écosystèmes océaniques de grande profondeur (Bach et al, 2006).

Dans ce schéma général, les 'hot-spots' que constituent certains monts sous-marins se distinguent car ils concentrent les ressources d'une façon différente, sous forme de matière organique produite en surface par photosynthèse qui se dépose sur le fond. Les bois et substrats végétaux accumulés sont eux aussi le support de communautés diversifiées et de densités d'organismes importantes. Dans tous les cas, la dégradation de la matière organique, quelle que soit sa nature et son origine, constitue une voie importante de transfert d'énergie dans l'écosystème (cf. paragraphe réseaux trophiques). Ces apports sont sporadiques sur les plaines abyssales, mais peuvent être particulièrement abondants sur les marges continentales et les arcs volcaniques, notamment dans les zones tropicales, où ils s'accumulent dans certaines structures topographiques tels que les canyons (De Leo et al, 2010) ou les flancs des monts sous-marins (Rowden et al, 2010).

Disponibilité d'habitats de nature différente pour les espèces chimiosynthétiques

L'une des questions qui restent peu explorées concerne les relations entre des écosystèmes profonds de nature différente mais offrant des sources d'énergie comparables, et notamment la capacité de certains environnements à jouer le rôle d'habitats intermédiaires dans la dispersion de la faune (Bernardino et al, 2012; Levin et al, 2012). Les relations à l'échelle régionale entre sources hydrothermales et écosystèmes des suintements froids ont été soulignées en particulier dans le Pacifique Ouest (Watanabe, 2010) et la marge du Costa Rica (Levin et al, 2012) ou entre systèmes hydrothermaux à l'axe des dorsales et ceux liés aux contextes de serpentinsation, potentiellement plus dispersés sur les fonds marins (Lartaud et al, 2011).

Les substrats organiques massifs, tels que les bois ou les carcasses de baleine, sont surtout considérés comme des ‘étapes intermédiaires’ ou ‘stepping stones’ dans l’évolution de la faune symbiotique profonde et l’acquisition d’un mode de vie chimiosynthétique. Des travaux récents montrent cependant qu’ils peuvent jouer le rôle d’habitat pour des espèces chimiosynthétiques des sources hydrothermales ou de méthane. Ces substrats sont en effet colonisés par certaines espèces chimiosynthétiques (Distel et al, 2000; Gaudron et al, 2010) qui exploitent des conditions réductrices riches en sulfure (Yücel et al, 2013; Bienhold et al, 2013). La variabilité des sources d’énergie, composés organiques issus de la photosynthèse ou composés inorganiques pour la chimiosynthèse, offre une large gamme d’habitats auxquels certaines espèces et les communautés profondes sont spécifiquement adaptées (Levin et al, 2010). Ces différentes sources d’énergie constituent l’une des caractéristiques majeures de l’hétérogénéité des habitats profonds et, par voie de conséquence, de la grande diversité biologique des marges continentales où peuvent être rencontrés différents types d’écosystèmes.

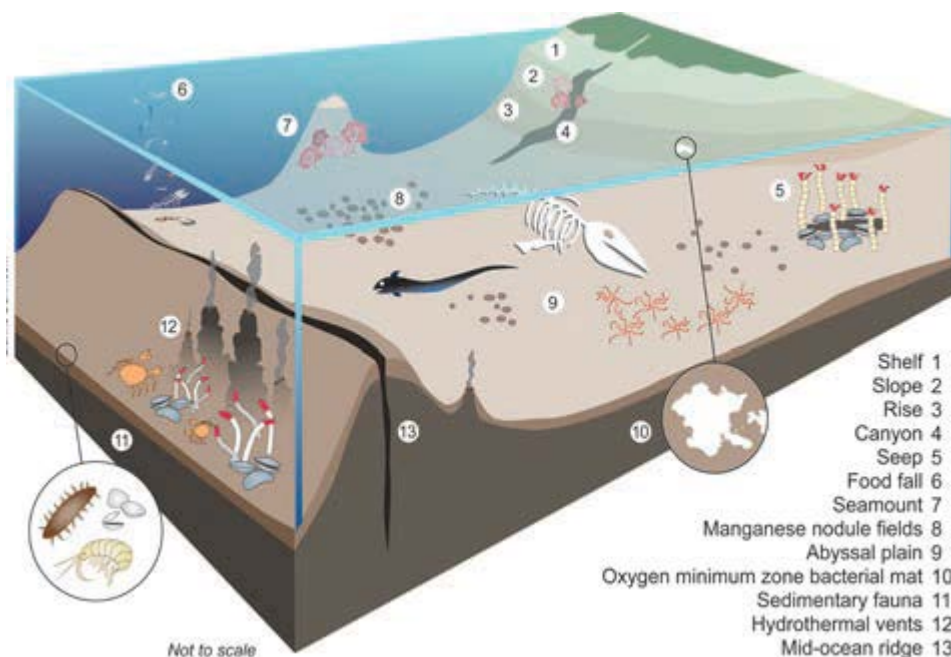


Figure 4-49 Ecosystèmes ‘hot-spots’ sur les fonds marins de grande profondeur. *Census of Marine Life 2010.*

Les écosystèmes associés aux ressources minérales profondes sont le siège de transformations biogéochimiques importantes, qui les distinguent des milieux abyssaux classiques. Alors que les masses d’eau profondes sont oligotrophes et homogènes chimiquement sur des très larges échelles, les environnements associés aux ressources minérales offrent des ressources énergétiques variées qui permettent à des communautés faunistiques et microbiennes spécialisées de s’établir. Dans ces habitats benthiques où des gradients physico-chimiques marqués favorisent les échanges d’électrons entre composés réduits et oxydants, une production de biomasse chimiosynthétique est possible par fixation de CO₂ à partir de composés inorganiques. A l’échelle de l’écosystème, des interactions étroites sont ainsi établies entre micro-organismes chimioautotrophes et une variété de substrats minéraux (dissous ou précipités) sous l’influence d’espèces animales ingénieuses qui jouent un rôle majeur dans les transferts d’énergie au sein de l’écosystème. Ce rôle de la chimiosynthèse microbienne ne se limite pas aux communautés spécialisées et fortement productives des zones hydrothermales actives, mais concerne également les zones de nodules, encroûtements et sulfures via les processus d’oxydoréduction des métaux et des

sulfures minéraux. La libération de métaux et leur biodisponibilité dans l'environnement est une conséquence des couplages entre production, dégradation de matière organique et processus d'oxydo-réduction des métaux. D'autres types d'habitats 'chimiosynthétiques' existent et jouent un rôle comme habitats relais dans la dispersion de certaines espèces communes à grande échelle mais ce rôle n'est pas établi pour les espèces-clés endémiques des écosystèmes concernés par l'exploitation des ressources.

4.4.1.2. Stabilité des habitats

D'une manière générale, la question de la dynamique temporelle des environnements profonds associés aux ressources minérales est la moins bien maîtrisée. Glover et coll. (2010) ont tenté une première synthèse des connaissances sur des sites différents ayant bénéficié d'un suivi à long terme (Figure 4-50). Aucun de ces environnements, bathyaux ou abyssaux, n'est associé à des ressources minérales potentiellement exploitables, mais les processus fondamentaux mis en évidence sont potentiellement applicables aux environnements sédimentaires impactés par les activités minières, et plus particulièrement les champs de nodules.

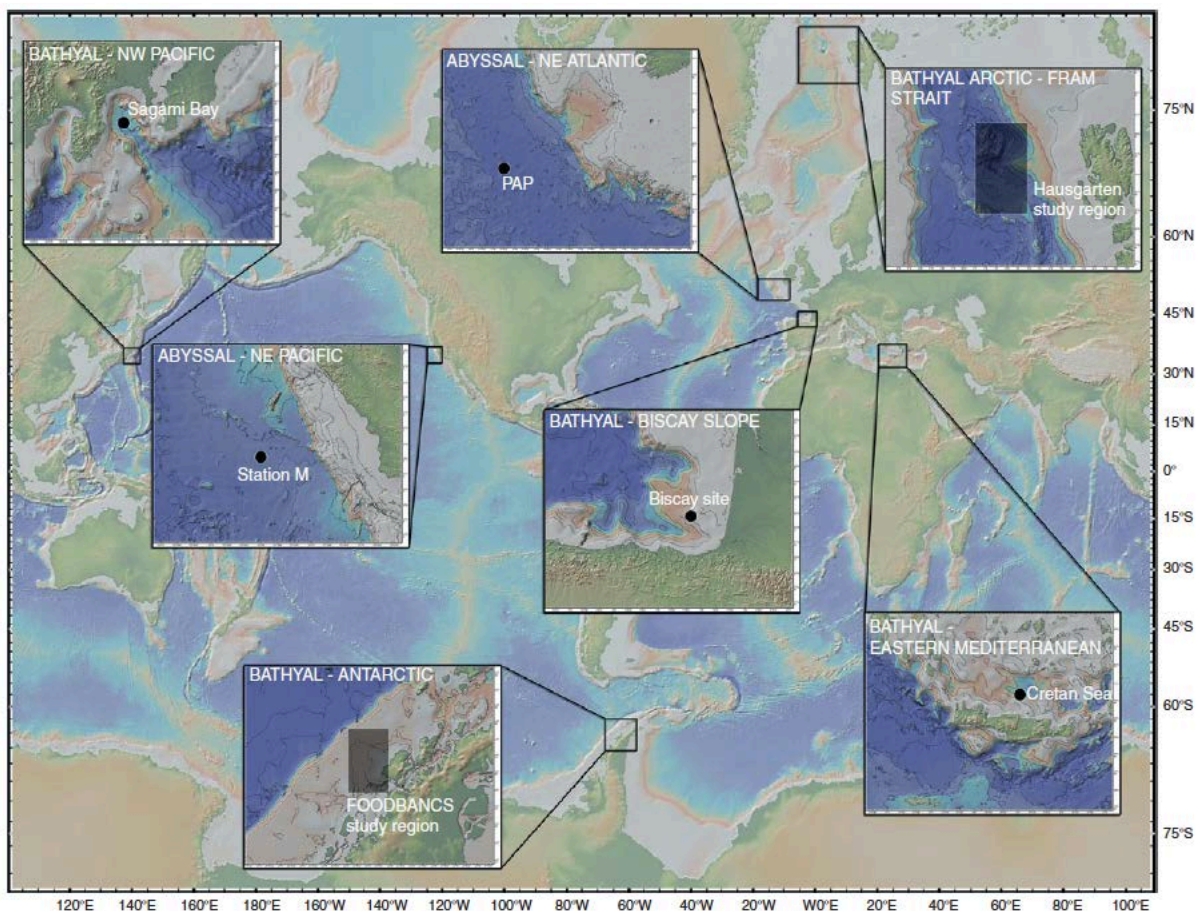


Figure 4-50 Sites profonds ayant fait l'objet d'un suivi temporel de l'écosystème à long terme (Glover et al, 2010).

Les échelles temporelles caractéristiques diffèrent nettement entre sulfures minéraux, croûtes de manganèse ou nodules, tant pour la formation d'habitats spécifiques que la recolonisation des deux compartiments, substrats durs ou meubles, qui les composent. Il est important de souligner les différences fondamentales entre les environnements ciblés par les

activités minières, et la spécificité des sulfures sur le plan de la dynamique temporelle des habitats par rapport aux autres environnements. Pour les sulfures, les zones actives sont caractérisées par une croissance rapide (plusieurs centimètres par jours dans certains cas) et un turn-over important des cheminées actives et inactives à l'échelle d'un champ hydrothermal sur la dizaine d'années (Tivey, 2007). Les zones inactives sont par définition non régénérables puisqu'il n'y a plus de sulfures et de métaux transportés par les fluides. La minéralisation des encroûtements de manganèse et des nodules est très lente (quelques millimètres par millions d'années (Wang and Müller, 2009), et même si ce processus de biominéralisation se poursuit après l'élimination d'une partie des minéraux qui composent ces substrats, aucune régénération aux échelles temporelles caractéristiques des écosystèmes ne peut être considérée.

Des perturbations naturelles des conditions environnementales peuvent entraîner des impacts significatifs sur la structure des communautés, comme l'ont montré les différentes études temporelles réalisées en milieu hydrothermal (Shank et al, 1998). Les événements sismiques et volcaniques et l'obstruction des conduits par des processus d'accrétion peuvent entraîner des modifications, voire même la cessation, des émissions sur un site (Fustec et al, 1988; Gaill and Hunt, 1991, Tunnicliffe, 1992b; Juniper and Tunnicliffe, 1997) et provoquer des changements, voire même l'extinction locale des communautés (Hessler et al, 1985; Tunnicliffe, 1992; Haymon et al, 1993; Sarrazin et al, 1997; Desbruyères and Segonzac, 1997).

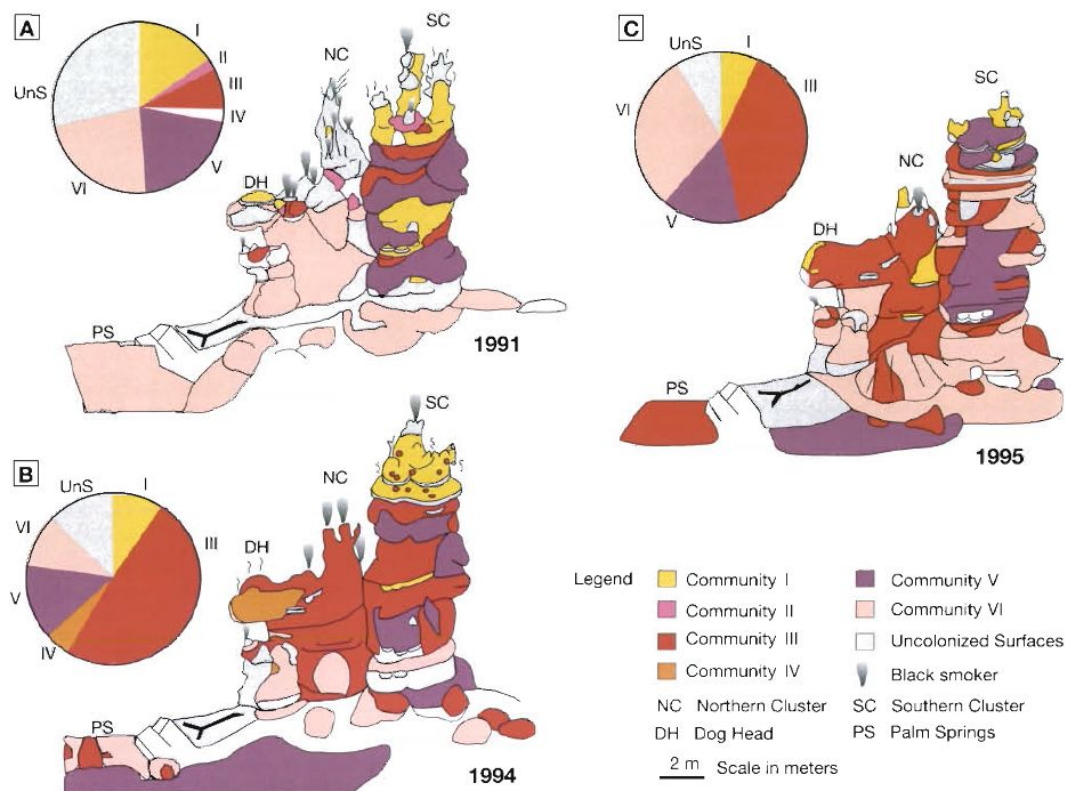
Les éruptions volcaniques sur le plancher océanique ont été observées sur des échelles décennales pour certains champs hydrothermaux (Fornari et al, 2012). Le processus de recolonisation commence par le développement de grandes étendues d'émissions diffuses et la colonisation par des tapis microbiens (Shank et al, 1998). Quelques mois après l'événement catastrophique, les invertébrés benthiques colonisent le site. La réinstallation des différentes espèces se produit au cours des 5 à 6 années suivant l'éruption (Shank et al, 1998; Marcus et al, 2009), créant une mosaïque dynamique d'assemblages à différents stades de succession (Desbruyères and Segonzac, 1997, Shank et al, 1998; Tsurumi and Tunnicliffe, 2001; Stecher et al, 2002).

Même en dehors des éruptions volcaniques qui provoquent l'éradication puis la recolonisation des habitats nouvellement formés (Shank et al, 1998), des modifications majeures à l'échelle décennale sont observées, comme le montrent Gebruk et coll. (2010) sur le champ hydrothermal Logatchev (dorsale médio-atlantique). Ces auteurs soulignent en particulier l'extinction de la population de clams, probablement liée à un glissement de sédiment.

Des successions d'espèces dominantes ont été décrites pour plusieurs communautés hydrothermales en relation avec des facteurs multiples, biotiques et abiotiques (Hessler et al, 1985 et 1988; Desbruyères, 1998; Tunnicliffe et al, 1997; Sarrazin et al, 1997 et 1999, Shank et al, 1998; Sarrazin and Juniper, 1999; Mullineaux et al, 2000; Tsurumi and Tunnicliffe, 2001).

Les processus géochimiques, comme la croissance des édifices ou la redirection des fluides hydrothermaux, peuvent contribuer à augmenter l'hétérogénéité de l'habitat, favoriser la colonisation et par ce fait même, la diversité (Tunnicliffe and Juniper, 1990; Sarrazin et al, 1997; Jollivet, 1993; Pradillon et al, 2010). Les sites en baisse d'activité peuvent être caractérisés par une richesse spécifique plus élevée, la présence de moins d'espèces endémiques au profit d'un plus grand nombre d'espèces abyssales, ainsi que par de plus faibles densités (Tsurumi, 2001). Même sans événement majeur, la composition des communautés est variable dans le temps et se modifie au gré des changements de régime de flux, à des échelles variant de la semaine au mois (Sarrazin et al, 1997). Ces observations sur les structures hydrothermales actives ont permis le développement d'un modèle où la

composition des assemblages de faune se modifie en réponse aux changements de l'habitat (Sarrazin et al, 1997 et 2002) (Figure 4-51).



Les études qui ont porté sur la dynamique de sites montrent que d'autres facteurs, comme les changements à court terme des facteurs abiotiques ainsi que les interactions biotiques, jouent un rôle sur la structure des assemblages. Cependant, ces facteurs sont difficiles à quantifier et leur contribution relative est difficile à mettre en évidence. L'historique de colonisation et les variations environnementales impriment leur influence sur la structure et la succession des communautés (Mullineaux et al, 2009). A l'exception de quelques sites d'observation à long terme où les communautés sont suivies dans le temps sur des espaces relativement réduits (quelques dizaines de mètres carrés), et qui sont situés principalement sur les zones hydrothermales actives, les suivis temporels en milieu profond sont rares. En dehors de ces observatoires, la plupart des suivis et travaux expérimentaux sont fortement contraints par l'accessibilité par des engins submersibles, au mieux lors de visites annuelles sur des sites ateliers.

L'étude expérimentale de la recolonisation d'habitats naturellement perturbés par des éruptions volcaniques sur l'écosystème hydrothermal du champ 9°50'N sur la dorsale Est-Pacifique a permis de mieux cerner les processus à l'œuvre dans la succession des espèces sur les champs hydrothermaux impactés. Mullineaux et al, (2010; 2012) montrent ainsi que plus encore que la variabilité chimique des fluides dans le temps, c'est la disponibilité à l'échelle régionale d'un pool d'espèce à l'état larvaire qui contrôle la diversité des communautés qui peuvent se réinstaller. La récurrence de perturbations naturelles apparaît ainsi comme un facteur de maintien de la diversité dans cet écosystème en permettant à certaines espèces pionnières rarement observées de coloniser l'habitat avant d'être supplantées par des espèces plus communes.

4.4.1.3. Interactions espèces-habitats

Les différentes sources d'énergie et la variabilité de l'environnement s'accompagnent de contraintes physiologiques ou métaboliques importantes pour les organismes, et notamment pour les espèces animales dont les préférences environnementales sont plus étroites. Sur cette base ont pu être quantifiées les variations spatiales de certains paramètres en relation avec la température, qui varient significativement d'un habitat à l'autre, comme les concentrations en sulfure (Johnson et al, 1988; Le Bris et al, 2000; Luther et al, 2001; Le Bris and Duperron 2010), en nitrate (Le Bris et al, 2000), en oxygène (Luther et al, 2001; Nees et al, 2008), en hydrogène et en fer (Sarradin et al, 2008; Le Bris and Duperron 2010). Le pH varie également fortement dans cet habitat (Le Bris et al, 2001; 2003 et 2006). Ces relations distinguent nettement les habitats, même à l'échelle d'un site ou d'une cheminée hydrothermale (Luther et al, 2001; Le Bris et al, 2000; 2003 et 2006; Nees et al, 2008; Le Bris and Duperron 2010). Les relations entre espèces et propriétés spécifiques de l'habitat dans différents assemblages hydrothermaux caractéristiques ont été explorées sur cette base (Johnson et al, 1988 et 1994; Le Bris et al, 2000; 2003 et 2006; Luther et al, 2001; Nees et al, 2008, Schmidt et al, 2008; Moore et al, 2009).

Des **stratégies originales d'adaptation à des conditions extrêmes** de température et de toxicité ont été mises en évidence pour certaines espèces à fort endémisme, associées aux milieux hydrothermaux actifs particulièrement contraignants (voir synthèses Van Dover 2000; Fisher and Childress, 1992). La tolérance vis-à-vis des conditions thermiques et chimiques y définit des assemblages-types, souvent dominés en biomasse par un petit nombre d'espèces. C'est notamment le cas des espèces rencontrées sur les parois de fumeurs hydrothermaux dites «extrémophiles», dont l'espèce emblématique *A. pompejana* qui colonise un environnement caractérisé par de forts gradients de températures, de fortes teneurs en sulfure d'hydrogène, en CO₂ en métaux, et potentiellement exposés à des conditions de stress oxydatif important (Le Bris and Gaill, 2007). La tolérance aux fortes températures a fait l'objet d'études *in vivo* pour cette espèce dès lors que des individus peuvent être maintenus en vie (Shillito et al, 2001; Ravaux et al, 2013) et pour ses homologues de la dorsale Nord Pacifique (Girguis and Lee, 2006) ou de l'Atlantique (Ravaux et al, 2003). Du fait de la relative imprécision des mesures *in situ* (Schmidt et al, 2008; Chevaldonné et al, 1991) et de la difficulté à maintenir *in vivo* certains organismes (Shillito et al, 2004; Ravaux et al, 2013), les conditions de température auxquelles sont réellement exposés les animaux sont sujettes à controverse (Cary et al, 1998; Chevaldonné et al, 1992; Chevaldonné, 2000; Desbruyères et al, 1998). Les études qui combinent mesures *in situ*, à l'échelle centimétrique, macrovidéo et modélisation de l'habitat chimique tendent à montrer des adaptations comportementales (Le Bris et al, 2005; Schmidt et al, 2008) permettant à ces espèces de se maintenir à la limite de leurs tolérances physiologiques en tamponnant les variations du milieu. Ces espèces dites «extrémophiles» d'exception, issues de lignées évolutives uniques, ne sont pas directement la cible des activités minières puisqu'elles sont associées aux fumeurs dont les très hautes températures (> 200 °C et jusqu'à 410°C) endommagerait les engins d'extraction.

Ce n'est pas le cas des espèces qui colonisent les habitats de sources diffuses, potentiellement rencontrés à proximité, ou sur les dépôts sulfurés parfois éloignés des fumeurs et qui risquent d'être plus directement impactées (voir par exemple la localisation des sources diffuses sur le mont de sulfure à TAG (Tivey et al, 2007) ou la position des bancs de modioles sur le site Menez Gwen (Marcon et al, 2013)). Pour autant, ces zones diffuses constituent des habitats pour certaines espèces endémiques qui ont acquis des caractères particuliers pour exploiter l'énergie de ces milieux (cf. 4.3.3.2). L'association étroite avec des micro-organismes

chimioautotrophes qui constituent leur principale source d'énergie impose cependant différentes contraintes : l'exposition à des composés toxiques (sulfures, métaux lourds sous leur forme dissoute la plus toxique) et disponibilité réduite de l'oxygène. **Le mélange de l'eau mer et du fluide expose notamment les animaux aux sulfures, composés généralement toxiques même à très faible concentration (Visman, 1991; Powell et al, 1987).** De nombreux organismes hydrothermaux présentent des adaptations permettant de limiter la teneur en sulfure libre dans leur organes (Childress and Fisher, 1992; Goffredi et al, 1997; Martineu et al, 1997) et les forts gradients de concentration en sulfures sont donc susceptibles de contraindre la diversité biologique dans ces environnements (Le Bris et al, 2003). La capacité des espèces animales à coloniser différents environnements implique donc un équilibre entre besoin en éléments essentiels et tolérance aux composés toxiques (Childress and Fisher, 1992; Visman, 1991).

La disponibilité de l'oxygène est un autre facteur discriminant entre habitats. Une conséquence majeure de l'oxydation, microbienne ou abiotique, de composés sous forme réduite (métaux, sulfure ou hydrogène) est la consommation de l'oxygène dissous. Certains organismes vivent en permanence dans un milieu hypoxique (très faiblement chargé en oxygène) : c'est le cas des espèces associées aux populations d'alvinellidés sur les fumeurs noirs de la dorsale Pacifique (Di Meo et al, 2004), mais aussi des zones diffuses où l'oxygène est disponible de façon plus intermittente (Johnson et al, 1988 et 1994; Luther et al, 2001; Nees et al, 2009). La teneur en oxygène des masses d'eau océaniques est très variable selon l'âge de la masse d'eau et, en conséquence, des différences majeures sont rencontrées entre les écosystèmes hydrothermaux sur différentes dorsales. Les eaux profondes de la dorsale médio-atlantique sont chargées en oxygène et conduisent à une oxygénation plus forte de l'habitat. Une autre conséquence est une oxydation plus rapide des métaux réduits et notamment du fer II (Schmidt et al, 2009).

La concentration en oxygène a le potentiel de limiter la distribution de tous les aérobies obligatoires, et en particulier des métazoaires (Hourdez, 2012; Hourdez et Lallier, 2007). Au niveau des sources hydrothermales, les organismes sont exposés à ces concentrations très variables, mais généralement en dessous de la normale (hypoxie). Les organismes qui y prospèrent ont cependant des besoins métaboliques en oxygène comparables à ceux d'espèces proches vivant en milieu normoxique (Childress and Mickel, 1985) et présentent des adaptations respiratoires pour compenser les faibles concentrations environnementales. Ces adaptations peuvent être morphologiques, comportementales, physiologiques, ou moléculaires (pour une revue de la littérature, voir Hourdez et Lallier, 2007). Au niveau morphologique, les organismes peuvent présenter de larges surfaces branchiales pour faciliter les échanges gazeux (annélides, une espèce de crabe et une de crevettes (Hourdez et Lallier, 2007; Decelle et al, 2010)) mais cette diffusion n'est pas sélective et ceci expose aussi les organismes aux composés toxiques rencontrés dans l'environnement. Chez les crabes et les crevettes étudiés, on a aussi pu observer une augmentation de la taille de l'appendice permettant la ventilation, et améliorant ainsi la capacité de ventilation pour un effort donné (Decelle et al, 2010). Lors d'observations *in situ* dans le bassin de Lau, des crevettes *Alvinocaris* ont montré des variations de rythme ventilatoire selon la concentration environnementale en oxygène. Assez peu d'études de physiologie respiratoire ont été effectuées à ce jour, la nécessité de travailler sous pression rendant beaucoup de mesures, déjà délicates à pression atmosphérique, particulièrement difficiles. Le développement récent de nouveaux aquariums sous pression et surtout de capteurs de petite taille pour ces aquariums permet d'envisager une large gamme de nouvelles études, en particulier en physiologie. Si les études de physiologie respiratoire sous pression sont techniquement difficiles, de nombreuses études se sont par contre intéressées

aux propriétés du sang de ces organismes et, en particulier, aux pigments respiratoires que ce sang contient.

Ces études structurales et fonctionnelles ont montré que les pigments respiratoires ressemblent beaucoup à ceux d'espèces proches vivant dans d'autres milieux mais qu'ils présentent parfois des propriétés particulières (pour une revue, voir Hourdez et Lallier, 2007). Toutes les espèces des sources hydrothermales étudiées à ce jour possèdent des pigments respiratoires (hémoglobine ou hémocyanine) à forte affinité pour l'oxygène, comparées à des espèces proches vivant en milieu bien oxygéné. Cette forte affinité permet d'extraire l'oxygène de l'environnement, même lorsque celui-ci est présent en faible concentration. Cette forte affinité est compensée par un effet très prononcé du pH (effet Bohr), qui permet l'alimentation des tissus métaboliquement actifs en oxygène en réponse à la diminution de pH locale (Hourdez et Lallier, 2007). La découverte des organismes hydrothermaux a, dans l'ensemble, mené à des molécules déjà connues mais avec des propriétés intéressantes, de par le caractère extrême de leurs paramètres et de par des fonctions encore inconnues. Par exemple, l'hémoglobine du sang et du liquide coelomique du ver symbiotique *Riftia pachyptila* a la propriété de lier réversiblement le sulfure d'hydrogène (un puissant poison métabolique) afin de le transporter depuis l'environnement vers les bactéries symbiotiques qui ont besoin à la fois de ce gaz et d'oxygène (Arp et al, 1981; 1983 et 1987). Le site de liaison des sulfures n'est pas l'hème, mais les mécanismes de liaison sont encore débattus : Zal et coll. (1998) suggèrent que la liaison se fait sur des cystéines libres, mais Flores et Hourdez (2006) ont montré que les cystéines n'étaient pas impliquées et que des ions zinc qui interagissent avec des résidus spécifiques de l'hémoglobine étaient indispensables à cette liaison.

La variabilité de la température, non seulement par sa valeur moyenne mais aussi par son amplitude de variabilité, est un facteur déterminant dans la distribution des espèces (Hessler and Kaharl, 1995). Température et conditions chimiques sont généralement corrélées, les paramètres de cette corrélation pouvant varier selon la composition du fluide de haute température qui donne naissance à ces sources, et les styles de mélange (sortie de cheminée, ou diffusion à travers des fissures de la roche ou des dépôts minéraux). De la même façon, la concentration d'oxygène est très variable dans l'espace, souvent plus basse que la normale (hypoxie) et parfois totalement absente (anoxie). Dans le bassin de Lau, une étude de la distribution des espèces en fonction de la température, de la concentration en sulfures, et de la concentration en oxygène a montré la grande dépendance de la distribution des métazoaires et de ces paramètres physicochimiques (Podowski et al, 2009). Ceci est non seulement vrai pour les invertébrés symbiotiques (grands gastéropodes *Alviniconcha* sp. et *Ifremeria nautilei* et moules *Bathymodiolus brevior*) qui dépendent directement des composés réduits du fluide hydrothermal pour le fonctionnement de leur symbiose, mais aussi pour les métazoaires non symbiotiques, qui se nourrissent des films bactériens ou qui sont des prédateurs. La distribution des espèces symbiotiques peut être dictée par leur tolérance à la température et aux sulfures (Henry et al, 2008) mais aussi par la spéciation de ces sulfures (Waite et al, 2008). En effet, selon les proportions de sulfure d'hydrogène, de polysulfures et de thiosulfate, les *Alviniconcha* sp. étaient principalement observés dans la zone la plus riche en sulfures, puis *I. nautilei* et enfin *B. brevior* était dans la zone où le thiosulfate était le plus abondant, en quantité potentiellement capable de soutenir le fonctionnement de la symbiose. De la même façon, bien que les concentrations en sulfures sur les cheminées du Pacifique Oriental soient élevées, ils sont principalement sous forme de sulfure de fer, non disponible pour la symbiose formée entre *Riftia pachyptila* et sa symbiose sulfo-oxydante (Luther et al, 2001; Le Bris et al, 2003). Les interactions des sulfures avec le fer, mais aussi avec le zinc

(toxique en forte concentration), limite aussi probablement la distribution des espèces symbiotiques dans le bassin de Lau (Hsu-Kim et al, 2008).

L'acidité des fluides est un autre facteur de contrainte sur les organismes et notamment les bivalves qui forment des coquilles carbonatées (Tunnicliffe et al, 2009). Les mesures de pH dans les habitats montrent une chute de plusieurs unités de pH avec la température pouvant atteindre des pH relativement acides sur les parois des fumeurs (Le Bris et al, 2003 et 2005), bien au-delà de ce qui est considéré comme l'acidification des eaux océaniques (quelques centièmes à dixièmes d'unité pH). Si des adaptations spécifiques sont supposées pour les espèces de zone actives exposées à de fortes variations (Tunnicliffe et al, 2009), la faune périphérique pourrait être bien moins tolérante (et notamment les coraux froids potentiellement très sensibles). L'influence des processus microbiens sur le pH du milieu dans les zones inactives est probablement limitée, sauf dans les sédiments eux-mêmes, mais l'absence de mesure ne permet pas pour l'instant d'en estimer l'importance. Les zones de nodules et d'encroûtements ne sont pas *a priori* soumises à ce type d'anomalie chimique et le pH des eaux de fond légèrement plus faible que celui mesuré en surface des océans doit y être particulièrement stable. Cette stabilité relative du pH des eaux de fond doit être considérée pour appréhender les risques d'acidification liés aux panaches.

D'une manière générale, la variabilité à micro-échelle des habitats associés aux ressources minérales est identifiée mais sa composante temporelle est très peu connue. Il est possible d'inférer pour ces milieux une dynamique saisonnière générale, telle que celle identifiée pour des environnements abyssaux classiques qui a mis fin au paradigme selon lequel l'océan profond est un milieu stable. Il est également acquis que les environnements associés aux ressources minérales, en dehors des zones de nodules, sont soumis à d'autres contraintes dynamiques. Aux fluctuations hydrodynamiques de ces milieux s'ajoute l'instabilité géologique particulière des zones d'accrétion où s'établissent les circulations hydrothermales. Les connaissances récentes de la variabilité à court terme des habitats hydrothermaux actifs illustrent son importance dans les patrons de biodiversité. Les contraintes physiologiques qui en résultent sont déterminantes pour l'établissement de la diversité sur les zones hydrothermales actives où sont rencontrés les gradients les plus abrupts de température, d'oxygène, de pH et enfin de toxicité via l'exposition aux métaux et au sulfure d'hydrogène. Les implications écologiques et l'importance de cette variabilité restent à préciser pour les environnements associés aux encroûtements et sulfures minéraux inactifs.

Le caractère exceptionnel des adaptations biologiques (génomiques et phénotypiques) des espèces inféodées à ces milieux extrêmes justifie leur intérêt scientifique, tant comme modèles d'étude que source de nouvelles molécules d'intérêt biotechnologique. Cette diversité n'est pas directement ciblée par les activités d'exploitation mais les impacts directs et indirects ne peuvent pas être exclus. La découverte de lignées exceptionnelles est récente et l'inventaire reste inachevé, de nombreuses propriétés adaptatives sont encore à explorer. La spécificité génétique et les adaptations des espèces associées aux zones inactives restent par contre à ce jour quasi inconnues, tant sur le plan microbiologique que faunistique.

4.4.2. Populations et communautés

4.4.2.1. *Connectivité des populations*

La connectivité des populations et le degré de variabilité de la biodiversité locale à l'échelle régionale constituent des paramètres importants de la gestion des écosystèmes lorsqu'ils sont soumis à des impacts anthropiques et, particulièrement dans le cadre de leur exploitation raisonnée. Depuis quelques années, l'écosystème hydrothermal profond fait l'objet d'une demande croissante de permis/concessions en vue de son exploitation minière (International Seabed Authority, 2007; Gwyther, 2008). Cet environnement fait donc aussi l'objet d'études visant à mieux connaître l'état zéro de communautés particulières, car inféodées à ce système instable et fragmenté, et à en apprécier sa capacité de résilience face aux perturbations (Glowka, 2003; van Dover, 2011). Jusqu'à présent, peu de choses étaient connues sur le degré d'échanges des espèces hydrothermales entre champs hydrothermaux voire entre segments de dorsales et, notamment, sur leurs capacités à recoloniser rapidement de nouveaux territoires ou des sites très distants. La plupart des études portant sur ce sujet ont été menées principalement le long de portions «continues» de dorsales océaniques, qu'elles soient à accrétion lente comme la dorsale médio-atlantique (MAR) ou à accrétion rapide comme la dorsale du Pacifique oriental (EPR). Dans la grande majorité des cas, et notamment lorsque les espèces présentent une phase larvaire benthopélagique, ces études ont montré que les espèces sont capables de recoloniser rapidement de nouveaux sites (Shank and Halanynch, 2007; Mullineaux et al, 2010) et de maintenir un flux génique relativement important entre populations sur des milliers de kilomètres (Craddock et al, 1995; Jollivet et al, 1995; Won et al, 2003; Hurtado et al, 2004; Teixeira et al, 2011 et 2012). C'est tout particulièrement le cas des essaims de crevettes du genre *Rimicaris* qui ne présentent pas de différenciation génétique à l'échelle de la dorsale médio-atlantique (Creasey and Rogers, 1996; Teixeira et al, 2011 et 2012), cette absence de différenciation étant liée à la double capacité de dispersion de l'espèce, au cours de son développement larvaire mais aussi dans sa phase adulte. Après éclosion, les larves ont en effet la capacité de remonter dans la zone euphotique pour se nourrir du phytoplancton (Pond et al, 1997; Dixon et al, 1998; Tyler and Dixon, 2000) et donc de pouvoir se disperser dans les couches superficielles de l'océan. A cela s'ajoute la capacité des adultes à relocaliser les sites actifs à l'aide d'un système de détection (œil vestigial) des émissions infra-rouge (van Dover et al, 1989), de récepteurs sensibles au sulfure d'hydrogène (Renninger et al, 1995), et, donc, de se déplacer d'un site à l'autre. Les crevettes et les crustacés hydrothermaux (ex. crabes *Bythograeidae*) constituent néanmoins des cas assez particuliers, capables de réagir assez rapidement à une perturbation (extinction de sites suite à un mouvement tectonique) en se déplaçant vers les nouvelles zones d'émission (Jollivet, 1996; Shank et al, 1998).

L'étude fine de la structure génétique des espèces hydrothermales montre cependant que la plupart des espèces suivent un modèle de dispersion en pas japonais (Stepping-stones Model) (France et al, 1992; Craddock et al, 1995; Black et al, 1994; Audzijonyte and Vrijenhoek 2010; Vrijenhoek, 2010), notamment lorsque celles-ci ont un cycle benthopélagique où la phase adulte est sessile ou sédentaire (cas de la plupart des espèces symbiotiques dites architectes : ex. bathymodiales, vestimentifères, polychètes *Alvinellidae*). La colonisation et les échanges entre sites actifs se font alors de proche en proche, la distance géographique entre deux sites faisant œuvre de barrière. C'est particulièrement le cas de nombreuses espèces à développement lécitotrophique (Zal et al 1994; Jollivet et al, 2000; Marsh et al, 2001; Tyler and Young, 1999) mais également des rares espèces à développement planctotrophique comme les bivalves *Bathymodiolinae* (Lutz, 1988). Chez ces espèces, la dispersion efficace semble en partie réalisée à travers les courants de marée le

long de la dorsale dans la vallée axiale du rift qui canalise le déplacement des larves (Mullineaux et al, 2012). La probabilité de succès de coloniser un nouveau site dépend alors de la durée de vie de la larve et de la vitesse du courant, lorsque celle-ci est intégrée sur le temps de résidence de la larve dans la colonne d'eau, le courant de marée présentant des renversements périodiques associés au cycle lunaire (Little et al, 1987; Chevalloné et al, 1997).

La majeure partie des études portant sur la connectivité des populations des sources hydrothermales a été réalisée de manière indirecte par utilisation de marqueurs génétiques. L'échantillonnage de larves et de post-larves nécessite en effet le déploiement d'une multitude de mouillages longue durée (pièges à particules et/ou pompes) avec une stratégie d'échantillonnage élaborée et des techniques de conservation des larves dédiées permettant d'identifier morphologiquement et moléculairement les larves capturées (Comtet et al, 2000; Adams et al, 2011; Mullineaux et al, 2012). Retracer l'origine des larves demande en effet un échantillonnage exhaustif des populations naturelles d'adultes et l'utilisation de nombreux marqueurs génétiques (ex. microsatellites). Si le séquençage du génome de plusieurs espèces emblématiques de l'environnement hydrothermal (*Alvinella pompejana*, *Paralvinella sulfincola*, *Riftia pachyptila*, *Bathymodiolus azoricus*) est en cours et permet d'ores et déjà l'obtention de nombreux marqueurs génétiques, un gros travail reste à faire dans ce domaine. Evaluer avec précision les échanges larvaires entre différents champs hydrothermaux nécessite de nombreuses campagnes dédiées et menées à l'échelle régionale.

De ce fait, la plupart des études de génétique des populations n'ont eu pour l'instant qu'une portée assez limitée dans notre connaissance des échanges contemporains inter-populations. Ces études ont néanmoins le mérite d'avoir pu retracer l'histoire récente (quelques millions d'années) des populations naturelles de la plupart des espèces (architectes) à la base du réseau trophique de l'écosystème hydrothermal sur les dorsales les plus visitées : EPR, MAR, bassins de Lau et de Manus (Won et al, 2003; Hurtado et al, 2004; Plouviez et al, 2009; Coykendall et al, 2011; Thaler et al, 2011). Elles montrent qu'il n'existe pas de barrières physiques aux échanges de larves dès lors que le système hydrothermal est continu (c'est-à-dire non découpé en segments par des failles transformantes et/ou microplaques). Les discontinuités géologiques majeures le long des principales dorsales océaniques ont en effet un rôle extrêmement structurant sur la faune hydrothermale conduisant tantôt à l'isolement quasi-complet des populations situées de part et d'autre de la discontinuité (Johnson et al, 2006; Plouviez et al, 2009 et 2010), tantôt à la remise en contact secondaire de peuplements préalablement isolés et l'hybridation de certaines espèces (O'Mullan et al, 2001; Matabos et al, 2008; Faure et al, 2009; Johnson et al, 2013).

Un nombre encore plus restreint d'études s'est focalisé sur l'analyse de la structure génétique des populations hydrothermales des bassins arrière-arc du Pacifique Ouest pour évaluer leur degré de connectivité et retracer l'histoire de la colonisation de cette faune très spécialisée dans un système discontinu de dorsales (Denis et al, 1993; Kojima et al, 2000 et 2001; Thaler et al, 2011; Beinart et al, 2012; Plouviez et al, 2013). Ce nombre très limité d'études suggère que les communautés hydrothermales des bassins arrière-arc sont beaucoup plus isolées les unes des autres que celles de l'EPR et de la dorsale médio-atlantique, avec de nombreux événements de spéciation en allopatrie. Les grands gastéropodes symbiotiques *Alviniconcha* spp. forment à ce titre un complexe d'espèces cryptiques se mélangeant localement selon les conditions du milieu (Beinart et al, 2012). Ceci dénote une histoire relativement complexe de la faune hydrothermale du Pacifique Ouest, pouvant être mise en relation avec l'histoire tectonique compliquée de la région, celle-ci ayant donné lieu à une multitude d'isollements géographiques avec des remises en contact secondaires voire des épisodes récents de recolonisation et des changements d'habitats (Kyuno et al, 2009; Thaler et al, 2011; Plouviez et al, 2013).

La gestion raisonnée de l'écosystème hydrothermal nécessite également une connaissance préalable de la dynamique temporelle des communautés et du mode de fonctionnement des métapopulations d'espèces qui composent ces communautés (Shank et al, 1998; Desbruyères 1998; Desbruyères et al, 2001; Zal and Jollivet, 2003). Jusqu'à présent très peu de choses sont encore connues au niveau du fonctionnement des populations locales à l'échelle d'un champ hydrothermal (Jollivet, 1996; Vrijenhoek, 1997 et 2010; Jollivet et al, 1999; Zal and Jollivet, 2003). Même si la dynamique du réseau d'échanges entre populations locales dépend intrinsèquement de la biologie de chaque espèce (ex. fécondité, mode de reproduction et de développement larvaire, durée de vie larvaire), le succès de (re)colonisation des sites dépend beaucoup de facteurs extrinsèques structurants associés à la dynamique des sources elles-mêmes (taux d'extinction et renouvellement des émissions hydrothermales, vitesse de déplacement de l'activité hydrothermale à l'axe des dorsales, nombre d'habitats «actifs» vides, etc.... (Vrijenhoek, 1997 et 2010; Coykendall et al, 2011). A cet égard, Jollivet et coll. (1999) ont modélisé l'action du déplacement de l'activité hydrothermale sur la dynamique de recolonisation des sites par la faune hydrothermale et son effet à plus ou moins long terme (en milliers d'années) sur le degré d'échanges des populations d'*Alvinellidae* entre champs hydrothermaux. Cette étude suggère que l'instabilité de l'environnement pourrait être un moteur d'homogénéisation génétique des espèces sur de grandes distances en promouvant les flux de gènes inter-champs dans une fenêtre étroite de paramètres comme les taux d'extinction et de renouvellement des sites. L'augmentation du taux d'extinction des sites, étroitement dépendant de la vitesse d'accrétion de la dorsale, a néanmoins un impact relativement conséquent sur la diversité génétique de certaines espèces comme les grands vestimentifères (Coykendall et al, 2011). Ces simulations montrent qu'un système instable tend à favoriser les stratégies de dispersion les plus extrêmes en sélectionnant des espèces qui colonisent l'habitat de proche en proche (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) ou des espèces à larves très dispersives (dormance des propagules). Certaines espèces pourraient même avoir des stratégies de dispersion alternatives selon l'état de l'environnement, notamment lorsque l'activité hydrothermale diminue. Ce type de stratégie mixte n'a cependant pas encore été mis en évidence jusqu'à présent. Il convient donc de rester extrêmement mesuré dans l'exploitation minière à proximité des champs hydrothermaux et notamment de proscrire l'exploitation d'un champ dans sa globalité, ce dernier pouvant servir de pierre de gué à la dispersion à une échelle spatiale plus large. De même, augmenter le taux d'extinction des sites par l'exploitation minière pourrait avoir des conséquences opposées sur les espèces selon le type de stratégie de dissémination sélectionné. Si certains modèles d'activité tectonique (Watremez and Kervevan, 1990; Pelayo et al, 1994; Debéda et al, 1995) et hydrologiques (Kim et al, 1994 et 1998; Adams et al, 2011; Young et al, 2012) sont disponibles, le couplage de ceux-ci à des modèles démo-génétiques reste à faire et nécessite de nombreuses études de terrain surtout dans les zones faisant l'objet de demandes de permis miniers.

4.4.2.2. *Espèces clés*

Comme dans d'autres types d'écosystèmes, certaines espèces ingénieuses jouent un rôle-clé dans la structuration physique et chimique de l'habitat. Par exemple, Le Bris et coll. (2005) et Pradillon et coll. (2009) identifient l'espèce *A. pompejana* comme une espèce ingénieuse capable de modifier l'habitat, à son propre bénéfice et celui des espèces associées, en réduisant la température des fluides environnants. Sur les dorsales Nord Pacifique, une espèce voisine *Paralvinella sulfincola* forme également des tubes en isolant les parois minérales les plus chaudes. La présence de marcassite dans les croûtes de sulfures en contact immédiat avec les tubes est une autre indication des échanges de chaleur qui se produisent au niveau des tubes (Juniper and Sarrazin, 1995; Zbinden et al, 2003).

Les symbioses multiples constituent, par ailleurs, une stratégie particulièrement avantageuse, qui se reflète par des taux de croissance exceptionnels pour l'océan profond (ex *Riftia*, *Bathymodiolus* plusieurs centimètres par ans (Schöne and Giere, 2005; Nedoncelle et al, 2013)). La notion d'espèces ingénieuses se confond alors avec celle d'espèce fondatrice (foundation species) lorsque celle-ci favorise les échanges d'énergie (Govenar, 2010). **De fait, la plupart des espèces qui dominent la biomasse des écosystèmes hydrothermaux peuvent être considérées comme fondatrices, qu'elles soient endosymbiotiques ou associées à des bactéries libres ou épibiontes permettant la fixation du carbone par voie chimiosynthétique.** Cette caractéristique est unique aux habitats hydrothermaux. La succession temporelle de ces espèces dominantes est l'un des éléments de stabilité de l'écosystème dans un environnement par ailleurs instable (cf. précédemment ; Mullineaux et al, 2003).

Des espèces ingénieuses dans les environnements profonds sont également identifiées en dehors des écosystèmes chimiosynthétiques. **Les espèces profondes de gorgones et coraux formant des récifs ou des canopées sont décrites comme abondantes sur les monts sous-marins, et plus largement sur toutes les surfaces minérales susceptibles de présenter des encroûtements.** Les coraux froids scléactiniaires sont notamment rencontrés dans de nombreuses régions du globe et notamment celles susceptibles d'être impactées par les activités minières.

L'influence sur les propriétés hydrodynamiques du milieu de ces espèces est clairement identifiée, mais c'est surtout leur rôle de refuge pour différentes espèces et particulièrement leurs stades juvéniles qui a conduit à inscrire ces espèces sur la liste des espèces protégées. En particulier, certaines espèces ingénieuses comme *Lophelia pertusa* ou *Madrepora oculata* forment des récifs qui servent de refuges et de nurseries à de nombreuses espèces (larves de poissons, décapodes, ...), dont certaines ont un intérêt patrimonial et commercial (Roberts et al, 2009).

La croissance des récifs est donc un élément essentiel de l'écosystème. Bien que les coraux froids soient réputés pour présenter un taux de croissance radiale du squelette très faible (quelques mm.a^{-1}), les jeunes polypes (< 1 an) peuvent présenter des taux de croissance dépassant 20 mm.an^{-1} (Bell and Smith, 1999; Gass and Roberts, 2006; Brooke and Young, 2009; Sabatier et al, 2012; Lartaud et al, 2013). Toutefois, la croissance de la colonie pour les espèces précitées est essentiellement contrôlée par l'addition de nouveaux polypes (Gass and Roberts, 2011; Lartaud et al, 2013).

Différents facteurs biotiques et abiotiques peuvent influencer le taux de croissance des coraux, tels l'apport de nourriture, la turbidité, la température, l'hydrographie et la chimie de l'eau de mer (Cairns and Macintyre, 1992; Guinotte et al, 2006; Thiem et al, 2006; White et al, 2007; Roberts et al, 2009). Parmi ces facteurs limitant, la teneur en particules apparaît comme un

paramètre fondamental, dans le contexte d'exploitation des substrats profonds, en agissant à la fois sur l'extension des polypes mais aussi sur la survie des larves (Larsson et al, in press). En revanche, l'impact de l'acidification des masses d'eau sur la croissance du squelette est moins clair, avec des résultats contradictoires suivant la durée des expériences, ce qui suggère des effets d'acclimatation (Form and Riebesell, 2012; Maier et al, 2013).

Dans les sédiments associés aux nodules, cette notion se réfère probablement plus aux espèces communément considérées comme espèces ingénieuses dans les environnements sédimentaires; notamment les espèces qui forment des terriers et favorisent ainsi l'oxygénation des sédiments et les transferts de matière (Banerjee, 2000).

La recherche consacrée aux milieux ciblés par l'exploitation des ressources minérales, ou leur proximité immédiate met l'accent sur des espèces-clés inféodées à ces habitats ou d'autres espèces ingénieuses plus communes des écosystèmes profonds, telles que les coraux d'eaux froides. La vulnérabilité des écosystèmes impactés par l'exploitation des ressources minérales dépend en particulier de la sensibilité de ces espèces-clés aux perturbations. La capacité de maintien des populations doit être évaluée au regard du degré d'endémisme propre à chaque site et des patrons de diversité génétique qui reflètent la connectivité avec d'autres sites distants, de leur capacité de recolonisation d'un habitat fragmenté. A ce jour, seules les études menées sur les espèces hydrothermales, naturellement soumises à des phénomènes d'extinction-recolonisation, renseignent sur ces questions et montrent la grande disparité des capacités de dispersion et de recrutement larvaire. Les modèles couplés de transport et biologie larvaire commencent juste à être définis pour prédire les échelles spatio-temporelles de recolonisation des sites. La qualité de l'habitat, et son rôle sur la dynamique de recolonisation et de croissance, reste largement absente de ces études, sauf pour les coraux profonds dont la résilience a fait l'objet d'étude spécifiques.

4.4.3. Transfert de matière et d'énergie

4.4.3.1. Réseaux trophiques

Deux types de production primaire, alimentent les réseaux trophiques profonds. **La matière organique produite par la photosynthèse en surface et son transport vers le fond constitue la ressource classique pour tous les environnements océaniques, mais sa disponibilité diminue considérablement avec la profondeur, tandis que la production microbienne chimioautotrophe assure une contribution importante à la biomasse dans certaines régions obscures de l'océan** (Orcutt et al, 2011). L'énergie qui sous-tend ce mode de fixation de CO₂ pour former les composés organiques est basée sur des réactions d'oxydo-réduction et est disponible dans les milieux où s'établissent des déséquilibres chimiques. Dans les écosystèmes liés aux sources hydrothermales actives de grande profondeur en particulier, les micro-organismes chimioautotrophes sont considérés comme la base de réseaux trophiques.

Les invertébrés formant des symbioses avec bactéries chimiosynthétiques jouent un rôle particulier dans ces réseaux car ils dominent souvent la biomasse des environnements hydrothermaux actifs (Van Dover et al, 2000; Govenar, 2012). Les endosymbioses caractéristiques des environnements profonds réduits semblent particulièrement efficaces dans l'utilisation de cette ressource, comme le montre la prédominance du carbone d'origine chimioautotrophe dans les tissus de ces organismes (Fisher, 1990; Fisher, 1995; Colaço et al, 2002). L'exemple du vestimentifère *Riftia pachyptila* qui concentre dans son sang les sulfures

et l'oxygène pour alimenter ses symbiotes est emblématique des adaptations physiologiques des organismes hydrothermaux (Childress et al, 1991; Childress et al, 1993). La fixation des sulfures et de l'oxygène sur l'hémoglobine empêche leur réaction spontanée au cours de leur transfert vers les symbiotes (Childress and Fisher, 1992). L'assimilation des composés nécessaires à la fixation de carbone par les symbiotes dépend cependant fortement des conditions chimiques de l'habitat et notamment du pH et de la présence de métaux qui varient fortement selon les habitats (Luther et al, 2001; Le Bris et al, 2003). En outre, *R. pachyptila* assimile les sulfures prioritairement sous la forme ionique HS^- , la forme acide H_2S l'étant beaucoup plus lentement (Goffredi et al, 1997). Selon un mécanisme qui reste à définir, l'incorporation de H_2S , forme la plus toxique de par sa capacité à diffuser au travers des tissus et membranes biologiques, serait alors limitée. Au contraire, l'espèce privilégiée pour l'assimilation du carbone inorganique est CO_2 et non HCO_3^- prédominant dans l'eau de mer (Goffredi et al, 1997). Le métabolisme chimioautotrophe qui permet la synthèse de composés organiques, à partir des sulfures, du CO_2 et de l'oxygène, produit des ions H^+ qui sont éliminés via la branchie. Cette acidification locale en convertissant les carbonates en CO_2 favoriserait encore l'assimilation du carbone inorganique (Childress et al, 1993). Les bivalves, crustacés et gastéropodes présentent des symbioses branchiales plus simples, dans la mesure où les composés dissous diffusent directement de l'environnement vers les bactéries. L'existence de ce type de symbioses dans les habitats des zones inactives où les sulfures sont présents sous forme minérale n'est pas établie même si ces associations sont décrites aujourd'hui dans un grand nombre d'environnements côtiers et profonds différents et notamment dans les sédiments riches en sulfure (Dubilier et al, 2008).

Aux profondeurs inférieures à 1000 m, cependant, la ressource utilisée par les organismes est plus diversifiée et une contribution photosynthétique aux réseaux trophiques est mise en évidence par les approches isotopiques (Sweetman and Levin, 2013). Les systèmes hydrothermaux localisés sur les marges continentales où les eaux de surface sont plus productives ont eux aussi une contribution photosynthétique plus marquée (ex : bassin de Guaymas dans le golfe de Californie) (Soto, 2009). Ces travaux sont basés sur l'analyse des valeurs isotopiques des tissus des organismes. Ceux des consommateurs sont le produit des différents facteurs suivants : la nature et les valeurs isotopiques des substrats inorganiques consommés par les micro-organismes chimioautotrophes, les processus de fractionnement isotopique ayant lieu lors des réactions métaboliques utilisant les substrats inorganiques pour la formation de composés organiques (ex. cycle de Calvin Benson ou CBB; reverse tricarboxylic acid cycle ou rTCA) ainsi que les interactions trophiques entre les proies et leurs consommateurs (endosymbioses, relations prédateur/proie) (Reid, Sweeting et al, 2013). Il faut toutefois souligner les limites de l'approche isotopique pour établir avec certitude les contributions de la photosynthèse et de la chimiosynthèse, puisque les différentes voies enzymatiques de fixation chimioautotrophe du carbone peuvent avoir des signatures différentes rendant leur analyse délicate (Fisher et al, 1994; Colaco et al, 2002; Levesque et al, 2003; Campbell et al, 2006; Hügler and Sievert, 2011). Les réactions enzymatiques catalysées par l'enzyme RuBisCo I (ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygénase forme I) du cycle Calvin et Benson montre des fractionnements plus forts, de 22% à 30% (Roeske and O'Leary, 1984; Guy, Fogel et al, 1993; Robinson, Scott et al, 2003) que ceux du cycle rTCA, 2% à 14% (Wirsen, Sievert et al, 2002; House, Schopf et al, 2003; Suzuki, Sasaki et al, 2005). Sur les zones hydrothermales actives, les habitats proches des émissions de fluides semblent favoriser les chimioautotrophes utilisant la voie rTCA, reflétée par les signatures d'un plus grand nombre d'espèces d'invertébrés dont les signatures isotopiques sont enrichies en ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} > 16\%$) (Fisher, Childress et al, 1994; Colaco, Dehairs et al, 2002; Levesque, Juniper et al, 2003; Limen and Juniper 2006; De Busserolles, Sarrazin et al, 2009; Levin, Mendoza et al,

2009). Par ailleurs, la possibilité de variation dans le temps de cette signature pour un individu donné est soulignée (Van Dover, 2002) rendant encore plus complexe l'interprétation de données obtenues par des campagnes ponctuelles souvent sur la même période de temps. La signature de la source de carbone elle-même peut varier selon le type d'habitat de la faune, du fait de la variabilité isotopique des fluides diffus (Proskurowski et al, 2008), de la contribution éventuelle du méthane à la signature isotopique et du rôle des processus de diagénèse dans les sédiments notamment pour la faune endogée (Lartaud et al, 2010).

Les réseaux trophiques des environnements associés aux ressources minérales ne bénéficient pas *a priori* des importants flux d'énergie apportés par les sources hydrothermales actives. Une situation intermédiaire et plus complexe prévaut, avec un gradient de ressource énergétique disponible depuis les communautés des encroûtements cobaltifères sur les monts sous-marins ou celles des sulfures minéraux à proximité de sources hydrothermales actives, et jusqu'aux champs de nodules dépourvus de source majeure d'énergie. Sur les dépôts sulfurés inactifs, souvent associés à des zones actives, la contribution des apports allochtones de matière organique est en effet plus marquée (Levin et al, 2009) mais la chimiosynthèse reste significative, avec un **rôle potentiel du transport de la production chimiosynthétique vers les zones périphériques**. Par ailleurs, même en l'absence de circulation hydrothermale, une autre voie de fixation chimiosynthétique du carbone à considérer est basée sur les micro-organismes capables d'utiliser les sulfures minéraux eux-mêmes (Sylvan et al, 2012 et 2013).

Même si sa contribution au réseau trophique reste inconnue, les relations entre méiofaune et micro-organismes suggèrent que son rôle pourrait être non-négligeable. Les encroûtements localisés sur les monts sous-marins bénéficient, au contraire, d'apports importants de ressources organiques, du fait de régimes hydrodynamiques particuliers qui favorisent la production primaire de surface par l'apport de nutriments des eaux profondes. Les environnements benthiques correspondants sont enrichis en métaux et une activité microbienne chimiolithotrophe y est possible mais l'importance de cette production est probablement mineure par rapport à celle des apports de surface. Les régions de grande profondeur dans lesquelles se situent les champs de nodule ne reçoivent qu'une très faible proportion du carbone organique produit en surface (McClain, 2010). Parmi les métazoaires, les suspensivores sont communément observés sur les substrats durs, à la différence de la faune endogée des sédiments majoritairement dépositivore (Veillette et al, 2007). La part de la chimiosynthèse y est probablement négligeable.

La connaissance des structures de réseaux trophiques est fragmentaire pour les sites d'intérêt minier. L'importance de la méiofaune comme composante du réseau trophique des écosystèmes hydrothermaux inactifs est encore peu connue. Son caractère peu endémique contraste avec celui de la faune, même si le nombre d'espèces diminue lorsque les conditions environnementales deviennent plus extrêmes sur les zones actives (Gollner et al, 2010).

La part de la production chimiosynthétique dans les réseaux trophiques des écosystèmes associés aux ressources minérales profondes est une question clé pour l'évaluation de la spécificité des écosystèmes concernés par l'exploitation des ressources. La grande majorité des études actuelles concernant les réseaux trophiques basés sur la production microbienne chimioautotrophe libre ou symbiotique concerne les milieux associés aux circulations de fluides hydrothermaux. Sans pouvoir lever toutes les incertitudes, les approches isotopiques identifient différentes voies métaboliques de fixation du carbone par les microorganismes, bactéries et archées, principalement sur les zones actives mais aussi sur les sites sans circulation de fluides. Compte-tenu des faibles quantités et de la qualité réduite des apports

d'origine photosynthétique vers l'océan profond, l'origine de la matière organique et la contribution de cette production primaire locale exportée en périphérie des sites actifs sont des facteurs potentiellement important. La complexité des apports trophiques est cependant mal maîtrisée tant sur ces zones que sur les flancs de monts sous-marins où l'augmentation des flux particuliers peut résulter à la fois d'un accroissement de la production primaire de surface favorisé par les apports verticaux de nutriments et du transport latéral de particules.

4.4.3.2. Relations avec les écosystèmes adjacents

Les relations entre les écosystèmes associés aux ressources minérales et les écosystèmes pélagiques et benthiques adjacents sont aujourd'hui quasiment inconnues. On peut s'appuyer cependant sur des connaissances générales concernant : la circulation des masses d'eau océaniques profondes qui lient les environnements associés aux ressources minérales aux écosystèmes pélagiques à plus ou moins grande échelle, l'existence d'écosystèmes particuliers liée à la topographie et ses effets sur la circulation régionale, en particulier les habitats abritant des coraux profonds et les communautés qui leurs sont associées.

Mélange vertical des masses d'eau profondes

A l'échelle du globe, la diffusion turbulente abyssale moyenne qui permet le mélange vertical des masses d'eau est très faible. Une constante de diffusion K_z de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Munk and Wunsch, 1998), est nécessaire pour faire circuler la branche profonde de la circulation thermohaline. Une hypothèse simple d'équilibre advection / diffusion sur la verticale conduit à un temps de l'ordre de 100 ans ou 1000 ans pour parcourir respectivement 300 m ou 3000 m. Mais cette valeur cache de grandes disparités spatiales qui restent mal connues, en partie parce que peu échantillonnées *in situ*, même si le développement de mesures haute fréquence a permis ces dernières années de mieux contraindre les valeurs locales. En dehors des régions sous l'influence de fortes variations topographiques et loin de la surface (sous la thermocline), les mesures *in situ* de profils microstructures (Polzin et al, 1997) ou par dispersion de traceurs réalisées lors de campagnes océanographiques (Ledwell, 1993) font état d'un mélange très faible, de l'ordre $K_z \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, soit un ordre de grandeur inférieur à la valeur moyenne. A l'inverse, plusieurs campagnes ont permis de mettre en évidence un mélange abyssal accru au-dessus des zones de forte variation de la topographie, associé à la dorsale médio-atlantique ($K_z \sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Polzin et al 1997; Thurnherr et al, 2005)), ou encore les campagnes françaises dans le Déroit de Sicile (Cuypers et al 2012), au-dessus de la dorsale de Reykjanes (campagne OVIDE 2002-2010 (Kokoszka 2012; Ferron 2013)) ou dans les mers semi-fermées indonésiennes (campagne INDOMIX). L'hypothèse de Munk et Wunsch (1998) est que **les forts mélanges verticaux sont concentrés en certains points où le gradient de bathymétrie est très fort** puis que les masses d'eau mélangées sont dispersées latéralement.

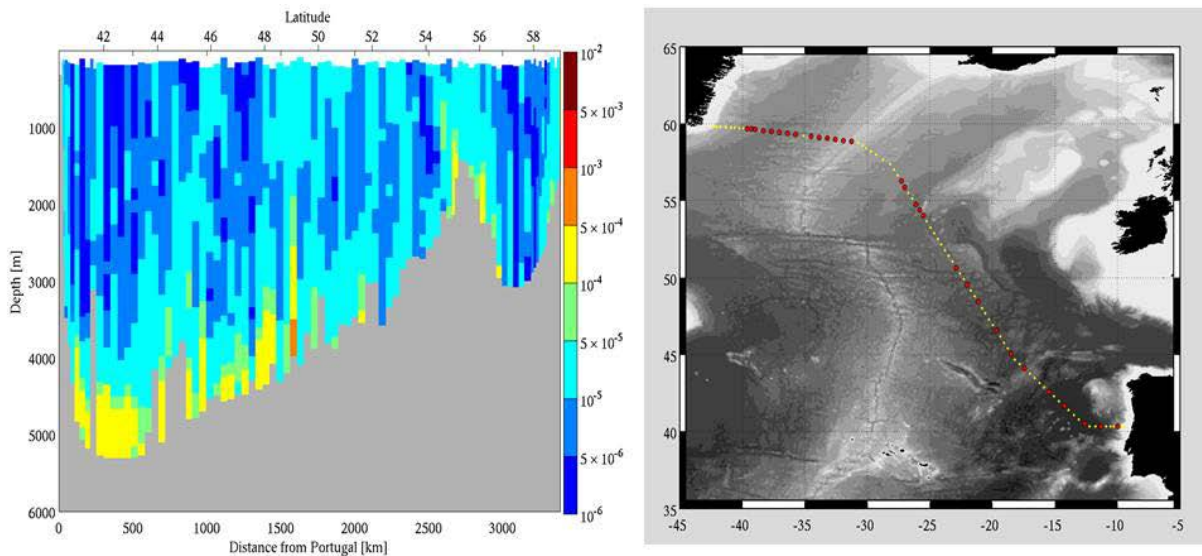


Figure 4-52 Estimation du mélange vertical (K_z (m^2/s)) le long de la section OVIDE (Atlantique Nord) (Kokoszka, 2012)

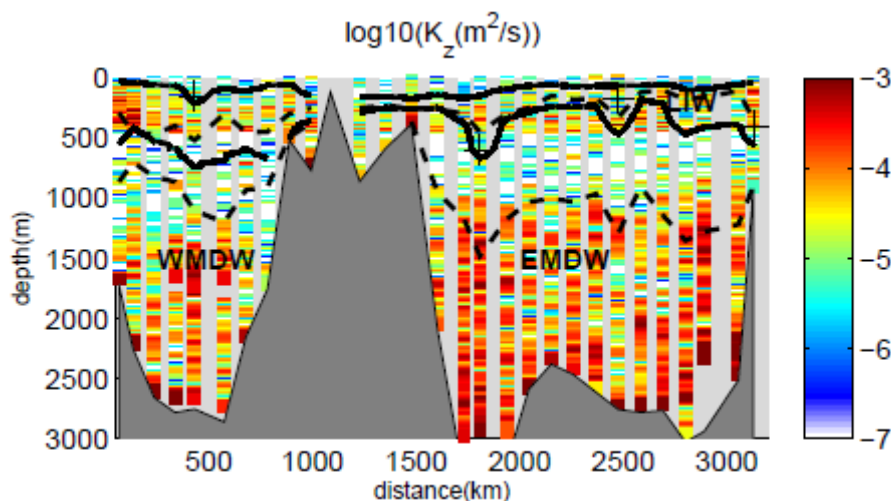


Figure 4-53 Estimation du mélange vertical ($\log_{10}(K_z)$ (m^2/s)) le long de la section BOUM en Méditerranée (Cuypers et al, 2012)

Plusieurs mécanismes dynamiques expliquent le lien entre forte variation de la bathymétrie et mélange vertical élevé :

- La dissipation de la marée interne. Sous l'influence des courants de marée barotrope, les régions de forts gradients topographiques sont des zones de génération d'ondes internes aux fréquences de marée : la marée interne. On estime qu'une partie significative (~30%) (Polzin et al, 1997) de **la marée interne est dissipée localement sur une échelle de quelque centaines de mètres au-dessus du fond et va fortement contribuer au mélange vertical abyssal**. Ce mécanisme est considéré comme le meilleur candidat pour expliquer le mélange profond.

- Les courants de densité entre canyons. Les observations de Thurnherr et coll. (2005) ont montré **des courants de densité importants entre les très nombreux canyons qui parsèment les dorsales océaniques. Le cisaillement vertical associé à ces courants génère là aussi un mélange vertical important.** Selon Thurnherr la contribution intégrée de tous les canyons pourrait être significative.
- Les ondes de Lee. Plusieurs études récentes suggèrent que **les courants de fond associés aux structures mésoéchelles pourraient générer des ondes internes de Lee par interaction courant/topographie (Nikurashin et al, 2013).** Ce mécanisme pourrait être particulièrement important dans l'Océan Austral en raison de l'importance du courant circumpolaire et des structures mésoéchelles associées.
- Les ondes proche-inertielles forcées par le vent. **Le vent constitue une source très importante pour la génération d'ondes internes dont une faible fraction pénètre vers l'océan profond (10% à 30%)** (Cuypers et al 2013; Zhai et al 2009). La contribution de ce phénomène, via la génération d'ondes inertielles puis le rayonnement d'ondes internes proche inertielles, reste néanmoins à affiner car elle joue un rôle potentiellement important pour les écosystèmes profonds (Adams et al, 2011) (Figure 4-54).

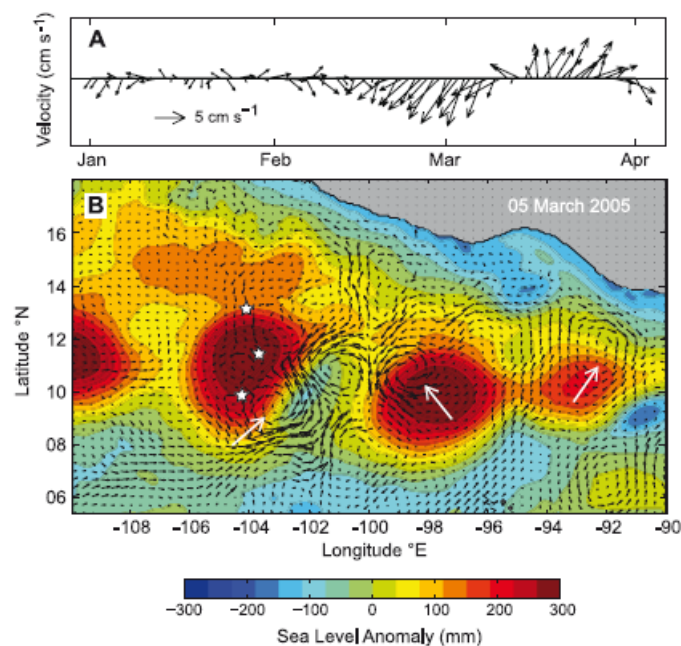


Figure 4-54 Simulation des courants de fond générés par des structures tourbillonnaires formées par un forçage atmosphérique cyclonique au large de la côte Ouest du Mexique (Adams et al, 2011).

A : vitesse et orientation du courant en un point à 2350 m, B : champ de vitesse à l'échelle régionale. Ces simulations sont en accord avec les enregistrements réalisés en point fixe près du fond sur la dorsale est-Pacifique, identifiés par les étoiles.

Observations de la circulation océanique profonde à mésoéchelle

La structure à mésoéchelle des courants profonds reste très mal connue du fait du manque d'observations systématiques. Dans les régions équatoriales, l'existence de jets équatoriaux à des profondeurs intermédiaires s'étendant jusqu'à au moins 1200 m de profondeur a été mise en évidence de façon ponctuelle à partir de programmes dédiés (Bunge et al, 2008). Aujourd'hui, l'observation de ces jets est plus accessible grâce aux profileurs Argo dont la profondeur de «garage» est de 1000 à 1500 m. Cravatte et coll. (2012) ont ainsi pu cartographier des structures de haute résolution des courants océaniques moyens à 1000 m et

1 500 m de profondeur dans la zone équatoriale de 12°S à 12°N (Figure 4-55). Ces auteurs montrent que les jets équatoriaux profonds intercalés tous les 150 km environ caractérisent la circulation profonde moyenne, dirigés soit d'ouest en est, soit d'est en ouest, avec des vitesses de 5-10 cm/s. Ces structures sont plus marquées dans l'ouest et le centre du bassin et dans l'hémisphère sud, à proximité notamment de la Papouasie Nouvelle Guinée (Figure 4-56), et varient de manière saisonnière sous influence d'ondes de Rosby sous l'effet des vents. Ces résultats très récents illustrent la complexité et la variabilité de la circulation océanique à l'échelle régionale, notamment dans l'Ouest Pacifique qui concentre de nombreux sites d'intérêt pour les activités minières. En dessous de ces profondeurs, les connaissances sont encore très largement parcellaires.

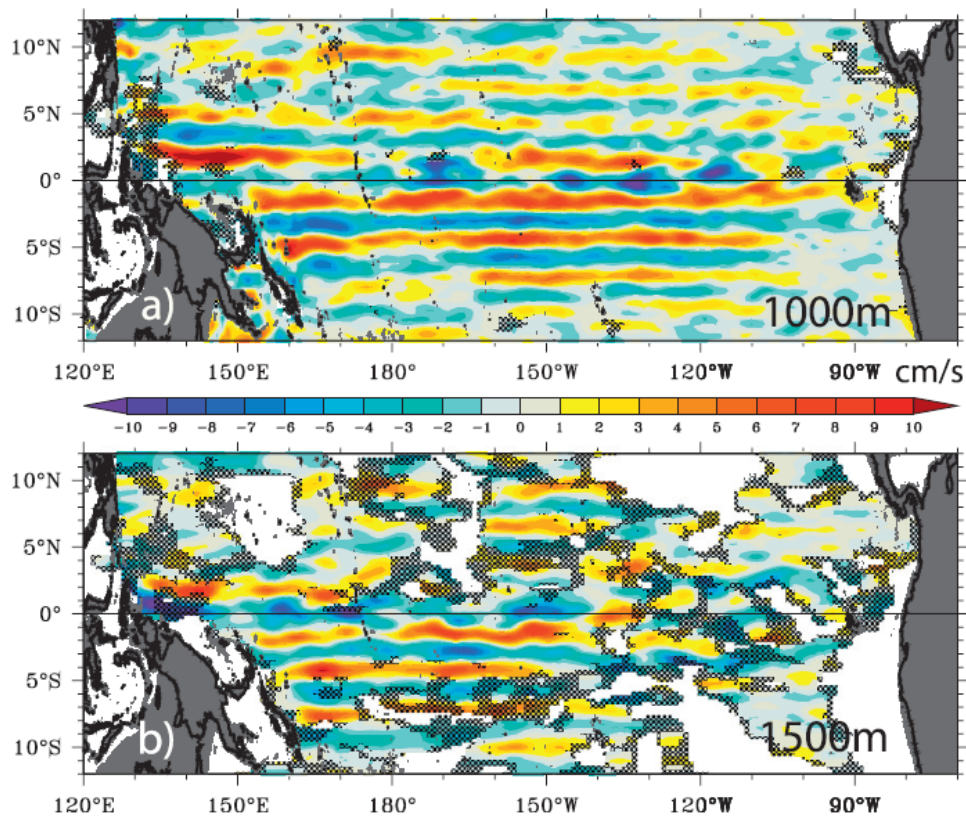


Figure 4-55 Courants moyens à 1000 (a) et 1500 m (b) obtenus par interpolation des mesures acquises par des flotteurs ARGO (Cravatte et al, 2012).

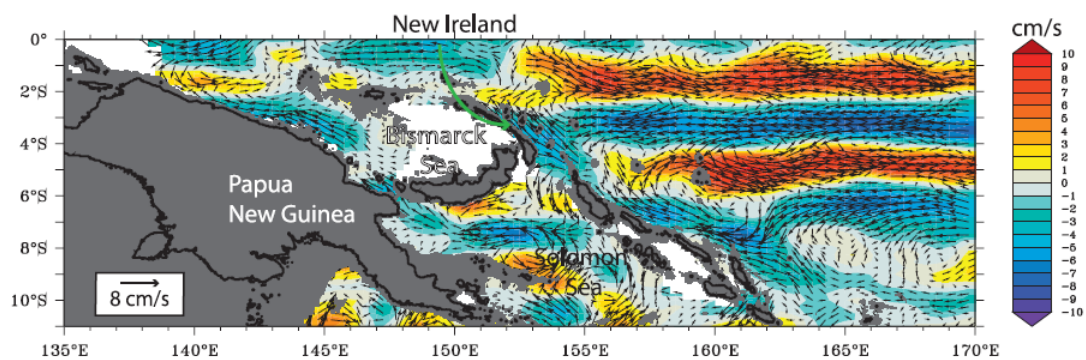


Figure 4-56 Carte des courants zonaux dans la région de Papouasie Nouvelle Guinée (fonds inférieurs à 1000 m en grisé).

La Mer de Bismarck en blanc indique l'absence de données Argo.

Effets de l'hydrodynamique sur les écosystèmes

De l'échelle locale à l'échelle régionale, ce couplage entre topographie et hydrodynamique des eaux profondes est fondamental dans les relations entre écosystèmes adjacents. S'il n'y a pas nécessairement de relation directe ni exclusive avec l'existence d'encroûtements cobaltifères ou de dépôts de sulfures, ces phénomènes sont susceptibles d'être à l'œuvre partout dans ces zones. En effet, le contexte régional de circulation les favorise, compte-tenu de la topographie des environnements dans lesquels sont rencontrées ces ressources minérales (monts sous-marins ou flancs de dorsales).

Cet hydrodynamisme à m ésoéchelle est un élément déterminant dans le **contrôle du transport larvaire** entre écosystèmes du même type mais disjoints spatialement (Etter and Mullineaux, 2001). A ce titre, il joue un rôle majeur dans la connectivité entre populations d'espèces sinon endémiques, au moins spécifiques d'habitats associés aux ressources minérales, comme les monts sous-marins ou les sources hydrothermales comme évoqué précédemment.

Les structures hydrodynamiques particulières formées par les monts sous-marins et les dorsales sont également connues pour favoriser **l'import vers la surface de nutriments minéraux et l'export vers le fond de matière organique** produite en surface (Figure 4-57), formant des points chauds de diversité et d'abondance dans la colonne d'eau. L'influence des monts sous-marins, démontrée par les analyses de données de captures de pêche à l'échelle globale, s'étendrait ainsi jusqu'à 30 à 40 km du sommet (Morato et al, 2010).

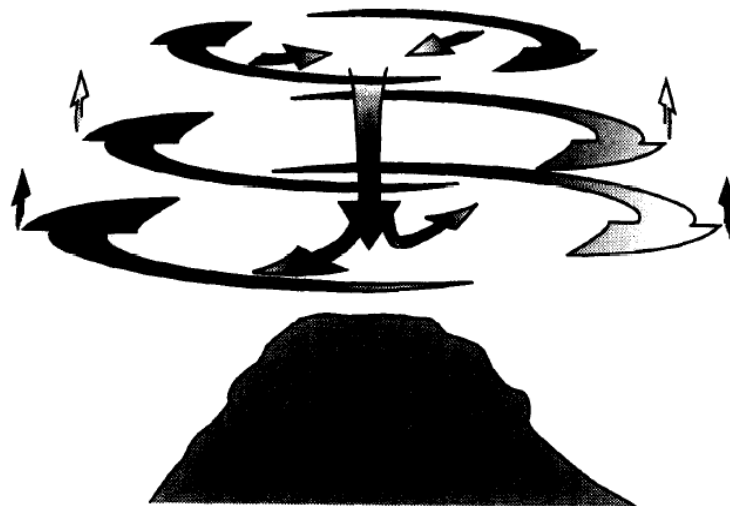


Figure 4-57 Schéma des structures hydrodynamiques associées aux monts sous-marins (Mullineaux and Mills, 1997).

C'est le cas également pour les dorsales océaniques, même si cette influence sur les écosystèmes benthiques adjacents est nettement moins documentée du fait d'un nombre restreint d'études. La synthèse des travaux du programme MAR-Eco (Census of Marine Life) sur la dorsale médio-atlantique identifie cette influence en termes d'abondance et de distribution pour plusieurs composantes de l'écosystème pélagique (Bergstad et al, 2008). A partir de l'étude de la structure verticale de la diversité et de la biomasse des poissons pélagiques profonds en relation avec la topographie, Sutton et coll. (2008) montrent une biomasse maximale entre 1500 et 2300 m et concluent à l'influence significative des propriétés dynamiques et biologiques spécifiques des milieux pélagiques associés à cette dorsale, au regard de ceux connus à même profondeur sur les marges continentales. Les mécanismes sont moins connus et pourraient refléter surtout l'écoulement des différentes

masses d'eau de part et d'autre de la dorsale comme le montre la cohérence entre la diversité du macrozooplancton et les propriétés des masses d'eau décrites dans ce même programme par Stemmann et coll. (2008).

Au niveau des **environnements benthiques adjacents**, l'un des éléments importants à prendre en compte est l'existence de populations abondantes de coraux sur les substrats rocheux des flancs de dorsales et des monts sous-marins. Largement répandus dans les fonds océaniques, les coraux froids sont principalement rencontrés sur les marges continentales, le flanc des îles océaniques, les monts sous-marins et les dorsales (Cairns, 2007; Wareham and Edinger, 2007; Molodtsova et al, 2008; Mortensen et al, 2008; Reveillaud et al, 2008; Baker et al, 2012; Braga-Henriques et al, 2013). Mais en raison des difficultés d'exploration en haute mer, la présence de coraux froids est mieux documentée sur les marges continentales (en bordure de plateau continental, dans les canyons) que sur les monts sous-marins ou les dorsales médio-océaniques. Pourtant, les environnements où sont présentes les ressources minérales peuvent constituer un habitat propice aux coraux froids et aux nombreuses espèces associées. C'est par exemple le cas sur les systèmes hydrothermaux inactifs de Papouasie Nouvelle Guinée, colonisés par une riche biodiversité de suspensivores, dont des coraux bambous (Erickson et al, 2009). Des investigations menées à grande échelle sur la dorsale médio-atlantique ont révélé la présence d'une quarantaine d'espèces de coraux froids entre la partie sud de la ride de Reykjanes et les Açores (Mortensen et al, 2008). Les octocoralliaires dominent, mais *L. pertusa*, une espèce constructrice de récif, est également présente et associée avec une mégafaune (crinoïdes, éponges, bivalves, galathées) 1,6 fois plus importante dans ces habitats coralliens que dans les zones dépourvus de coraux. Les écosystèmes hydrothermaux carbonatés associés à des sources d'hydrogène supportées par des processus de serpentinisation comme Lost City fournissent aussi des habitats propices à l'établissement de coraux froids (Kelley et al, 2001).

La dimension régionale du mélange vertical des masses d'eau commence à être mieux connue et révèle l'importance potentielle de l'hydrodynamique à mésoéchelle dans le transport de matière entre écosystèmes benthiques et pélagiques adjacents. Jusqu'à présent peu prise en compte, l'influence de la topographie sur la courantométrie locale apparaît comme un élément-clé du fonctionnement des écosystèmes impactés, de la capacité de maintien des populations par la dispersion de larves, et du transport de particules et composés minéraux dissous. La densité des espèces suspensivores qui dominent les environnements périphériques des sites hydrothermaux actifs ou encore les flancs de monts sous-marins met par ailleurs l'accent sur les implications locales de ces phénomènes hydrodynamiques, tant sur la diversité des apports de matière organique que sur les propriétés physico-chimiques des habitats.

4.4.3.3. Influences directes et indirectes sur le cycle du carbone océanique

Le rôle de la circulation hydrothermale dans la composition géochimique des masses d'eaux océaniques est connu (GEOTRACE, 2007). La signature des émissions hydrothermales s'étend sur de très larges échelles dans l'océan, comme le montrent les anomalies isotopiques d'hélium, considéré comme traceur stable des fluides (Figure 4-58), ou l'enrichissement du fer issu de l'hydrothermalisme dans les sédiments, détectables à plusieurs milliers de kilomètres de dorsales. Pour autant, ces anomalies géochimiques ne reflètent pas nécessairement un impact fort des émissions hydrothermales sur les cycles biogéochimiques directement ou indirectement liés au cycle du carbone dans la colonne d'eau car les échelles temporelles ayant conduit à ces enrichissements sont longues.

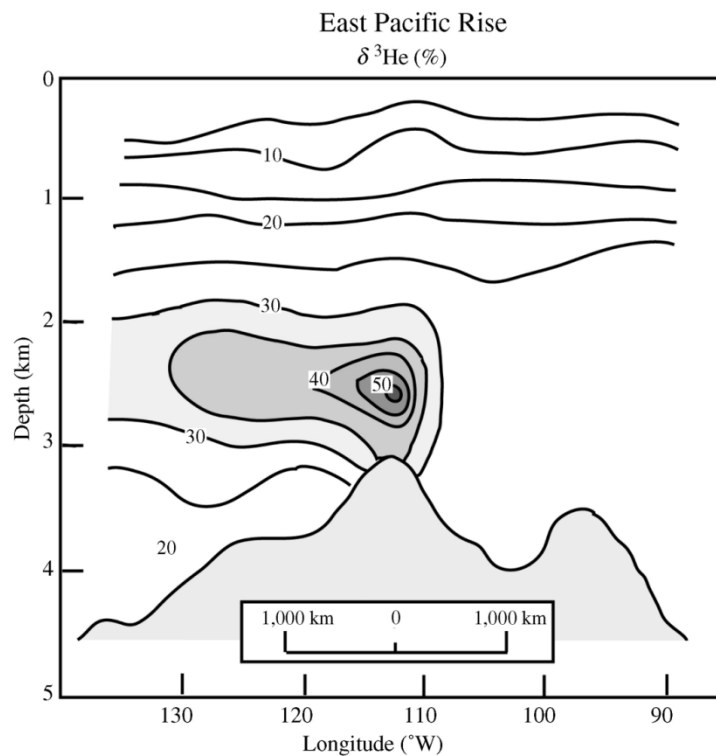


Figure 4-58 Profils d'hélium à grande échelle traçant les émissions hydrothermales issues de la dorsale Pacifique, illustrant l'étendue des panaches hydrothermaux dans l'océan. (German and Von Damm, 2004)

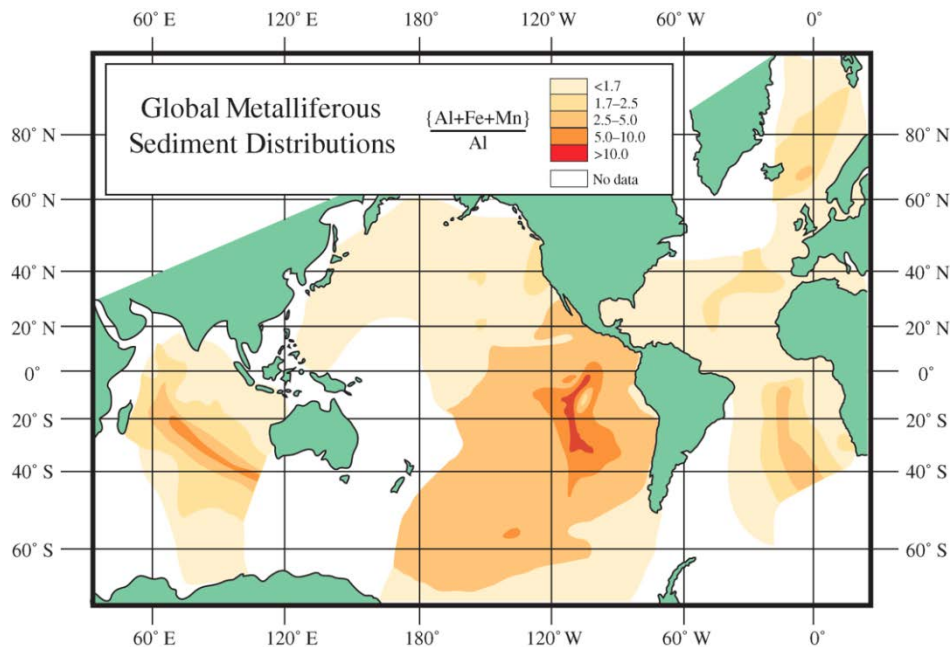


Figure 4-59 Carte des anomalies en fer dans les sédiments du Pacifique (German and Von Damm, 2004).

A l'échelle globale, la circulation hydrothermale est un processus géologique très lent et on estime à 1 million d'années l'échelle de temps nécessaire à la circulation de la totalité du volume de l'océan dans la croûte océanique. Compte-tenu des échelles caractéristiques de la circulation thermo-haline globale (millier d'années), les modifications des propriétés des eaux océaniques globales sont donc beaucoup plus directement influencées par les interactions avec les continents et l'atmosphère que par ce processus. Cependant, les panaches hydrothermaux enrichis en de nombreux composés actifs dans le cycle du carbone océanique interagissent avec les masses d'eau sur des échelles plus courtes. Kadko et coll. (1995) reportent des études ponctuelles, estimant un temps de résidence des eaux océaniques dans les panaches hydrothermaux de l'ordre de 2800 ans, beaucoup plus comparable aux temps de résidence des eaux profondes. De plus, l'influence peut être importante sur les bilans régionaux de carbone et, en se combinant à la circulation à mésoéchelle, influencer le cycle global du carbone au-delà de l'estimation moyenne. Si les échelles spatiales et temporelles et l'importance relative de ce phénomène restent débattues, et surtout insuffisamment connues, il est acquis que la circulation hydrothermale dans les régions du plancher océanique interagit de plusieurs manières avec le cycle du carbone océanique (Orcutt et al, 2011).

Sources de carbone à l'océan

Localement, les fluides hydrothermaux sont des sources abondantes de carbone à l'océan sous forme de CO₂ et de méthane. L'inventaire de ces sources publié par Kadko et coll. (1995) est certainement incomplet, dans la mesure où le nombre de champs hydrothermaux connus est bien plus important aujourd'hui, mais souligne leur importance potentielle à l'échelle régionale.

L'origine de ces gaz majeurs dans les fluides hydrothermaux est multiple et dépend également du substrat et des conditions de pression et température. Les fluides issus des systèmes localisés dans les bassins arrière-arc sont en général très riches en CO₂ (jusqu'à 70 mM) qui provient directement du fluide magmatique (dégazage). Un apport en CO₂ par le fluide magmatique est également possible sur les dorsales au niveau des sites basaltiques (ex. localisés sur des basaltes). *A contrario*, les monts ou diapirs ultrabasiques (localisés sur des roches du manteau) dégazent majoritairement du CH₄ (jusqu'à 2,5 mM) et du CO₂ dans une

moindre mesure. Ce méthane est un sous-produit de l'oxydation du CO_2 par l'hydrogène, enrichi dans ces fluides (jusqu'à 16mM). H_2 est un produit direct de l'altération des péridotites du manteau par l'eau (serpentinisation), alors que CH_4 est produit en partie par la réaction catalytique et abiogénique de Sabatier : $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction constitue une forme de fixation primaire abiotique du carbone, c'est à dire l'extraction du carbone d'une source minérale (eau, air, roches) et la conversion de ce carbone inorganique en carbone organique, c'est-à-dire l'incorporation dans des molécules organiques qui sont formées de carbone, oxygène, hydrogène et azote. Ce carbone va donc pouvoir être utilisable pour des organismes ou pour la synthèse de molécules organiques plus complexes.

Dès 1980, la possibilité de synthèse abiogénique dans les systèmes hydrothermaux ultramafiques fut suggérée par Corliss et coll. (1979). De nombreuses études théoriques (thermodynamique) et expérimentales démontrent la faisabilité de produire des molécules organiques de manière abiogénique en conditions hydrothermales. Peu d'études de terrain ont été faites mais la présence d'hydrocarbures aliphatiques, hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques ainsi que d'acides gras linéaires dans les fluides est certaine. Par contre, l'origine abiogénique de ces composés dans les fluides hydrothermaux naturels n'est pas encore prouvée. Il semble qu'une partie des hydrocarbures aliphatiques soit d'origine abiogénique, mais les autres composés proviendraient plutôt de la dégradation thermogénique de matière organique présente dans les aquifères de subsurface.

Les études actuelles n'ont pas encore permis de déterminer précisément la concentration de ces composés dans les fluides mais elle serait de l'ordre du ppb ou ppt selon les espèces. La présence de ces molécules organiques dans la colonne d'eau est importante en termes de biologie, microbiologie, cycles géochimiques, transport des métaux. Ces molécules carbonées entrent directement dans le cycle du carbone. D'autre part elles peuvent constituer une source directe de carbone ou d'énergie pour la microflore. Elles peuvent aussi jouer un rôle de ligand et ainsi former des complexes organométalliques qui peuvent modifier les cycles biogéochimiques des métaux en agissant sur leur mode de transport, en empêchant leur oxydation ou leur précipitation, en les rendant biodisponibles, comme précisé dans le paragraphe suivant.

Influence sur le bilan océanique de fer

Plusieurs études récentes ont également cherché à mieux contraindre l'influence des panaches hydrothermaux sur la fertilisation des eaux océaniques, notamment dans les régions où le fer est un élément limitant pour la photosynthèse de surface.

Les premiers modèles de la cinétique d'oxydation du fer émis par les panaches hydrothermaux concluaient à leur dépôt à proximité immédiate (moins de quelques kilomètres) des zones actives, par formation de colloïdes d'oxydes de fer puis agrégation et sédimentation des particules (Field and Sherrell, 2000). Les travaux récents ont remis en question cette hypothèse et s'interrogent sur la contribution des émissions hydrothermales à la fertilisation des eaux océaniques (Bennett et al, 2008). La complexité de la composition organique et minérale des panaches hydrothermaux détermine la capacité d'export à grande échelle des éléments biologiquement actifs et en particulier du fer (Breier et al, 2012). Les complexes organiques semblent stabiliser le fer sous forme de colloïdes et permettre son maintien dans la masse d'eau sur de plus grandes échelles de temps (Bennett et al, 2008; Toner et al, 2009). La présence de nanoparticules dans les panaches des fumeurs hydrothermaux, récemment mise en évidence (Yücel et al, 2011), suggère que la fraction minérale peut contribuer aussi à ces formes transportables sur de longues distances.

L'incorporation de ces estimations récentes dans un modèle de circulation océanique suggère que le fer issu des émissions hydrothermales pourrait jouer un rôle tampon dans le maintien de la réserve en fer dans les eaux profondes (Tagliabue et al, 2010). Ce rôle concerne cependant les échelles temporelles longues qui caractérisent la circulation des masses d'eau dans les bassins océaniques.

L'émission de fer au niveau des sources peu profondes est plus susceptible de favoriser directement la production primaire photosynthétique de surface, particulièrement dans ces zones riches en nutriments, qui dans un second temps alimenterait la faune benthique hydrothermale (Thorseth, Pedersen et al, 2007). En effet, une grande quantité de dépôts de fer siliceux est présente autour des sources hydrothermales de haute température aboutissant à de fortes concentrations en fer dans la colonne d'eau (Thorseth, Pedersen et al, 2007).

Fixation chimioautotrophe du CO₂ en dehors des zones hydrothermales actives

La contribution au cycle du carbone des eaux océaniques des activités hydrothermales ne se limite pas à la proximité immédiate des sources hydrothermales sur le plancher océanique. L'activité microbienne renforcée dans les panaches se traduit par une production de biomasse à partir de carbone inorganique (chimioautotrophe) et une influence locale sur les cycles de l'azote et du manganèse. Ces processus microbiens commencent à être étudiés par des méthodes de génomique environnementale permettant de mieux comprendre les mécanismes biogéochimiques associés (Lam et al, 2008; Dick et Tebo 2010).

Par ailleurs, il existe, même en dehors de l'axe des dorsales, des circulations d'eau de mer dans la croûte océanique ou dans les sédiments, par convection lors du refroidissement des roches sur les flancs de dorsale ou sous l'effet du forçage hydrodynamique créé par un mont sous-marin (Figure 4-60). Les composés chimiques réduits utilisables par les micro-organismes pour fixer le CO₂ en carbone organique y sont moins diversifiés que sur les zones actives (cf.4.3) et les flux associés sont plus faibles, mais il est établi que le fer et le soufre présents sous forme réduite dans les basaltes ou dans les zones anoxiques des sédiments peuvent soutenir le développement de micro-organismes. La fixation de CO₂ par les micro-organismes chimiolithoautotrophes pourrait alors jouer un rôle non négligeable dans le bilan de carbone global compte-tenu de l'importance en volume de ces réservoirs lithosphériques (sédiments ou croûte océanique) (Edwards et al, 2005). Les auteurs de cette synthèse ont souligné l'importance de ce qui apparaît comme un changement de paradigme dans l'évaluation du cycle du carbone océanique. La dimension régionale de ces phénomènes, c'est-à-dire à l'échelle d'une chaîne de monts sous-marins, tels que ceux ciblés par les activités minières, n'est pas connue.

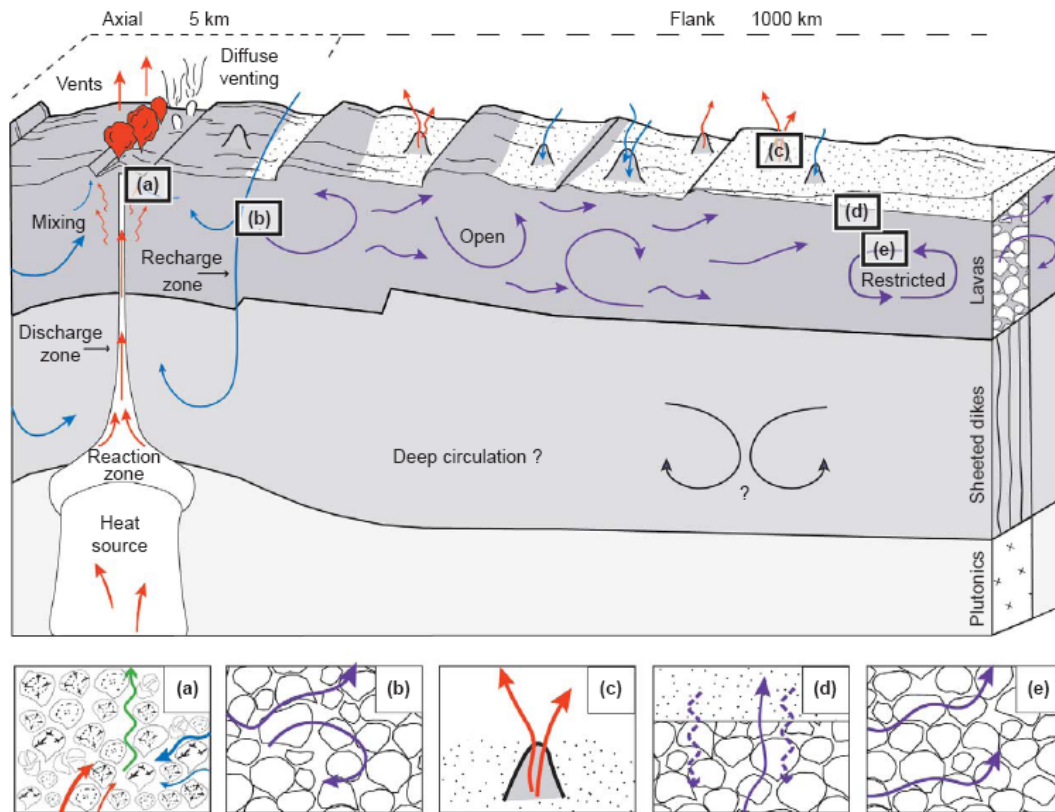


Figure 4-60 Schéma des différents régimes de circulation de fluides de la croûte océanique (Edwards et al, 2005).

(a) sources hydrothermales à l'axe des dorsales médio-océanique, (b) zones dites de recharge hydrothermale sur les flancs de dorsales, (c) circulations d'eau de mer dans les sédiments associés aux monts sous-marins. (d) et (e) représentent les processus de production et de reminéralisation de la matière organique associant matière organique des sédiments et minéraux de la croûte océanique.

Si de plus en plus d'études s'interrogent sur la contribution au cycle du carbone global des processus chimiosynthétiques dans les régions obscures des océans, l'importance régionale de ces phénomènes n'a été considérée jusqu'à présent que de manière anecdotique. Pour autant, les émissions locales de CO₂ issues de l'activité magmatique ou de méthane formé par l'interaction des roches du manteau et de l'eau de mer peuvent constituer localement des flux importants, eux-mêmes régulés par les communautés chimiosynthétiques. Le fer et d'autres métaux biologiquement actifs, issus des émissions hydrothermales ou de la remobilisation de formes labiles, contribuent aussi potentiellement à la fertilisation des eaux de surface océaniques. Pour l'instant, l'importance de ce phénomène n'est considéré que sur de larges échelles temporelles et mais des effets plus locaux sur la colonne d'eau avec des pas de temps plus courts sont suggérés, notamment dans les zones côtières ou de moyenne profondeur.

4.5 Conclusion

Ce chapitre présente l'état des connaissances sur la biodiversité et les écosystèmes associés aux ressources minérales. La synthèse est basée sur une analyse bibliographique ciblée des articles publiés dans des revues scientifiques internationales. L'analyse bibliométrique de cette production scientifique montre un fort accroissement de l'effort de recherche au cours des deux dernières décennies. **Le domaine est relativement récent et encore largement dominé par les pays pionniers dans le développement des moyens submersibles de grande profondeur dédiés à l'exploration scientifique. Cependant, la communauté scientifique française fait partie des acteurs majeurs du domaine, rejoints dans la dernière décennie par d'autres pays acteurs en Europe, Asie ou Amérique, dont plusieurs pays émergents.**

L'étude de la biodiversité et des écosystèmes, à l'exception des champs de nodules, n'a pas été directement liée à la question des ressources et des impacts mais plutôt à l'exceptionnelle biodiversité des milieux marins profonds qui leur est associée : plaines abyssales, sources hydrothermales et monts sous-marins. Les conditions environnementales qui leur sont propres, souvent extrêmes au regard des conditions moyennes de l'océan, exercent des contraintes auxquelles se sont adaptées les espèces au cours de l'évolution, fournissant de nombreux modèles d'étude de mécanismes évolutifs, physiologiques et écologiques.

La diversité des espèces dans les environnements profonds associés aux ressources minérales est importante, car elle est le miroir de l'hétérogénéité des habitats en termes de contraintes physico-chimiques et de multiples sources d'énergie exploitées par les communautés profondes. D'une manière générale, cet inventaire reste largement incomplet, malgré les progrès considérables réalisés grâce aux outils de la microbiologie et de la taxinomie moléculaires et les moyens accrus d'exploration tels que les ROVs. La description récente de communautés hydrothermales originales et de nombreuses espèces nouvelles, sur un nombre croissant de dorsales océaniques et de zones de subduction, révèle en effet l'ampleur de ce patrimoine biologique et sa complexité biogéographique. **Les efforts d'inventaires sont cependant très inégaux et les connaissances manquent encore largement pour de nombreux compartiments tels que la faune et la flore microbienne des environnements hydrothermaux anciens éloignés des zones actives ou la microbiologie des environnements de nodules et des encroûtements.**

Sur le plan du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes, les études à long terme sur des sites ateliers ont permis d'identifier des caractères dynamiques marqués, même pour des environnements géologiquement stables, comme les plaines abyssales, soumis à des fluctuations saisonnières de la ressource. Des différences majeures de la structure des communautés et des réseaux trophiques distinguent les écosystèmes, liés aux apports de matière d'origine planctonique, des zones à nodules et à encroûtements et de ceux des sulfures qui bénéficient d'une production microbienne locale. L'importance de la découverte d'écosystèmes chimiosynthétiques, indépendants de la photosynthèse de surface des océans, a conduit à une concentration des efforts sur la diversité des micro-organismes et des associations symbiotiques à la base de communautés hydrothermales particulièrement prolifiques. **Parmi les manques identifiés, l'intégration des connaissances impliquant d'autres types d'interactions, comme les transformations biogéochimiques des métaux ou le rôle de la méiofaune et d'espèces ingénieuses dans les processus de transfert d'énergie et de structuration de l'habitat, est clairement soulignée.** De même l'appréhension des relations entre biodiversité et fonctions écologiques sur des échelles plus larges qui implique les relations entre écosystèmes adjacents n'est pour l'instant considérée que sur des questions très spécifiques comme l'impact des panaches hydrothermaux.

Seule une fraction réduite de la production scientifique appréhende directement les questions de ressources et d'impacts. Les grands programmes de recherche associés aux projets d'exploitation des nodules dans les plaines abyssales, dans les années 1990-2000 forment l'essentiel de ce corpus. En plus de l'identification d'un grand nombre d'espèces nouvelles, les résultats révèlent la difficulté d'approches statistiques robustes permettant une comparaison entre ces études. Cependant, un nombre croissant d'articles considère les impacts potentiels de l'exploitation des sulfures hydrothermaux, en se basant très largement sur les connaissances actuelles des interactions entre espèces et en soulignant les limites de l'extrapolation d'un écosystème à l'autre.

Acronymes

ADN	Acide DesoxyriboNucléique
ANME	Anaerobic methanotrophic archaea
AOM	Anaerobic oxidation of methane (Oxydation Anaérobique du Méthane)
CIR	Central Indian Ridge
EPR	Est Pacific Rise (Dorsale Est Pacifique)
FTT	Fischer-Tropsch-Type
ISA	International Seabed Authority
ISCS	<i>In Situ</i> Colonization System
MAR	Mid-Atlantic Ridge (Ride Médio-atlantique)
NEP	Nord-East Pacific
NWIR	North-West indian Ridge
PCR	Polymerase Chain Reaction
rTCA cycle	reverse TriCarboxylic Acid cycle
RuBisCo	ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase
SRB	Sulfate Reducing Bacteria (bactéries sulfato-réductrices)
TAG	Trans-Atlantic Geotraverse

Bibliographie

- Adams, D. K., D. J. McGillicuddy, L. Zamudio, A. M. Thurnherr, X. Liang, O. Rouxel, C. R. German and L. S. Mullineaux (2011). "Surface-generated mesoscale eddies transport deep-sea products from hydrothermal vents." *science* 332(6029): 580-583.
- Ahnert, A. and G. Schriever (2001). "Response of a byssal Copepoda Harpacticoida (Crustacea) and other meiobenthos to an artificial disturbance and its bearing on future mining for polymetallic nodules." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 48(17-18): 3779-3794.
- Alain, K., A. Postec, E. Grinsard, F. Lesongeur, D. Prieur and A. Godfroy (2010). "Thermodesulfator atlanticus sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, sulfate-reducing bacterium isolated from a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 60(1): 33-38.
- Alain, K., J. Querellou, F. Lesongeur, P. Pignet, P. Crassous, G. Raguénès, V. Cueff and M.-A. Cambon-Bonavita (2002). "Caminibacter hydrogeniphilus gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic, hydrogen-oxidizing bacterium isolated from an East Pacific Rise hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(4): 1317-1323.
- Alain, K., M. Olagnon, D. Desbruyères, A. Page, G. Barbier, S. K. Juniper, J. Quérellou and M. A. Cambon-Bonavita (2002). "Phylogenetic characterization of the bacterial assemblage associated with mucous secretions of the hydrothermal vent polychaete *Paralvinella palmiformis*." *FEMS microbiology ecology* 42(3): 463-476.
- Alain, K., P. Pignet, M. Zbinden, M. Quillever, F. Duchiron, J.-P. Donval, F. Lesongeur, G. Raguènes, P. Crassous and J. Querellou (2002). "Caminicella sporogenes gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic spore-forming bacterium isolated from an East-Pacific Rise hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(5): 1621-1628.
- Alain, K., S. Rolland, P. Crassous, F. Lesongeur, M. Zbinden, C. Le Gall, A. Godfroy, A. Page, S. K. Juniper and M.-A. Cambon-Bonavita (2003). "Desulfurobacterium crinifex sp. nov., a novel thermophilic, pinkish-streamer forming, chemolithoautotrophic bacterium isolated from a Juan de Fuca Ridge hydrothermal vent and amendment of the genus *Desulfurobacterium*." *Extremophiles* 7(5): 361-370.
- Alain, K., V. T. Marteinsson, M. L. Miroshnichenko, E. A. Bonch-Osmolovskaya, D. Prieur and J.-L. Birrien (2002). "Marinitoga piezophila sp. nov., a rod-shaped, thermo-piezophilic bacterium isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(4): 1331-1339.
- Alazard, D., S. Dukan, A. Urios, F. Verhé, N. Bouabida, F. Morel, P. Thomas, J.-L. Garcia and B. Ollivier (2003). "Desulfovibrio hydrothermalis sp. nov., a novel sulfate-reducing bacterium isolated from hydrothermal vents." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(1): 173-178.
- Amend, J. P., T. M. McCollom, M. Hentscher and W. Bach (2011). "Catabolic and anabolic energy for chemolithoautotrophs in deep-sea hydrothermal systems hosted in different rock types." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75(19): 5736-5748.
- Ansari, Z. A. (2000). "Distribution of deep-sea benthos in the proposed mining area of Central Indian Basin." *Marine georesources & geotechnology* 18(3): 201-207.

- Arab, H., H. Völker and M. Thomm (2000). "Thermococcus aegaeicus sp. nov. and Staphylothermus hellenicus sp. nov., two novel hyperthermophilic archaea isolated from geothermally heated vents off Palaeochori Bay, Milos, Greece." *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 50(6): 2101-2108.
- Arcuri, E. J. and H. L. Ehrlich (1977). "Influence of hydrostatic pressure on the effects of the heavy metal cations of manganese, copper, cobalt, and nickel on the growth of three deep-sea bacterial isolates." *Applied and environmental microbiology* 33(2): 282-288.
- Arndt, C., F. Gaill and H. Felbeck (2001). "Anaerobic sulfur metabolism in thiotrophic symbioses." *Journal of Experimental Biology* 204(4): 741-750.
- Arp, A. J. and J. J. Childress (1981). "Blood function in the hydrothermal vent vestimentiferan tube worm." *Science* 213(4505): 342-344.
- Arp, A. J. and J. J. Childress (1983). "Sulfide binding by the blood of the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila*." *Science* 219(4582): 295-297.
- Arp, A. J., J. J. Childress and R. D. Vetter (1987). "The sulphide-binding protein in the blood of the vestimentiferan tube-worm, *Riftia pachyptila*, is the extracellular haemoglobin." *Journal of Experimental Biology* 128(1): 139-158.
- Audiffrin, C., J.-L. Cayol, C. Joulian, L. Casalot, P. Thomas, J.-L. Garcia and B. Ollivier (2003). "*Desulfonauticus submarinus* gen. nov., sp. nov., a novel sulfate-reducing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(5): 1585-1590.
- Audzijonyte, A. and R. C. V. rijenhoek (2010). "When gaps really are gaps: statistical phylogeography of hydrothermal vent invertebrates." *Evolution* 64(8): 2369-2384.
- Auzende, J. M. (1996). "Cruise explores hydrothermal vents of the Manus basin." *Eos* 77(26): 244.
- Auzende, J. M. and T. Urabe (1996). "Cruise explores hydrothermal vents of the Manus Basin." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 77(26): 244-244.
- Auzende, J., J. Rissen, Y. Lafoy, P. Gente and J. Charlou (1988). "Seafloor spreading in the north Fiji basin (Southwest Pacific)." *Tectonophysics* 146(1): 317-352.
- Bach, W. and K. J. Edwards (2003). "Iron and sulfide oxidation within the basaltic ocean crust: implications for chemolithoautotrophic microbial biomass production." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(20): 3871-3887.
- Bach, W., H. Paulick, C. J. Garrido, B. Ildefonse, W. P. Meurer and S. E. Humphris (2006). "Unraveling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15 ° N (ODP Leg 209, Site 1274)." *Geophysical Research Letters* 33(13).
- Bachraty, C., P. Legendre and D. Desbruyeres (2009). "Biogeographic relationships among deep-sea hydrothermal vent faunas at global scale." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 56(8): 1371-1378.
- Baker, E. T. and S. R. Hammond (1992). "Hydrothermal venting and the apparent magmatic budget of the Juan de Fuca Ridge." *J. Geophys. Res.* 97: 3443-3456.
- Baker, E. T., G. J. Massoth, R. A. Feely, R. W. Embley, R. E. Thomson and B. J. Burd (1995). "Hydrothermal event plumes from the CoAxial seafloor eruption site, Juan de Fuca Ridge." *Geophysical Research Letters* 22(2): 147-150.

- Baker, E., J. Lavelle, R. Feely, G. Massoth, S. Walker and J. Lupton (1989). "Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 94(B7): 9237-9250.
- Baker, K. D., V. E. Wareham, P. V. Snelgrove, R. L. Haedrich, D. A. Fifield, E. N. Edinger and K. D. Gilkinson (2012). "Distributional patterns of deep-sea coral assemblages in three submarine canyons off Newfoundland, Canada." *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 445: 235-249.
- Banerjee, R. (2000). "A documentation on burrows in hard substrates of ferromanganese crusts and associated soft sediments from the Central Indian Basin." *Current Science* 79(4): 517-521.
- Bass, D., A. Howe, N. Brown, H. Barton, M. Demidova, H. Michelle, L. Li, H. Sanders, S. C. Watkinson, S. Willcock and T. A. Richards (2007). "Yeast forms dominate fungal diversity in the deep oceans." *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 274(1629): 3069-3077.
- Bates, A. E., R. W. Lee, V. Tunnicliffe and M. D. Lamare (2010). "Deep-sea hydrothermal vent animals seek cool fluids in a highly variable thermal environment." *Nature Communications* 1.
- Bates, A. E., V. Tunnicliffe and R. W. Lee (2005). "Role of thermal conditions in habitat selection by hydrothermal vent gastropods." *Marine Ecology Progress Series* 305: 1-15.
- Beinart, R. A., J. G. Sanders, B. Faure, S. P. Sylva, R. W. Lee, E. L. Becker, A. Gartman, G. W. Luther, J. S. Seewald and C. R. Fisher (2012). "Evidence for the role of endosymbionts in regional-scale habitat partitioning by hydrothermal vent symbioses." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(47): E3241-E3250.
- Bell, N. and J. Smith (1999). "Coral growing on North Sea oil rigs." *Nature* 402(6762): 601-601.
- Bennett, S. A., E. P. Achterberg, D. P. Connelly, P. J. Statham, G. R. Fones and C. R. German (2008). "The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes." *Earth and Planetary Science Letters* 270(3): 157-167.
- Bergstad, O., T. Falkenhaus, O. Astthorsson, I. Byrkjedal, A. Gebruk, U. Piatkowski, I. Priede, R. Santos, M. Vecchione and P. Lorange (2008). "Towards improved understanding of the diversity and abundance patterns of the mid-ocean ridge macro- and megafauna." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55(1): 1-5.
- Bernardino, A. F., L. A. Levin, A. R. Thurber and C. R. Smith (2012). "Comparative composition, diversity and trophic ecology of sediment macrofauna at vents, seeps and organic falls." *PloS one* 7(4): e33515.
- Biddle, J. F., Z. Cardman, H. Mendlovitz, D. B. Albert, K. G. Lloyd, A. Boetius and A. Teske (2011). "Anaerobic oxidation of methane at different temperature regimes in Guaymas Basin hydrothermal sediments." *The ISME journal* 6(5): 1018-1031.
- Biddle, J. F., Z. Cardman, H. Mendlovitz, D. B. Albert, K. G. Lloyd, A. Boetius and A. Teske (2012). "Anaerobic oxidation of methane at different temperature regimes in Guaymas Basin hydrothermal sediments." *The ISME journal* 6(5): 1018-1031.
- Bienhold, C., P. P. Ristova, F. Wenzhöfer, T. Dittmar and A. Boetius (2013). "How deep-sea wood falls sustain chemosynthetic life." *PloS one* 8(1): e53590.

- Biscoito, M., A. Almeida and M. Segonzac (2006). "Preliminary biological characterization of the Saldanha hydrothermal field at the Mid-Atlantic Ridge (36° 34'N, 32° 26'W, 2200 m)." *Cahiers de biologie marine* 47(4): 421-427.
- Black, M., R. Lutz and R. Vrijenhoek (1994). "Gene flow among vestimentiferan tube worm (*Riftia pachyptila*) populations from hydrothermal vents of the eastern Pacific." *Marine Biology* 120(1): 33-39.
- Blöchl, E., R. Rachel, S. Burggraf, D. Hafenbradl, H. W. Jannasch and K. O. Stetter (1997). "*Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113 C." *Extremophiles* 1(1): 14-21.
- Bluhm, H. (1994). "Monitoring megabenthic communities in abyssal manganese nodule sites of the East Pacific Ocean in association with commercial deep-sea mining." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 4(3): 187-201.
- Bluhm, H. (2001). "Re-establishment of an abyssal megabenthic community after experimental physical disturbance of the seafloor." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3841-3868.
- Bluhm, H. and A. Gebruk (1999). "Holothuroidea (Echinodermata) of the Peru Basin-Ecological and Taxonomic Remarks Based on Underwater Images." *Marine Ecology* 20(2): 167-195.
- Borowski, C. (2001). "Physically disturbed deep-sea macrofauna in the Peru Basin, southeast Pacific, revisited 7 years after the experimental impact." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3809-3839.
- Borowski, C. and H. Thiel (1998). "Deep-sea macrofaunal impacts of a large-scale physical disturbance experiment in the Southeast Pacific." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 55-81.
- Borowski, C., O. Giere, J. Krieger, R. Amann and N. Dubilier (2002). "New aspects of the symbiosis in the provannid snail *Ifremeria nautilei* from the North Fiji Back Arc Basin." *Cahiers de biologie marine* 43(3/4): 321-324.
- Both, R., K. Crook, B. Taylor, S. Brogan, B. Chappell, E. Frankel, L. Liu, J. Sinton and D. Tiffin (1986). "Hydrothermal chimneys and associated fauna in the Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 67(21): 489-490.
- Bouchet, P. and A. Warén (1991). "*Ifremeria nautilei*, nouveau gastéropode d'évents hydrothermaux, probablement associé à des bactéries symbiotiques." *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie* 312(10): 495-501.
- Bowden, D. A., S. Schiaparelli, M. R. Clark and G. J. Rickard (2011). "A lost world? Archaic crinoid-dominated assemblages on an Antarctic seamount." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 58(1): 119-127.
- Bowles, M. W., L. M. Nigro, A. P. Teske and S. B. Joye (2011). "Denitrification and environmental factors influencing nitrate removal in Guaymas Basin hydrothermally altered sediments." *Frontiers in microbiology* 3: 377-377.
- Braga-Henriques, A., F. Porteiro, P. Ribeiro, V. d. Matos, Í. Sampaio, O. Ocaña and R. Santos (2013). "Diversity, distribution and spatial structure of the cold-water coral fauna of the Azores (NE Atlantic)." *Biogeosciences Discussions* 10(1): 529-590.
- Brazelton, W. J., M. O. Schrenk, D. S. Kelley and J. A. Baross (2006). "Methane-and sulfur-metabolizing microbial communities dominate the Lost City hydrothermal field ecosystem." *Applied and environmental microbiology* 72(9): 6257-6270.

- Breier, J., B. Toner, S. Fakra, M. Marcus, S. White, A. Thurnherr and C. German (2012). "Sulfur, sulfides, oxides and organic matter aggregated in submarine hydrothermal plumes at 9 50' N East Pacific Rise." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 88: 216-236.
- Brock, T. D., K. M. Brock, R. T. Belly and R. L. Weiss (1972). "Sulfolobus: a new genus of sulfur-oxidizing bacteria living at low pH and high temperature." *Archiv für Mikrobiologie* 84(1): 54-68.
- Brooke, S. and C. M. Young (2009). "In situ measurement of survival and growth of *Lophelia pertusa* in the northern Gulf of Mexico." *Mar Ecol Prog Ser* 397: 153-161.
- Brown, C. J., P. J. D. Lamshead, C. R. Smith, L. E. Hawkins and R. Farley (2001). "Phytodetritus and the abundance and biomass of abyssal nematodes in the central, equatorial Pacific." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(2): 555-565.
- Buesseler, K. O., C. H. Lamborg, P. W. Boyd, P. J. Lam, T. W. Trull, R. R. Bidigare, J. K. Bishop, K. L. Casciotti, F. Dehairs and M. Elskens (2007). "Revisiting carbon flux through the ocean's twilight zone." *science* 316(5824): 567-570.
- Bunge, L., C. Provost, B. L. Hua and A. Kartavtseff (2008). "Variability at intermediate depths at the equator in the Atlantic ocean in 2000-06: Annual cycle, equatorial deep jets, and intraseasonal meridional velocity fluctuations." *Journal of Physical Oceanography* 38(8): 1794-1806.
- Burgaud, G., D. Arzur, J. P. Sampaio and G. Barbier (2011). "Candida oceani sp nov., a novel yeast isolated from a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent (-2300 meters)." *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology* 100(1): 75-82.
- Burgaud, G., D. Arzur, L. Durand, M. A. Cambon-Bonavita and G. Barbier (2010). "Marine culturable yeasts in deep-sea hydrothermal vents: species richness and association with fauna." *FEMS microbiology ecology* 73(1): 121-133.
- Burgaud, G., S. Woehlke, V. Rédou, W. Orsi, D. Beaudoin, G. Barbier, J. F. Biddle and V. P. Edgcomb (2013). "Deciphering the presence and activity of fungal communities in marine sediments using a model estuarine system." *Aquatic microbial ecology* 70(1): 45-62.
- Burgaud, G., T. Le Calvez, D. Arzur, P. Vandenkoornhuys and G. Barbier (2009). "Diversity of culturable marine filamentous fungi from deep-sea hydrothermal vents." *Environmental microbiology* 11(6): 1588-1600.
- Burggraf, S., H. W. Jannasch, B. Nicolaus and K. O. Stetter (1990). "Archaeoglobus profundus sp. nov., Represents a New Species within the Sulfate-reducing Archaeobacteria." *Systematic and Applied Microbiology* 13(1): 24-28.
- Burggraf, S., K. Stetter, P. Rouviere and C. Woese (1991). "Methanopyrus kandleri: An Archaeal Methanogen Unrelated to all Other Known Methanogens." *Systematic and applied microbiology* 14(4): 346-351.
- Burnett, B. R. and K. Nealson (1981). "Organic films and microorganisms associated with manganese nodules." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 28(6): 637-645.
- Bussau, C., G. Schriever and H. Thiel (1995). "Evaluation of a byssal metazoan meiofauna from a manganese nodule area of the eastern South Pacific." *Vie et milieu* 45(1): 39-48.
- Byrne, N. (2008). Etude de la diversité métabolique des micro-organismes des sources hydrothermales, Université de Bretagne Occidentale.

- Byrne, N., F. Lesongeur, N. Bienvenu, C. Geslin, K. Alain, D. Prieur and A. Godfroy (2009). "Effect of variation of environmental conditions on the microbial communities of deep-sea vent chimneys, cultured in a bioreactor." *Extremophiles* 13(4): 595-608.
- Byrne, N., M. Strous, V. Crépeau, B. Kartal, J.-L. Birrien, M. Schmid, F. Lesongeur, S. Schouten, A. Jaeschke and M. Jetten (2009). "Presence and activity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria at deep-sea hydrothermal vents." *The ISME journal* 3(1): 117-123.
- Cairns, S. D. (2007). "Deep-water corals: an overview with special reference to diversity and distribution of deep-water scleractinian corals." *Bulletin of Marine Science* 81(3): 311-322.
- Cairns, S. D. and I. G. Macintyre (1992). "Phylogenetic implications of calcium carbonate mineralogy in the Stylasteridae (Cnidaria: Hydrozoa)." *Palaios*: 96-107.
- Callac, N. (2013). "Cycles biogéochimiques du Fer et du Soufre dans les systèmes hydrothermaux en contexte sédimentaire du Bassin de Guaymas: traçages isotopiques et interactions micro-organismes/minéraux." Université de Bretagne Occidentale, Brest, pp. 516.
- Campbell, B. J., A. S. Engel, M. L. Porter and K. Takai (2006). "The versatile epsilon-proteobacteria: key players in sulphidic habitats." *Nature Reviews Microbiology* 4(6): 458-468.
- Canganella, F., et al. (1998). "Thermococcus guaymasensis sp. nov. and Thermococcus aggregans sp. nov., two novel thermophilic archaea isolated from the Guaymas Basin hydrothermal vent site." *International journal of systematic bacteriology* 48(4): 1181-1185.
- Canganella, F., W. J. Jones, A. Gambacorta and G. Antranikian (1998). "Thermococcus guaymasensis sp. nov. and Thermococcus aggregans sp. nov., two novel thermophilic archaea isolated from the Guaymas Basin hydrothermal vent site." *International journal of systematic bacteriology* 48(4): 1181-1185.
- Cary, S., T. Shank and J. Stein (1998). "Worms bask in extreme temperatures." *Nature* 391(6667): 545-546.
- Castelin, M., N. Puillandre, P. Lozouet, A. Sysoev, B. R. de Forges and S. Samadi (2011). "Molluscan species richness and endemism on New Caledonian seamounts: Are they enhanced compared to adjacent slopes?" *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 58(6): 637-646.
- Cavanaugh, C. M., S. L. Gardiner, M. L. Jones, H. W. Jannasch and J. B. Waterbury (1981). "Prokaryotic cells in the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones: possible chemoautotrophic symbionts." *Science* 213(4505): 340-342.
- Charlou, J. L., Y. Fouquet, J. P. Donval, J. M. Auzende, P. Jean-Baptiste, M. Stievenard and S. Michel (1996). "Mineral and gas chemistry of hydrothermal fluids on an ultrafast spreading ridge: East Pacific Rise, 17° to 19° S (Naudur cruise, 1993) phase separation processes controlled by volcanic and tectonic activity." *Journal of Geophysical Research* 101(B7): 15899-15915, 15919.
- Charlou, J., J. Donval, E. Douville, P. Jean-Baptiste, J. Radford-Knoery, Y. Fouquet, A. Dapoigny and M. Stievenard (2000). "Compared geochemical signatures and the evolution of Menez Gwen (37° 50' N) and Lucky Strike (37° 17' N) hydrothermal fluids, south of the Azores Triple Junction on the Mid-Atlantic Ridge." *Chemical geology* 171(1): 49-75.
- Charlou, J., J. Donval, Y. Fouquet, P. Jean-Baptiste and N. Holm (2002). "Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36° 14' N, MAR)." *Chemical Geology* 191(4): 345-359.

- Chase, R. (1985). "Hydrothermal vents on an axis seamount of the Juan de Fuca ridge."
- Chevaldonné, P. and A. Godfroy (1997). "Enumeration of microorganisms from deep-sea hydrothermal chimney samples." *FEMS microbiology letters* 146(2): 211-216.
- Chevaldonné, P., C. Fisher, J. Childress, D. Desbruyères, D. Jollivet, F. Zal and A. Toulmond (2000). "Thermotolerance and the 'Pompeii worms'." *Marine Ecology Progress Series* 208: 293-295.
- Chevaldonné, P., D. Desbruyères and J. and Childress (1992). "Some like it hot... and some even hotter." *Nature* 359: 593-594.
- Chevaldonné, P., D. Desbruyères and M. L. Haître (1991). "Time-series of temperature from three deep-sea hydrothermal vent sites." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 38(11): 1417-1430.
- Chevaldonné, P., D. Jollivet, A. Vangriesheim and D. Desbruyères (1997). "Hydrothermal-vent alvinellid polychaete dispersal in the eastern Pacific. 1. Influence of vent site distribution, bottom currents, and biological patterns." *Limnology and Oceanography* 42(1): 67-80.
- Childress, J. and T. Mickel (1985). "Metabolic rates of animals from the hydrothermal vents and other deep-sea habitats." *Bulletin of the Biological Society of Washington*(6): 249-260.
- Childress, J. J. and C. R. Fisher (1992). "The biology of hydrothermal vent animals - physiology, biochemistry, and autotrophic symbioses." *Oceanography and Marine Biology* 30: 337-441.
- Childress, J. J. and R. W. Lee (1993). "Inorganic carbon uptake in hydrothermal vent tubeworms facilitated by high environmental P_{CO_2} ." *Nature* 362(6416): 147-149.
- Childress, J. J., C. R. Fisher, J. A. Favuzzi and N. Sanders (1991). "Sulfide and carbon dioxide uptake by the hydrothermal vent clam, *Calyptogena magnifica*, and its chemoautotrophic symbionts." *Physiological zoology* 64(6): 1444-1470.
- Childress, J., C. Fisher, J. Favuzzi, A. Arp and D. Oros (1993). "The role of a zinc-based, serum-borne sulphide-binding component in the uptake and transport of dissolved sulphide by the chemoautotrophic symbiont-containing clam *Calyptogena elongata*." *Journal of experimental biology* 179(1): 131-158.
- Childress, J., C. Fisher, J. Favuzzi, R. Kochevar, N. Sanders and A. Alayse (1991). "Sulfide-driven autotrophic balance in the bacterial symbiont-containing hydrothermal vent tubeworm, *Riftia pachyptila* Jones." *The Biological Bulletin* 180(1): 135-153.
- Clark, M. R., L. Watling, A. A. Rowden, J. M. Guinotte and C. R. Smith (2011). "A global seamount classification to aid the scientific design of marine protected area networks." *Ocean & Coastal Management* 54(1): 19-36.
- Clark, M. R., M. R. Dunn, P. J. McMillan, M. H. Pinkerton, A. Stewart and S. M. Hanchet (2010). "Latitudinal variation of demersal fish assemblages in the western Ross Sea." *Antarctic Science* 22(06): 782-792.
- Cohen, J. (1977). "Statistical power analysis for the behavioral sciences (revised ed.) Academic Press." New York: 474.
- Colaço, A., D. Desbruyères and J. Guezennec (2007). "Polar lipid fatty acids as indicators of trophic associations in a deep-sea vent system community." *Marine Ecology* 28(1): 15-24.

- Colaço, A., F. Dehairs and D. Desbruyeres (2002). "Nutritional relations of deep-sea hydrothermal fields at the Mid-Atlantic Ridge: a stable isotope approach." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 49(2): 395-412.
- Colaco, A., F. Dehairs, D. Desbruyeres, N. Le Bris and P.-M. Sarradin (2002). "delta 13C signature of hydrothermal mussels is related with the end-member fluid concentrations of H₂S and CH₄ at the Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent fields." *Cahiers de biologie marine* 43(3/4): 259-262.
- Comeault, A., C. J. Stevens and S. K. Juniper (2010). "Mixed photosynthetic-chemosynthetic diets in vent obligate macroinvertebrates at shallow hydrothermal vents on Volcano 1, South Tonga Arc—Evidence from stable isotope and fatty acid analyses." *Cahiers de Biologie Marine* 51(4): 351.
- Comtet, T., D. Jollivet, A. Khripounoff, M. Segonzac and D. R. Dixon (2000). "Molecular and morphological identification of settlement-stage vent mussel larvae, *Bathymodiolus azoricus* (Bivalvia : Mytilidae), preserved in situ at active vent fields on the Mid-Atlantic Ridge." *Limnology and Oceanography* 45(7): 1655-1661.
- Contreira-Pereira, L., M. Yücel, D. Omanovic, J.-P. Brulport and N. Le Bris (2013). "Compact autonomous voltammetric sensor for sulfide monitoring in deep sea vent habitats." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 80: 47-57.
- Copley, J. T. P., H. C. Flint, T. J. Ferrero and C. L. Van Dover (2007). "Diversity of meiofauna and free-living nematodes in hydrothermal vent mussel beds on the northern and southern East Pacific Rise." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87(5): 1141-1152.
- Copley, J. T. P., P. A. Tyler, B. J. Murton and C. L. VanDover (1997). "Spatial and interannual variation in the faunal distribution at Broken Spur vent field (29 ° N, Mid-Atlantic Ridge)." *Marine Biology* 129(4): 723-733.
- Copley, J. T. P., P. A. Tyler, C. L. Van Dover, A. Schultz, P. Dickson, S. Singh and M. Sulanowska (1999). "Subannual temporal variation in faunal distributions at the TAG hydrothermal mound (26 degrees N, Mid-Atlantic Ridge)." *Marine Ecology-Pubblicazioni Della Stazione Zoologica Di Napoli I* 20(3-4): 291-306.
- Corbari, L., M.-A. Cambon-Bonavita, G. Long, F. Grandjean, M. Zbinden, F. Gaill and P. Compère (2008). "Iron oxide deposits associated with the ectosymbiotic bacteria in the hydrothermal vent shrimp *Rimicaris exoculata*." *Biogeosciences Discussions* 5(2): 1825-1865.
- Corliss, J. B., J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R. P. von Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge and K. Crane (1979). "Submarine thermal springs on the Galapagos Rift." *Science* 203(4385): 1073-1083.
- Corre, E., A. L. Reysenbach and D. Prieur (2001). "Epsilon-Proteobacterial diversity from a deep-sea hydrothermal vent on the Mid-Atlantic Ridge." *FEMS microbiology letters* 205(2): 329-335.
- Cosson, R. P., É. Thiébaud, R. Company, M. Castrec-Rouelle, A. Colaço, I. Martins, P.-M. Sarradin and M. J. Bebianno (2008). "Spatial variation of metal bioaccumulation in the hydrothermal vent mussel *Bathymodiolus azoricus*." *Marine environmental research* 65(5): 405-415.
- Cowen, J. P., S. J. Giovannoni, F. Kenig, H. P. Johnson, D. Butterfield, M. S. Rappé, M. Hutnak and P. Lam (2003). "Fluids from aging ocean crust that support microbial life." *Science* 299(5603): 120-123.

- Coykendall, D. K., S. B. Johnson, S. A. Karl, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (2011). "Genetic diversity and demographic instability in *Riftia pachyptila* tubeworms from eastern Pacific hydrothermal vents." *BMC evolutionary biology* 11(1): 96.
- Craddock, C., W. Hoeh, R. Lutz and R. Vrijenhoek (1995). "Extensive gene flow in the deep-sea hydrothermal vent mytilid *Bathymodiolus thermophilus*." *Mar Biol* 124: 137-146.
- Cravatte, S., W. S. Kessler and F. Marin (2012). "Intermediate Zonal Jets in the Tropical Pacific Ocean Observed by Argo Floats." *Journal of Physical Oceanography* 42(9): 1475-1485.
- Creasey, S., A. Rogers and P. Tyler (1996). "Genetic comparison of two populations of the deep-sea vent shrimp *Rimicaris exoculata* (Decapoda: Bresiliidae) from the Mid-Atlantic Ridge." *Marine Biology* 125(3): 473-482.
- Crépeau, V., M. A. Cambon Bonavita, F. Lesongeur, H. Randrianalivelo, P. M. Sarradin, J. Sarrazin and A. Godfroy (2011). "Diversity and function in microbial mats from the Lucky Strike hydrothermal vent field." *FEMS microbiology ecology* 76(3): 524-540.
- Cuvelier, D. (2011). "Temporal variations of the Mid-Atlantic hydrothermal vent communities from the Lucky Strike vent field" Thèse Doctorat, Universidade dos Açores, Departamento de Oceanografia e Pescas, 225 p.
- Cuvelier, D., F. De Busserolles, R. Lavaud, E. Floc'h, M.-C. Fabri, P.-M. Sarradin and J. Sarrazin (2012). "Biological data extraction from imagery-how far can we go? A case study from the Mid-Atlantic Ridge." *Marine environmental research*.
- Cuvelier, D., J. Sarrazin, A. Colaco, J. Copley, D. Desbruyeres, A. G. Glover, P. Tyler and R. S. Santos (2009). "Distribution and spatial variation of hydrothermal faunal assemblages at Lucky Strike (Mid-Atlantic Ridge) revealed by high-resolution video image analysis." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 56(11): 2026-2040.
- Cuvelier, D., J. Sarrazin, A. Colaco, J. T. Copley, A. G. Glover, P. A. Tyler, R. S. Santos and D. Desbruyeres (2011). "Community dynamics over 14 years at the Eiffel Tower hydrothermal edifice on the Mid-Atlantic Ridge." *Limnology and Oceanography* 56(5): 1624-1640.
- Cuvelier, D., P. M. Sarradin, J. Sarrazin, A. Colaço, J. T. Copley, D. Desbruyères, A. G. Glover, R. S. Santos and P. A. Tyler (2011). "Hydrothermal faunal assemblages and habitat characterisation at the Eiffel Tower edifice (Lucky Strike, Mid-Atlantic Ridge)." *Marine Ecology* 32(2): 243-255.
- Cuypers, Y., P. Bouruet-Aubertot, C. M arec and J.-L. Fuda (2012). "Characterization of turbulence from a fine-scale parameterization and microstructure measurements in the Mediterranean Sea during the BOUM experiment." *Biogeosciences* 9(8): 3131-3149.
- Cuypers, Y., X. Le Vaillant, P. Bouruet-Aubertot, J. Vialard and M. J. Mcphaden (2013). "Tropical storm-induced near-inertial internal waves during the Cirene experiment: Energy fluxes and impact on vertical mixing." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118(1): 358-380.
- de Angelis, M. A., A.-L. Reysenbach and J. A. Baross (1991). "Surfaces of hydrothermal vent invertebrates: Sites of elevated microbial CH₄ oxidation activity." *Limnology and oceanography* 36(3): 570-577.
- De Busserolles, F., J. Sarrazin, O. Gauthier, Y. Gélinas, M.-C. Fabri, P.-M. Sarradin and D. Desbruyeres (2009). "Are spatial variations in the diets of hydrothermal fauna linked to local

- environmental conditions?" *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1649-1664.
- De Leo, F. C., C. R. Smith, A. A. Rowden, D. A. Bowden and M. R. Clark (2010). "Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277(1695): 2783-2792.
- Debéda, V., J.-P. Catiagirone and P. Watremez (1995). "Local multigrid refinement method for natural convection in fissured porous media." *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals* 28(4): 455-467.
- Decelle, J., A. C. Andersen and S. Hourdez (2010). "Morphological adaptations to chronic hypoxia in deep-sea decapod crustaceans from hydrothermal vents and cold seeps." *Marine Biology* 157(6): 1259-1269.
- Delaney, J. R., V. Robigou, R. E. McDuff and M. K. Tivey (1992). "Geology of a vigorous hydrothermal system on the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 97(B13): 19663-19682.
- Deming, J. W. and J. A. Baross (1993). "Deep-sea smokers: Windows to a subsurface biosphere?" *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57(14): 3219-3230.
- Denis, F., D. Jollivet and D. Moraga (1993). "Genetic separation of two allopatric populations of hydrothermal snails *Alviniconcha* spp. (Gastropoda) from two South Western Pacific back-arc basins." *Biochemical systematics and ecology* 21(4): 431-440.
- Desbruyères, D. (1998). "Temporal variations in the vent communities on the East Pacific Rise and Galapagos Spreading Centre: a review of present knowledge." *Cahiers De Biologie Marine* 39(3-4).
- Desbruyères, D., A. Almeida, M. Biscoito, T. Comtet, A. Khripounoff, N. Le Bris, P. Sarradin and M. Segonzac (2000). "A review of the distribution of hydrothermal vent communities along the northern Mid-Atlantic Ridge: dispersal vs. environmental controls." *Hydrobiologia* 440(1-3): 201-216.
- Desbruyères, D., A.-M. Alayse-Danet and S. Ohta (1994). "Deep-sea hydrothermal communities in Southwestern Pacific back-arc basins (the North Fiji and Lau Basins): Composition, microdistribution and food web." *Marine Geology* 116(1): 227-242.
- Desbruyères, D., J. Hashimoto and M.-C. Fabri (2006). "Composition and biogeography of hydrothermal vent communities in western Pacific back-arc basins." *Geophysical Monograph Series* 166: 215-234.
- Desbruyères, D., M. Biscoito, J.-C. Caprais, A. Colaço, T. Comtet, P. Crassous, Y. Fouquet, A. Khripounoff, N. Le Bris and K. Olu (2001). "Variations in deep-sea hydrothermal vent communities on the Mid-Atlantic Ridge near the Azores plateau." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(5): 1325-1346.
- Desbruyères, D., M. Segonzac and M. Bright "Handbook of deep-sea hydrothermal vent fauna. 2006." *Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen: Linz-Dornach, Austria.*
- Desbruyères, D., M. Segonzac and M. Bright (1997). "Handbook of deep-sea hydrothermal vent fauna Peer reviewed article."
- Desbruyères, D., P. Chevaldonné, A.-M. Alayse, D. Jollivet, F. Lallier, C. Jouin-Toulmond, F. Zal, P.-M. Sarradin, R. Cosson and J.-C. Caprais (1998). "Biology and ecology of the "Pompeii worm" (*Alvinella pompejana* Desbruyères and Laubier), a normal dweller of a n

- extreme deep-sea environment: a synthesis of current knowledge and recent developments." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 383-422.
- Dhillon, A., A. Teske, J. Dillon, D. A. Stahl and M. L. Sogin (2003). "Molecular characterization of sulfate-reducing bacteria in the Guaymas Basin." *Applied and Environmental Microbiology* 69(5): 2765-2772.
- Di Meo-Savoie, C. A., G. W. Luther III and S. C. Cary (2004). "Physicochemical characterization of the microhabitat of the epibionts associated with *Alvinella pompejana*, a hydrothermal vent annelid." *Geochimica et cosmochimica acta* 68(9): 2055-2066.
- Dick, G. J. and B. M. Tebo (2010). "Microbial diversity and biogeochemistry of the Guaymas Basin deep-sea hydrothermal plume." *Environmental microbiology* 12(5): 1334-1347.
- Dick, G. J., Y. E. Lee and B. M. Tebo (2006). "Manganese (II)-oxidizing *Bacillus* spores in Guaymas Basin hydrothermal sediments and plumes." *Applied and environmental microbiology* 72(5): 3184-3190.
- Dinet, A., Grassle, F., Tunnicliffe, V. (1988). "Premières observations sur la meiofaune des sites hydrothermaux de la dorsale East-Pacifique (Guaymas, 211N) et de l'Explorer Ridge." *Oceanologica acta* 85: 7-14.
- Dirmeier, R., M. Keller, D. Hafenbradl, F.-J. Braun, R. Rachel, S. Burggraf and K. O. Stetter (1998). "*Thermococcus acidaminovorans* sp. nov., a new hyperthermophilic alkalophilic archaeon growing on amino acids." *Extremophiles* 2(2): 109-114.
- Distel, D. L., A. R. Baco, E. Chuang, W. Morrill, C. Cavanaugh and C. R. Smith (2000). "Marine ecology: Do mussels take wooden steps to deep-sea vents?" *Nature* 403(6771): 725-726.
- Dixon, D. R., L. R. Dixon and D. W. Pond (1998). "Recent advances in our understanding of the life history of bresiliid vent shrimps on the MAR." *Cah. Biol. Mar* 39: 383-386.
- Dreyer, J. C., K. E. Knick, W. B. Flickinger and C. L. Van Dover (2005). "Development of macrofaunal community structure in mussel beds on the northern East Pacific Rise." *Marine Ecology Progress Series* 302: 121-134.
- Dubilier, N., C. Bergin and C. Lott (2008). "Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis." *Nature Reviews Microbiology* 6(10): 725-740.
- Dubilier, N., R. Windoffer and O. Giere (1998). "Ultrastructure and stable carbon isotope composition of the hydrothermal vent mussels *Bathymodiolus brevior* and *B. sp. affinis brevior* from the North Fiji Basin, western Pacific." *Marine Ecology Progress Series* 165: 187-193.
- Duffaud, G. D., O. B. d'Hennezel, A. S. Peek, A.-L. Reysenbach and R. M. Kelly (1998). "Isolation and Characterization of *Thermococcus barossii*, sp. nov., a Hyperthermophilic Archaeon Isolated from a Hydrothermal Vent Flange Formation." *Systematic and applied microbiology* 21(1): 40-49.
- Duperron, S., C. Bergin, F. Zielinski, A. Blazejak, A. Pernthaler, Z. P. McKiness, E. DeChaine, C. M. Cavanaugh and N. Dubilier (2006). "A dual symbiosis shared by two mussel species, *Bathymodiolus azoricus* and *Bathymodiolus puteoserpentis* (Bivalvia: Mytilidae), from hydrothermal vents along the northern Mid-Atlantic Ridge." *Environmental microbiology* 8(8): 1441-1447.
- Duperron, S., T. Nadalig, J.-C. Caprais, M. Sibuet, A. Fiala-Médioni, R. A mann and N. Dubilier (2005). "Dual symbiosis in a *Bathymodiolus* sp. mussel from a methane seep on the

- Gabon continental margin (Southeast Atlantic): 16S rRNA phylogeny and distribution of the symbionts in gills." *Applied and environmental microbiology* 71(4): 1694-1700.
- Durand, P., A.-L. Reysenbach, D. Prieur and N. Pace (1993). "Isolation and characterization of *Thiobacillus hydrothermalis* sp. nov., a mesophilic obligately chemolithotrophic bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent in Fiji Basin." *Archives of microbiology* 159(1): 39-44.
- Dziak, R. P., C. G. Fox and A. E. Schreiner (1995). "The June-July 1993 seismo-acoustic event at CoAxial segment, Juan de Fuca Ridge: Evidence for a lateral dike injection." *Geophysical Research Letters* 22(2): 135-138.
- Dziak, R. P., C. G. Fox, A. M. Bobbitt and C. Goldfinger (2001). "Bathymetric map of the Gorda Plate: Structural and geomorphological processes inferred from multibeam surveys." *Marine Geophysical Researches* 22(4): 235-250.
- Edgcomb, V. P., D. Beaudoin, R. Gast, J. F. Biddle and A. Teske (2011). "Marine subsurface eukaryotes: the fungal majority." *Environmental Microbiology* 13(1): 172-183.
- Edgcomb, V. P., D. T. Kysela, A. Teske, A. de Vera Gomez and M. L. Sogin (2002). "Benthic eukaryotic diversity in the Guaymas Basin hydrothermal vent environment." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(11): 7658-7662.
- Edgcomb, V. P., S. Breglia, N. Yubuki, D. Beaudoin, D. J. Patterson, B. S. Leander and J. M. Bernhard (2011). "Identity of epibiotic bacteria on symbiontid euglenozoans in O₂-depleted marine sediments: evidence for symbiont and host co-evolution." *Isme Journal* 5(2): 231-243.
- Edgcomb, V., W. Orsi, H.-W. Breiner, A. Stock, S. Filker, M. Yakimov and T. Stoeck (2011). "Novel active kinetoplastids associated with hypersaline anoxic basins in the Eastern Mediterranean deep-sea." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 58(10): 1040-1048.
- Edwards, K. J., C. G. Wheat and J. B. Sylvan (2011). "Under the sea: microbial life in volcanic oceanic crust." *Nature Reviews Microbiology* 9(10): 703-712.
- Edwards, K. J., C. G. Wheat and J. B. Sylvan (2011). "Under the sea: microbial life in volcanic oceanic crust." *Nature Reviews Microbiology* 9(10): 703-712.
- Edwards, K. J., D. R. Rogers, C. O. Wirsen and T. McCollom (2003). "Isolation and characterization of novel psychrophilic, neutrophilic, Fe-oxidizing, chemolithoautotrophic α - and γ -Proteobacteria from the deep sea." *Applied and Environmental Microbiology* 69(5): 2906-2913.
- Edwards, K. J., W. Bach and T. M. McCollom (2005) "Geomicrobiology in oceanography: microbe–mineral interactions at and below the seafloor". *Trends in Microbiology* 13 (9) 449-456.
- Edwards, K. J., W. Bach and T. M. McCollom (2005). "Geomicrobiology in oceanography: microbe–mineral interactions at and below the seafloor." *TRENDS in Microbiology* 13(9): 449-456.
- Ehrlich, H. (1968). "Bacteriology of manganese nodules II. Manganese oxidation by cell-free extract from a manganese nodule bacterium." *Applied microbiology* 16(2): 197-202.
- Ehrlich, H. L. (1963). "Bacteriology of manganese nodules I. Bacterial action on manganese in nodule enrichments." *Applied microbiology* 11(1): 15-19.
- Ehrlich, H. L. (1999). "Microbes as geologic agents: their role in mineral formation." *Geomicrobiology Journal* 16(2): 135-153.

- Ehrlich, H., W. Ghiorse and G. Johnson (1972). "Distribution of microbes in manganese nodules from the Atlantic and Pacific Oceans." *Dev. Ind. Microbiol* 13: 57-65.
- Embley, R. W. and W. W. Chadwick (1994). "Volcanic and hydrothermal processes associated with a recent phase of sea-floor spreading at the northern Cleft segment - Juan-de-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 99(B3): 4741-4760.
- Embley, R. W., W. W. Chadwick, D. Clague and D. Stakes (1999). "1998 Eruption of Axial Volcano: Multibeam anomalies and sea-floor observations." *Geophysical Research Letters* 26(23): 3425-3428.
- Embley, R. W., W. W. Chadwick, D. Clague and D. Stakes (1999). "1998 Eruption of Axial Volcano: Multibeam anomalies and sea-floor observations." *Geophysical Research Letters* 26(23): 3425-3428.
- Embley, R. W., W. W. Chadwick, E. T. Baker, D. A. Butterfield, J. A. Resing, C. E. De Ronde, V. Tunnicliffe, J. E. Lupton, S. K. Juniper and K. H. Rubin (2006). "Long-term eruptive activity at a submarine arc volcano." *Nature* 441(7092): 494-497.
- Emerson, D. and C. L. Moyer (2002). "Neutrophilic Fe-oxidizing bacteria are abundant at the Loihi Seamount hydrothermal vents and play a major role in Fe oxide deposition." *Applied and environmental microbiology* 68(6): 3085-3093.
- Emerson, D., J. A. Rentz, T. G. Lilburn, R. E. Davis, H. Aldrich, C. Chan and C. L. Moyer (2007). "A novel lineage of proteobacteria involved in formation of marine Fe-oxidizing microbial mat communities." *PloS one* 2(8): e667.
- Endow, K. and S. Ohta (1989). "The symbiotic relationship between bacteria and a mesogastropod snail, *Alviniconcha hessleri*, collected from hydrothermal vents of the Mariana Back-Arc Basin." *Bulletin of Japanese Society of Microbial Ecology* 3(2): 73-82.
- Erickson, K., S. Macko and C. V an Dover (2009). "Evidence for a chemoautotrophically based food web at inactive hydrothermal vents (Manus Basin)." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1577-1585.
- Etter, R. and L. Mullineaux (2001). "Deep-sea communities." In : Bertness MD, Gaines SD, Hay ME (eds) *Marine community ecology*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA.: 367-394.
- Fabri, M.-C., A. Bargain, P. Briand, A. Gebruk, Y. Fouquet, M. Morineaux and D. Desbruyeres (2011). "The hydrothermal vent community of a new deep-sea field, Ashadze-1, 12 58'N on the Mid-Atlantic Ridge." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 91(1): 1-13.
- Falkowski PG, Fenchel T, Delong EF (2008). The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science* 320(5879):1034-9.
- Faure, B., D. Jollivet, A. Tanguy, F. Bonhomme and N. Bierne (2009). "Speciation in the deep sea: multi-locus analysis of divergence and gene flow between two hybridizing species of hydrothermal vent mussels." *PLoS One* 4(8): e6485.
- Feely, R. A., J. H. Trefry, G. J. Massoth and S. Metz (1991). "A comparison of the scavenging of phosphorus and arsenic from seawater by hydrothermal iron oxyhydroxides in the Atlantic and Pacific Oceans." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 38(6): 617-623.
- Felbeck, H. (1981). "Chemoautotrophic potential of the hydrothermal vent tube worm, *Riftia pachyptila* Jones (Vestimentifera)." *Science* 213(4505): 336-338.

- Felbeck, H., J. J. Childress and G. N. Somero (1981). "Calvin-Benson cycle and sulphide oxidation enzymes in animals from sulphide-rich habitats." *Nature* 293(5830): 291-293.
- Ferron B., F. Kokoszka, H. Mercier, P. Lherminier. (2013). Dissipation rate estimates from microstructure and finescale internal wave observations along the Greenland-Portugal OVIDE line. Soumis à JPO.
- Fiala, G., K. O. Stetter, H. W. Jannasch, T. A. Langworthy and J. Madon (1986). "Staphylothermus marinus sp. nov. Represents a Novel Genus of Extremely Thermophilic Submarine Heterotrophic Archaeobacteria Growing up to 98° C." *Systematic and Applied Microbiology* 8(1): 106-113.
- Fiala-Médioni, A., C. Métyvier, A. Herry and M. Le Penec (1986). "Ultrastructure of the gill of the hydrothermal-vent mytilid *Bathymodiolus* sp." *Marine Biology* 92(1): 65-72.
- Fiala-Médioni, A., Z. McKiness, P. Dando, J. Boulegue, A. Mariotti, A. Alayse-Danet, J. Robinson and C. Ca vanaugh (2002). " Ultrastructural, biochemical, and immunological characterization of two populations of the mytilid mussel *Bathymodiolus azoricus* from the Mid-Atlantic Ridge: evidence for a dual symbiosis." *Marine Biology* 141(6): 1035-1043.
- Field, M. P. and R. M. Sherrell (2000). "Dissolved and particulate Fe in a hydrothermal plume at 9° 45' N, East Pacific Rise: Slow Fe (II) oxidation kinetics in Pacific plumes." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(4): 619-628.
- Fisher, C. R. (1995). "Toward an appreciation of hydrothermal-vent animals: Their environment, physiological ecology, and tissue stable isotope values." *Geophysical Monograph Series* 91: 297-316.
- Fisher, C. R. and J. J. Childress (1992). " Organic-carbon transfer from methanotrophic symbionts to the host hydrocarbon-seep mussel." *Symbiosis* 12(3): 221-235.
- Fisher, C. R., J. J. Childress, S. A. Macko and J. M. Brooks (1994). "Nutritional interactions in Galapagos rift hydrothermal vent communities - inferences from stable carbon and nitrogen isotope analyses." *Marine Ecology Progress Series* 103(1-2): 45-55.
- Fisher, C., M. Kennicutt and J. Brooks (1990). "Stable carbon isotopic evidence for carbon limitation in hydrothermal vent vestimentiferans." *Science* 247(4946): 1094-1096.
- Flores, G. E., J. H. Campbell, J. D. Kirshtein, J. Meneghin, M. Podar, J. I. Steinberg, J. S. Seewald, M. K. Tivey, M. A. Voytek and Z. K. Yang (2011). "Microbial community structure of hydrothermal deposits from geochemically different vent fields along the Mid-Atlantic Ridge." *Environmental microbiology* 13(8): 2158-2171.
- Flores, J. F. and S. M. Hourdez (2006). "The zinc-mediated sulfide-binding mechanism of hydrothermal vent tubeworm 400-kDa hemoglobin." *Cahiers De Biologie Marine* 47(4): 371.
- Foell, E., H. Hennigar Jr and D. Pawson (1989). Assessment of abyssal benthic megafauna on a ferromanganese nodule deposit using videotaped television survey data. Offshore Technology Conference.
- Forget, N., S. Murdock and S. Juniper (2010). "Bacterial diversity in Fe-rich hydrothermal sediments at two South Tonga Arc submarine volcanoes." *Geobiology* 8(5): 417-432.
- Form, A. U. and U. Riebesell (2012). "Acclimation to ocean acidification during long-term CO₂ exposure in the cold-water coral *Lophelia pertusa*." *Global change biology* 18(3): 843-853.
- Fornari, D. J., K. L. Von Damm, J. G. Bryce, J. P. Cowen, V. Ferrini, A. Fundis, M. D. Lilley, G. W. Luther III, L. S. Mullineaux and M. R. Perfit (2012). "The East Pacific Rise between 9

- N and 10 N: Twenty-five years of integrated, multidisciplinary oceanic spreading center studies." *Oceanography-Oceanography Society* 25(1): 18.
- Fouquet, Y., J. M. Auzende, V. Ballu, R. Batiza, D. Bideau, M. H. Cormier, P. Geistdoerfer, Y. Lagabrielle, J. Sinton and P. Spadea (1994). "Variability of the present-day hydrothermal activity along an ultra-fast spreading ridge - East Pacific Rise between 17°C and 19°S (Naudur cruise)." *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II* 319(11): 1399-1406.
- France, S., R. Hessler and R. Vrijenhoek (1992). "Genetic differentiation between spatially-disjunct populations of the deep-sea, hydrothermal vent-endemic amphipod *Ventiella sulfuris*." *Marine Biology* 114(4): 551-559.
- Fujikura, K., T. Yamazaki, K. Hasegawa, U. Tsunogai, R. Stern, H. Ueno, H. Yamamoto, Y. Maki, S. Tsuchida and T. Kodera (1997). "Biology and earth scientific investigation by the submersible "Shinkai 6500" system of deep-sea hydrothermalism and lithosphere in the Mariana back-arc basin." *JAMSTEC J. Deep Sea Res* 13: 1-20.
- Fustec, A., D. Desbruyères and S. K. Juniper (1987). "Deep-sea hydrothermal vent communities at 13 N on the East Pacific Rise: microdistribution and temporal variations." *Biological Oceanography* 4(2): 121-164.
- Gad, G. and H. K. Schminke (2004). "How important are seamounts for the dispersal of interstitial meiofauna?" *Archive of Fishery and Marine Research* 51(1-3): 43-54.
- Gadanho, M. and J. P. Sampaio (2005). "Occurrence and diversity of yeasts in the Mid-Atlantic ridge hydrothermal fields near the Azores Archipelago." *Microbial Ecology* 50(3): 408-417.
- Gage, J. D. and P. A. Tyler (1991). *Deep-sea biology: a natural history of organisms at the deep-sea floor*, Cambridge University Press.
- Gaill, F. and S. Hunt (1991). "The biology of annelid worms from high-temperature hydrothermal vent regions." *Reviews in Aquatic Sciences* 4(2-3): 107-137.
- Galkin, S. and E. Goroslavskaya (2010). "Bottom fauna associated with *Bathymodiolus azoricus* (Mytilidae) mussel beds in the hydrothermal fields of the Mid-Atlantic Ridge." *Oceanology* 50(1): 51-60.
- Galkin, S. and L. Moskalev (1990). "Hydrothermal fauna of the Mid-Atlantic Ridge." *Oceanology* 30(5): 624-627.
- Galkin, S. V. (1997). "Megafauna associated with hydrothermal vents in the Manus Back-Arc Basin (Bismarck Sea)." *Marine Geology* 142(1-4): 197-206.
- Galkin, S. V. (1997). "Structure and biogeography of hydrothermal vent communities." *Zhurnal Obshchei Biologii* 71(3): 205-218.
- Gallant, R. M. and K. L. Von Damm (2006). "Geochemical controls on hydrothermal fluids from the Kairei and Edmond Vent Fields, 23 °-25 ° S, Central Indian Ridge." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7.
- Gamo, T., K. Okamura, J.-L. Charlou, T. Urabe, J.-M. Auzende, J. Ishibashi, K. Shitashima and H. Chiba (1997). "Acidic and sulfate-rich hydrothermal fluids from the Manus back-arc basin, Papua New Guinea." *Geology* 25(2): 139-142.
- Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, M. M. Zweng, O. K. Baranova, and D. R. Johnson, 2010. *World Ocean Atlas 2009, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate,*

- silicate). S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 71, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 398 pp.
- Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 70, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 344 pp.
- Gass, S. and J. Roberts (2011). "Growth and branching patterns of *Lophelia pertusa* (Scleractinia) from the North Sea." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 91(04): 831-835.
- Gass, S. E. and J. M. Roberts (2006). "The occurrence of the cold-water coral *Lophelia pertusa* (Scleractinia) on oil and gas platforms in the North Sea: Colony growth, recruitment and environmental controls on distribution." *Marine Pollution Bulletin* 52(5): 549-559.
- Gaudron, S., F. Pradillon, M. Pailleret, S. Duperron, N. Le Bris and F. Gaill (2010). "Colonization of organic substrates deployed in deep-sea reducing habitats by symbiotic species and associated fauna." *Marine environmental research* 70(1): 1-12.
- Gebruk, A. and A. Mironov (2006). "Biogeography of Atlantic hydrothermal vents." *Ecosystems of Atlantic Hydrothermal Vents*: 119-162.
- Gebruk, A., E. Southward, H. Kennedy and A. Southward (2000). "Food sources, behaviour, and distribution of hydrothermal vent shrimps at the Mid-Atlantic Ridge." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 80(03): 485-499.
- Gebruk, A., M.-C. Fabri, P. Briand and D. Desbruyeres (2010). "Community dynamics over a decadal scale at Logatchev, 14 degrees 45'N, Mid-Atlantic Ridge." *Cahiers De Biologie Marine* 51(4): 383-388.
- Gebruk, A., P. Chevaldonné, T. Shank, R. Lutz and R. Vrijenhoek (2000). "Deep-sea hydrothermal vent communities of the Logatchev area (14 45' N, Mid-Atlantic Ridge): Diverse biotopes and high biomass." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 80(03): 383-393.
- Gebruk, A., S. Galkin, A. Vereshchaka, L. Moskalev and A. Southward (1997). "Ecology and biogeography of the hydrothermal vent fauna of the Mid-Atlantic Ridge." *Advances in Marine Biology* 32: 93-144.
- Geistdoerfer, P. (1985). Taxonomy, ecology and distribution of a fish zoarcid from hydrothermal vents on East Pacific Rise. *Comptes Rendus De l'Academie Des Sciences Serie Iii-Sciences De La Vie-Life Sciences* 301(7): 365-368.
- Geistdoerfer, P., J. Auzende, R. Batiza, D. Bideau, M. Cormier, Y. Fouquet, Y. Lagabrielle, J. Sinton and P. Spadea (1995). "Animal communities and hydrothermal activity on the East Pacific Rise between 17°S and 19°S (Naudur cruise, december 1993)." *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II* 320(1): 47-54.
- Genin, A. (2004). "Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies." *Journal of Marine Systems* 50(1): 3-20.
- George, K. H. (2013). "Faunistic research on metazoan meiofauna from seamounts—a review." *Meiofauna Marina* 20: 1-32.
- Gerasimchuk, A., A. Shatalov, A. Novikov, O. Butorova, N. Pimenov, A. Y. Lein, A. Yanenko and O. Karnachuk (2010). "The search for sulfate-reducing bacteria in mat samples from the lost city hydrothermal field by molecular cloning." *Microbiology* 79(1): 96-105.

- Geret, F., R. Ri so, P.-M. Sarradin, J.-C. Caprais and R. P . Cosson (2002). " Metal bioaccumulation and storage forms in the shrimp, *Rimicaris exoculata*, from the Rainbow hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge); preliminary approach to the fluid-organism relationship." *Cahiers de biologie marine* 43(1): 43-52.
- German, C.R. and K.L. Von Damm (2004). Hydrothermal Processes. In: Holland HD, Turekian KK, editors. *Treatise on Geochemistry Volume 6: The Oceans and Marine Geochemistry*. Chapter 6.07. Elsevier, Oxford, UK P 181–222.
- Girguis, P. R. and J. J. Childress (2006). " Metabolite uptake, stoichiometry and chemoautotrophic function of the hydrothermal vent tubeworm *Riftia pachyptila*: responses to environmental variations in substrate concentrations and temperature." *Journal of Experimental Biology* 209(18): 3516-3528.
- Girguis, P. R. and R. W. Lee (2006). "Thermal preference and tolerance of alvinellids." *Science* 312(5771): 231-231.
- Glover, A., A. Gooday, D. Bailey, D. Billett, P. Chevaldonné, A. Colaco, J. Copley, D. Cuvelier, D. Desbruyeres and V. Kalogeropoulou (2010). " Temporal change in deep-sea benthic ecosystems: a review of the evidence from recent time-series studies." *Advances In Marine Biology*, Vol 58 58: 1-95.
- Glover, A., C. Smith, G. Paterson, G. Wilson, L. Hawkins and M. Shearer (2002). "Polychaete species diversity in the central Pacific abyss: local and regional patterns, and relationships with productivity." *Marine Ecology Progress Series* 240: 157-170.
- Glowka, L. (2003). "Putting marine scientific research on a sustainable footing at hydrothermal vents." *Marine Policy* 27(4): 303-312.
- Godfroy, A., F. Lesongeur, G. Raguénès, J. Quérellou, E. Antoine, J.-R. Meunier, J. Guezennec and G. Barbier (1997). "Thermococcus hydrothermalis sp. nov., a new hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic bacteriology* 47(3): 622-626.
- Godfroy, A., J. R. Meunier, J. Guezennec, F. Lesongeur, G. Raguenes, A. Rimbault and G. Barbier (1999). " Thermococcus fumicolans sp. nov., a new hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent in the North Fiji Basin (vol 46, pg 1113, 1996)." *International Journal of Systematic Bacteriology* 49: 1951-1951.
- Godfroy, A., J.-R. Meunier, J. Guezennec, F. Lesongeur, G. Raguenes, A. Rimbault and G. Barbier (1996). " Thermococcus fumicolans sp. nov., a new hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent in the North Fiji Basin." *International journal of systematic bacteriology* 46(4): 1113-1119.
- Goffredi, S. K., J. J. Childress, N. T. Desaulniers and F. Lallier (1997). "Sulfide acquisition by the vent worm *Riftia pachyptila* appears to be via uptake of HS⁻, rather than H₂S." *Journal of experimental biology* 200(20): 2609-2616.
- Goffredi, S., J. Childress, N. Desaulniers, R. Lee, F. Lallier and D. Hammond (1997). "Inorganic carbon acquisition by the hydrothermal vent tubeworm 393 *Riftia pachyptila* depends upon high external P-CO₂ and upon proton-equivalent ion 394 transport by the worm." *J Exper Biol* 200: 883-896.
- Gold, T. (1992). "The deep, hot biosphere." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 89(13): 6045-6049.

- Gollner, S., B. Riemer, P. M. Arbizu, N. Le Bris and M. Bright (2010). "Diversity of meiofauna from the 9 50' N East Pacific Rise across a gradient of hydrothermal fluid emissions." *Plos one* 5(8): e12321.
- Gollner, S., V. N. Ivanenko, P. M. Arbizu and M. Bright (2010). "Advances in taxonomy, ecology, and biogeography of *D. irivultidae* (Copepoda) associated with chemosynthetic environments in the deep sea." *PloS one* 5(8): e9801.
- González, J. M., D. Sheckells, M. Viebahn, D. Krupatkina, K. M. Borges and F. T. Robb (1999). "*Thermococcus waiotapuensis* sp. nov., an extremely thermophilic archaeon isolated from a freshwater hot spring." *Archives of microbiology* 172(2): 95-101.
- Götz, D., A. Banta, T. Beveridge, A. Rushdi, B. Simoneit and A. Reysenbach (2002). "*Persephonella marina* gen. nov., sp. nov. and *Persephonella guaymasensis* sp. nov., two novel, thermophilic, hydrogen-oxidizing microaerophiles from deep-sea hydrothermal vents." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(4): 1349-1359.
- Govenar, B. (2010). *Shaping vent and seep communities: habitat provision and modification by foundation species. The Vent and Seep Biota*, Springer: 403-432.
- Govenar, B. (2012). "Energy transfer through food webs at hydrothermal vents: Linking the lithosphere to the biosphere." *Oceanography* 25(1): 246-255.
- Govenar, B. and C. R. Fisher (2007). "Experimental evidence of habitat provision by aggregations of *Riftia pachyptila* at hydrothermal vents on the East Pacific Rise." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 28(1): 3-14.
- Govenar, B., M. Freeman, D. Bergquist, G. Johnson and C. Fisher (2004). "Composition of a one-year-old *Riftia pachyptila* community following a clearance experiment: insight to succession patterns at deep-sea hydrothermal vents." *The Biological Bulletin* 207(3): 177-182.
- Grassle, J., H. Sanders, R. Hessler, G. Rowe and T. McLellan (1975). *Pattern and zonation: a study of the bathyal megafauna using the research submersible Alvin. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Elsevier.
- Greenslate, J. (1974). "Microorganisms participate in the construction of manganese nodules." *Nature* 249(5453): 181-183.
- Grehan, A. J. and S. K. Juniper (1996). "Clam distribution and subsurface hydrothermal processes at Chowder Hill (Middle Valley), Juan de Fuca Ridge." *Marine Ecology Progress Series* 130(1-3): 105-115.
- Grote, R., L. Li, J. Tamaoka, C. Kato, K. Horikoshi and G. Antranikian (1999). "*Thermococcus siculi* sp. nov., a novel hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent at the Mid-Okinawa Trough." *Extremophiles* 3(1): 55-62.
- Guinot, D. and L. A. Hurtado (2003). "Two new species of hydrothermal vent crabs of the genus *Bythograea* from the southern East Pacific Rise and from the Galapagos Rift (Crustacea Decapoda Brachyura Bythograeidae)." *Comptes Rendus Biologies* 326(4): 423-439.
- Guinotte, J. M., J. Orr, S. Cairns, A. Freiwald, L. Morgan and R. George (2006). "Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals?" *Frontiers in Ecology and the Environment* 4(3): 141-146.
- Guy, R. D., M. L. Fogel and J. A. Berry (1993). "Photosynthetic fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon." *Plant Physiology* 101(1): 37-47.
- Gwyther, D. (2008). *Environmental impact statement: Nautilus Minerals Niugini Limited, Solwara 1 Project. Vol A.*

- Haase, K., S. Petersen, A. Koschinsky, R. Seifert, C. W. Devey, R. Keir, K. Lackschewitz, B. Melchert, M. Perner and O. Schmale (2007). "Young volcanism and related hydrothermal activity at 5° S on the slow-spreading southern Mid-Atlantic Ridge." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 8(11).
- Hafenbradl, D., M. Keller, R. Dirmeier, R. Rachel, P. Roßnagel, S. Burggraf, H. Huber and K. O. Stetter (1996). "Ferroglobus placidus gen. nov., sp. nov., a novel hyperthermophilic archaeum that oxidizes Fe²⁺ at neutral pH under anoxic conditions." *Archives of Microbiology* 166(5): 308-314.
- Halanych, K., M. Tieger, G. O'Mullan, R. Lutz and R. Vrijenhoek (1999). "Brief description of biological communities at 7 S on the East Pacific Rise." *InterRidge News* 8(2): 23-26.
- Halary, S., V. Riou, F. Gaill, T. Boudier and S. Duperron (2008). "3D FISH for the quantification of methane-and sulphur-oxidizing endosymbionts in bacteriocytes of the hydrothermal vent mussel *Bathymodiolus azoricus*." *The ISME journal* 2(3): 284-292.
- Hall-Spencer, J. M., J. Pike and C. B. Munn (2007). "Diseases affect cold-water corals too: *Eunicella verrucosa* (Cnidaria: Gorgonacea) necrosis in SW England." *Diseases of aquatic organisms* 76(2): 87-97.
- Hammond, D., J. McManus, W. Berelson, T. Kilgore and R. Pope (1996). "Early diagenesis of organic material in equatorial Pacific sediments: stoichiometry and kinetics." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 43(4): 1365-1412.
- Harasewych, M. and R. E. Petit (2011). "Two new species of Admetinae (Neogastropoda: Cancellarioidea) from the northeastern Pacific Ocean."
- Harasewych, M. G. and Y. I. Kantor (2002). "Buccinum thermophilum (Gastropoda : Neogastropoda : Buccinidae), a new species from the Endeavour vent field of the Juan de Fuca Ridge." *Journal of Molluscan Studies* 68: 39-44.
- Harmsen, H., D. Prieur and C. Jeanthon (1997). "Distribution of microorganisms in deep-sea hydrothermal vent chimneys investigated by whole-cell hybridization and enrichment culture of thermophilic subpopulations." *Applied and environmental microbiology* 63(7): 2876-2883.
- Hashimoto, J., S. Ohta, A. Fiala-Médioni, J. Auzende, S. Kojima, M. Segonzac, Y. Fujiwara, J. Hunt, K. Gena and T. Miura (1999). "Hydrothermal vent communities in the Manus Basin, Papua New Guinea: Results of the BIOACCESS cruises' 96 and'98." *InterRidge News* 8(2): 12-18.
- Hashimoto, J., S. Ohta, K. Fujikura and T. Miura (1995). "Microdistribution pattern and biogeography of the hydrothermal vent communities of the Minami-Ensei Knoll in the Mid-Okinawa Trough, Western Pacific." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42(4): 577-598.
- Hashimoto, J., S. Ohta, T. Gamo, H. Chiba, T. Yamaguchi, S. Tsuchida, T. Okudaira, H. Watabe, T. Yamanaka and M. Kitazawa (2001). "First hydrothermal vent communities from the Indian Ocean discovered." *Zoological Science* 18(5): 717-721.
- Haymon, R. M., D. J. Fornari, M. H. Edwards, S. Carbotte, D. Wright and K. C. Macdonald (1991). "Hydrothermal vent distribution along the East Pacific Rise crest (9-degrees-09'-54'N) and its relationship to magmatic and tectonic processes on fast-spreading midocean ridges." *Earth and Planetary Science Letters* 104(2-4): 513-534.
- Haymon, R., D. Fornari, K. Von Damm, M. Lilley, M. Perfit, J. Edmond, W. Shanks III, R. Lutz, J. Grebmeier and S. Carbotte (1993). "Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9 45–52' N: Direct submersible observations of seafloor

- phenomena associated with an eruption event in April, 1991." *Earth and Planetary Science Letters* 119(1): 85-101.
- Henry, M. S., J. J. Childress and D. Figuera (2008). "Metabolic rates and thermal tolerances of chemoautotrophic symbioses from Lau Basin hydrothermal vents and their implications for species distributions." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 55(5): 679-695.
- Henstra, A. M., C. Dijkema and A. J. Stams (2007). "Archaeoglobus fulgidus couples CO oxidation to sulfate reduction and acetogenesis with transient formate accumulation." *Environmental microbiology* 9(7): 1836-1841.
- Hessler, R. R. and J. W. Martin (1989). "Austinograea-williamsi, new genus, new species, a hydrothermal vent crab (Decapoda, Bythograeidae) from the Mariana back-arc basin, western Pacific." *Journal of Crustacean Biology* 9(4): 645-661.
- Hessler, R. R. and P. A. Jumars (1974). "Abyssal community analysis from replicate box cores in Central North Pacific." *Deep-Sea Research* 21(3): 185-&.
- Hessler, R. R. and P. F. Lonsdale (1991). "Biogeography of Mariana Trough hydrothermal vent communities." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 38(2): 185-199.
- Hessler, R. R. and V. A. Kaharl (1995). "The deep-sea hydrothermal vent community: an overview." *Geophysical Monograph Series* 91: 72-84.
- Hessler, R. R. and W. M. Smithey Jr (1983). The distribution and community structure of megafauna at the Galapagos Rift hydrothermal vents. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*, Springer: 735-770.
- Hessler, R. R., W. M. Smithey Jr and C. H. Keller (1985). "Spatial and temporal variation of giant clams, tube worms and mussels at deep-sea hydrothermal vents." *Bulletin of the Biological Society of Washington*(6): 411-428.
- Hessler, R. R., W. M. Smithey, M. A. Boudrias, C. H. Keller, R. A. Lutz and J. J. Childress (1988). "Temporal change in megafauna at the Rose Garden hydrothermal vent (Galapagos rift - eastern tropical Pacific)." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 35(10-11): 1681-&.
- Higashi, Y., M. Sunamura, K. Kitamura, K. i. Nakamura, Y. Kurusu, J. i. Ishibashi, T. Urabe and A. Maruyama (2004). "Microbial diversity in hydrothermal surface to subsurface environments of Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, using a cat heter-type in situ growth chamber." *FEMS microbiology ecology* 47(3): 327-336.
- Hoek, J., A. Banta, F. Hubler and A. L. Reysenbach (2003). "Microbial diversity of a sulphide spire located in the Edmond deep-sea hydrothermal vent field on the Central Indian Ridge." *Geobiology* 1(2): 119-127.
- Holden, J. F. and M. W. Adams (2003). "Microbe-metal interactions in marine hydrothermal environments." *Current opinion in chemical biology* 7(2): 160-165.
- Holden, J. F., J. A. Breier, K. L. Rogers, M. D. Schulte and B. M. Toner (2012). "Biogeochemical Processes at Hydrothermal Vents Microbes and Minerals, Bioenergetics, and Carbon Fluxes." *Oceanography* 25(1): 196-208.
- Holler, T., F. Widdel, K. Knittel, R. Amann, M. Y. Kellermann, K.-U. Hinrichs, A. Teske, A. Boetius and G. Wegener (2011). "Thermophilic anaerobic oxidation of methane by marine microbial consortia." *The ISME journal* 5(12): 1946-1956.

- Houghton, J. and W. Seyfried Jr (2010). "An experimental and theoretical approach to determining linkages between geochemical variability and microbial biodiversity in seafloor hydrothermal chimneys." *Geobiology* 8(5): 457-470.
- Houghton, J., W. Seyfried Jr, A. Banta and A.-L. Reysenbach (2007). "Continuous enrichment culturing of thermophiles under sulfate and nitrate-reducing conditions and at deep-sea hydrostatic pressures." *Extremophiles* 11(2): 371-382.
- Hourdez, S. (2012). "21 Hypoxic Environments." *Life at Extremes: Environments, Organisms, and Strategies for Survival* 1: 438.
- Hourdez, S. and F. H. Lallier (2007). "Adaptations to hypoxia in hydrothermal-vent and cold-seep invertebrates." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 6(1-3): 143-159.
- House, C. H., J. W. Schopf and K. O. Stetter (2003). "Carbon isotopic fractionation by Archaeans and other thermophilic prokaryotes." *Organic Geochemistry* 34(3): 345-356.
- Hsu-Kim, H., K. Mullaugh, J. Tsang, M. Yucel and G. Luther (2008). "Formation of Zn-and Fe-sulfides near hydrothermal vents at the Eastern Lau Spreading Center: implications for sulfide bioavailability to chemoautotrophs." *Geochemical transactions* 9(1): 6.
- Hubbs, C. (1959). "High-incidence of vertebral deformities in 2 natural-populations of fishes inhabiting warm springs." *Ecology* 40(1): 154-155.
- Huber, H., H. Jannasch, R. Rachel, T. Fuchs and K. O. Stetter (1997). "Archaeoglobus veneficus sp. nov., a Novel Facultative Chemolithoautotrophic Hyperthermophilic Sulfite Reducer, Isolated from Abyssal Black Smokers." *Systematic and applied microbiology* 20(3): 374-380.
- Huber, H., M. J. Hohn, R. Rachel, T. Fuchs, V. C. Wimmer and K. O. Stetter (2002). "A new phylum of Archaea represented by a nanosized hyperthermophilic symbiont." *Nature* 417(6884): 63-67.
- Huber, H., S. Burggraf, T. Mayer, I. Wyschkony, R. Rachel and K. O. Stetter (2000). "Ignicoccus gen. nov., a novel genus of hyperthermophilic, chemolithoautotrophic Archaea, represented by two new species, *Ignicoccus islandicus* sp nov and *Ignicoccus pacificus* sp nov. and *Ignicoccus pacificus* sp. nov." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 50(6): 2093-2100.
- Huber, J. A., D. A. Butterfield and J. A. Baross (2002). "Temporal changes in archaeal diversity and chemistry in a mid-ocean ridge seafloor habitat." *Applied and Environmental Microbiology* 68(4): 1585-1594.
- Huber, J. A., D. A. Butterfield and J. A. Baross (2003). "Bacterial diversity in a seafloor habitat following a deep-sea volcanic eruption." *FEMS Microbiology Ecology* 43(3): 393-409.
- Huber, J. A., H. P. Johnson, D. A. Butterfield and J. A. Baross (2006). "Microbial life in ridge flank crustal fluids." *Environmental Microbiology* 8(1): 88-99.
- Huber, R., J. Stöhr, S. Hohenhaus, R. Rachel, S. Burggraf, H. W. Jannasch and K. O. Stetter (1995). "Thermococcus chitonophagus sp. nov., a novel, chitin-degrading, hyperthermophilic archaeum from a deep-sea hydrothermal vent environment." *Archives of microbiology* 164(4): 255-264.
- Huber, R., M. Kurr, H. Jannasch and K. Stetter (1989). "A novel group of abyssal methanogenic archaeobacteria (*Methanopyrus*) growing at 110 C." *Nature* 342(6251): 833-834.

- Huber, R., S. Burggraf, T. Mayer, S. Barns, P. Rossnagel and K. Stetter (1995). "Isolation of a hyperthermophilic archaeum predicted by in situ RNA analysis." *Nature* 376(6535): 57-58.
- Huber, R., T. A. Langworthy, H. König, M. Thomm, C. R. Woese, U. B. Sleytr and K. O. Stetter (1986). "Thermotoga maritima sp. nov. represents a new genus of unique extremely thermophilic eubacteria growing up to 90 C." *Archives of Microbiology* 144(4): 324-333.
- Huber, R., T. Wilharm, D. Huber, A. Trincone, S. Burggraf, H. König, R. Reinhard, I. Rockinger, H. Fricke and K. O. Stetter (1992). "Aquifex pyrophilus gen. nov. sp. nov., Represents a Novel Group of Marine Hyperthermophilic Hydrogen-Oxidizing Bacteria." *Systematic and Applied Microbiology* 15(3): 340-351.
- Hügler, M. and S. M. Sievert (2011). "Beyond the Calvin cycle: autotrophic carbon fixation in the ocean." *Marine Science* 3.
- Hunt, H. L., A. Metaxas, R. M. Jennings, K. M. Halanych and L. S. Mullineaux (2004). "Testing biological control of colonization by vestimentiferan tubeworms at deep-sea hydrothermal vents (East Pacific Rise, 9 degrees 50 ' N)." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 51(2): 225-234.
- Hurtado, L. A., R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (2004). "Distinct patterns of genetic differentiation among annelids of eastern Pacific hydrothermal vents." *Molecular Ecology* 13(9): 2603-2615.
- Hyun, J. H., K. H. Kim, H. S. Jung and K. Y. Lee (1998). "Potential environmental impact of deep seabed manganese nodule mining on the synechococcus (cyanobacteria) in the northeast equatorial pacific: Effect of bottom water-sediment slurry." *Marine georesources & geotechnology* 16(2): 133-143.
- Inagaki, F., K. Takai, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Sulfurovum lithotrophicum gen. nov., sp nov., a novel sulfur-oxidizing chemolithoautotroph within the epsilon-Proteobacteria isolated from Okinawa Trough hydrothermal sediments." *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 54: 1477-1482.
- Inagaki, F., K. Takai, K. I. Hideki, K. H. Nealson and K. Horikishi (2003). "Sulfurimonas autotrophica gen. nov., sp nov., a novel sulfur-oxidizing epsilon-proteobacterium isolated from hydrothermal sediments in the Mid-Okinawa Trough." *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 53: 1801-1805.
- Ingole, B. and J. A. Koslow (2005). "Deep-sea ecosystems of the Indian ocean." *Indian Journal of Marine Sciences* 34(1): 27-34.
- Ingole, B., Z. Ansari, V. Rathod and N. Rodrigues (2001). "Response of deep-sea macrobenthos to a small-scale environmental disturbance." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3401-3410.
- Ingole, B., Z. Ansari, V. Rathod and N. Rodrigues (2000). "Response of meiofauna to immediate benthic disturbance in the Central Indian Ocean Basin." *Marine georesources & geotechnology* 18(3): 263-272.
- International Seabed Authority (2007). Polymetallic sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts deposits, establishment of environmental baselines and an associated monitoring programme during exploration: proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica, 6-10 September 2004, International Seabed Authority.
- Izumi, H., T. Nunoura, M. Miyazaki, S. Mino, T. Toki, K. Takai, Y. Sako, T. Sawabe and S. Nakagawa (2012). "Thermotomaculum hydrothermale gen. nov., sp. nov., a novel

heterotrophic thermophile within the phylum Acidobacteria from a deep-sea hydrothermal vent chimney in the Southern Okinawa Trough." *Extremophiles* 16(2): 245-253.

Jan, C. (2012). "Approche métagénomique de la chimiosynthèse en système hydrothermal océanique profond: cas des symbioses bactériennes associées à la crevette *Rimicaris exoculata*." Université de Bretagne Occidentale, Brest, pp. 383.

Jannasch, H. (1985). "Review lecture: The chemosynthetic support of life and the microbial diversity at deep-sea hydrothermal vents." *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*: 277-297.

Jannasch, H. W. (1995). "Microbial ecology - life at the sea-floor." *Nature* 374(6524): 676-677.

Jannasch, H. W., C. O. Wirsen, D. C. Nelson and L. A. Robertson (1985). "*Thiomicrospira crunogena* sp. nov., a colorless, sulfur-oxidizing bacterium from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic bacteriology* 35(4): 422-424.

Jannasch, H. W., C. O. Wirsen, S. J. Molyneaux and T. A. Langworthy (1988). "Extremely thermophilic fermentative archaeobacteria of the genus *Desulfurococcus* from deep-sea hydrothermal vents." *Applied and environmental microbiology* 54(5): 1203-1209.

Jannasch, H. W., D. C. Nelson and C. O. Wirsen (1989). "Massive natural occurrence of unusually large bacteria (*Beggiatoa* sp.) at a hydrothermal deep-sea vent site." *Nature* 342(6251): 834-836.

Jannasch, H. W., R. Huber, S. Belkin and K. O. Stetter (1988). "*Thermotoga neapolitana* sp. nov. of the extremely thermophilic, eubacterial genus *Thermotoga*." *Archives of Microbiology* 150(1): 103-104.

Janssen, A., Miljutin, D.M., Albers, L., Mohrbeck, I., Martinez Arbizu, P., Kaiser, S., Larsen, K., Neal, L., Rogacheva, A., Menot, L., Ruhlemann, C., (2012). "Deep-sea treasures - macrobenthic assemblages of the tropical Pacific nodule province (Clarion-Clipperton Fracture Zone)." 13th Deep-Sea Biology Symposium, Wellington, New-Zealand.

Jeanthon, C. (2000). "Molecular ecology of hydrothermal vent microbial communities." *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology* 77(2): 117-133.

Jeanthon, C., S. L'Haridon, A. Reysenbach, M. Vernet, P. Messner, U. Sleytr and D. Prieur (1998). "*Methanococcus infernus* sp. nov., a novel hyperthermophilic lithotrophic methanogen isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic bacteriology* 48(3): 913-919.

Jeanthon, C., S. L'Haridon, A.-L. Reysenbach, E. Corre, M. Vernet, P. Messner, U. Sleytr and D. Prieur (1999). "*Methanococcus vulcanius* sp. nov., a novel hyperthermophilic methanogen isolated from East Pacific Rise, and identification of *Methanococcus* sp. DSM 4213 as *Methanococcus fervens* sp. nov." *International journal of systematic bacteriology* 49(2): 583-589.

Jeanthon, C., S. L'Haridon, V. Cueff, A. Banta, A.-L. Reysenbach and D. Prieur (2002). "*Thermodesulfobacterium hydrogeniphilum* sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, sulfate-reducing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent at Guaymas Basin, and emendation of the genus *Thermodesulfobacterium*." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(3): 765-772.

Jetten, M. S. (2008). "The microbial nitrogen cycle." *Environmental microbiology* 10(11): 2903-2909.

- Johnson, H. P. and V. Tunnicliffe (1985). "Time-series measurements of hydrothermal activity on northern Juan-de-Fuca Ridge." *Geophysical research letters* 12(10): 685-688.
- Johnson, K. S., J. J. Childress, C. L. Beehler and C. M. Sakamoto (1994). "Biogeochemistry of hydrothermal vent mussel communities - the deep-sea analog to the intertidal zone." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 41(7): 993-1011.
- Johnson, K. S., J. J. Childress, R. R. Hessler, C. M. Sakamoto and C. L. Beehler (1988). "Chemical and biological interactions in the Rose Garden hydrothermal vent field, Galapagos spreading center." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 35(10-11): 1723-1744.
- Johnson, S. B., C. R. Young, W. J. Jones, A. Waren and R. C. Vrijenhoek (2006). "Migration, isolation, and speciation of hydrothermal vent limpets (Gastropoda ; Lepetodrilidae) across the Blanco Transform Fault." *Biological Bulletin* 210(2): 140-157.
- Johnson, S. B., Y.-J. Won, J. B. Harvey and R. C. Vrijenhoek (2013). "A hybrid zone between *Bathymodiolus* mussel lineages from eastern Pacific hydrothermal vents." *BMC evolutionary biology* 13(1): 21.
- Jolivet, E., E. Corre, S. L'Haridon, P. Forterre and D. Prieur (2004). "Thermococcus marinus sp. nov. and Thermococcus radiotolerans sp. nov., two hyperthermophilic archaea from deep-sea hydrothermal vents that resist ionizing radiation." *Extremophiles* 8(3): 219-227.
- Jollivet, D. (1993). Distribution et évolution de la faune associée aux sources hydrothermales profondes à 13°N sur la dorsale du Pacifique oriental: le cas particulier des polychètes Alvinellidae.
- Jollivet, D. (1996). "Specific and genetic diversity at deep-sea hydrothermal vents: An overview." *Biodiversity and Conservation* 5(12): 1619-1653.
- Jollivet, D., A. Empis, M. Baker, S. Hourdez, T. Comtet, C. Jouin-Toulmond, D. Desbruyeres and P. Tyler (2000). "Reproductive biology, sexual dimorphism, and population structure of the deep sea hydrothermal vent scale-worm, *Branchipolynoe seepensis* (Polychaeta: Polynoidae)." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 80(1): 55-68.
- Jollivet, D., D. Desbruyeres, F. Bonhomme and D. Moraga (1995). "Genetic differentiation of deep-sea hydrothermal vent alvinellid populations (Annelida: Polychaeta) along the East Pacific Rise." *Heredity* 74(4): 376-391.
- Jollivet, D., F. Lallier, A. Barnay, N. Bienvenue, N. Bonnivard, P. Briand, M. Cambon-Bonavita, T. Comtet, R. Cosson and C. Daguin (2004). "The BIOSPEEDO cruise: a new survey of hydrothermal vents along the South East Pacific Rise from 7 24' S to 21 33' S." *InterRidge News* 13: 20-26.
- Jollivet, D., P. Chevaldonne and B. Planque (1999). "Hydrothermal-vent alvinellid polychaete dispersal in the eastern Pacific. 2. A metapopulation model based on habitat shifts." *Evolution* 53(4): 1128-1142.
- Jones, W., J. Leigh, F. Mayer, C. Woese and R. Wolfe (1983). "Methanococcus jannaschii sp. nov., an extremely thermophilic methanogen from a submarine hydrothermal vent." *Archives of Microbiology* 136(4): 254-261.
- Jørgensen, B. B. and N. P. Revsbech (1983). "Colorless Sulfur Bacteria, *Beggiatoa* spp. and *Thiovulum* spp., in O₂ and H₂S Microgradients." *Applied and environmental microbiology* 45(4): 1261-1270.

- Jumars, P. A. (1981). "Limits in Predicting and Detecting Benthic Community Responses to Manganese Nodule Mining." *MAR. MIN.* 3(1): 213-229.
- Juniper, S. K. and V. Tunnicliffe (1997). "Crustal accretion and the hot vent ecosystem." *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 355(1723): 459-474.
- Juniper, S. K., I. R. Jonasson, V. Tunnicliffe and A. J. Southward (1992). "Influence of a tube-building polychaete on hydrothermal chimney mineralization." *Geology* 20(10): 895-898.
- Juniper, S. K., P. Martineu, J. Sarrazin and Y. Gelinás (1995). "Microbial-mineral floc associated with nascent hydrothermal activity on CoAxial Segment, Juan de Fuca Ridge." *Geophysical Research Letters* 22(2): 179-182.
- Juniper, S. K., V. Tunnicliffe and E. C. Southward (1992). Juniper, S. K., et al. (1992). "Hydrothermal vents in turbidite sediments on a northeast Pacific spreading center - organisms and substratum at an ocean drilling site." *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie* 70(9): 1792-1809.
- Kadar, E., R. Bettencourt and A. Lobo-Da-Cunha (2006). "Gamma-proteobacteria detected in the digestive gland of the vent mussel *Bathymodiolus azoricus*." *Cahiers de biologie marine* 47(4): 429-434.
- Kádár, E., R. Bettencourt, V. Costa, R. S. Santos, A. Lobo-da-Cunha and P. Dando (2005). "Experimentally induced endosymbiont loss and re-acquirement in the hydrothermal vent bivalve *Bathymodiolus azoricus*." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 318(1): 99-110.
- Kádár, E., V. Costa and R. S. Santos (2006). "Distribution of micro-essential (Fe, Cu, Zn) and toxic (Hg) metals in tissues of two nutritionally distinct hydrothermal shrimps." *Science of The Total Environment* 358(1-3): 143-150.
- Kádár, E., V. Costa, I. Martins, R. S. Santos and J. J. Powell (2005). "Enrichment in trace metals (Al, Mn, Co, Cu, Mo, Cd, Fe, Zn, Pb and Hg) of macro-invertebrate habitats at hydrothermal vents along the Mid-atlantic Ridge." *Hydrobiologia* 548(1): 191-205.
- Kádár, E., V. Costa, R. S. Santos and J. J. Powell (2006). "Tissue partitioning of micro-essential metals in the vent bivalve *Bathymodiolus azoricus* and associated organisms (endosymbiont bacteria and a parasite polychaete) from geochemically distinct vents of the Mid-Atlantic Ridge." *Journal of Sea Research* 56(1): 45-52.
- Kadko, D., J. Baross and J. Alt (1995). "The magnitude and global implications of hydrothermal flux." *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*: 446-466.
- Kallmeyer, J. and A. Boetius (2004). "Effects of temperature and pressure on sulfate reduction and anaerobic oxidation of methane in hydrothermal sediments of Guaymas Basin." *Applied and environmental microbiology* 70(2): 1231-1233.
- Kamenskaya, O. E., V. F. Melnik and A. J. Gooday (2012). "Giant protists (xenophyophores and komokiaceans) from the Clarion-Clipperton ferromanganese nodule field (Eastern Pacific)." *Zhurnal Obshchei Biologii* 73(5): 377-388.
- Kamenskaya, O., A. J. Gooday, T. Radziejewska and B. Wawrzyniak-Wydrowska (2012). "Large, enigmatic foraminiferan-like protists in the eastern part of the Clarion-Clipperton Fracture Zone (abyssal north-eastern subequatorial Pacific): biodiversity and vertical distribution in the sediment." *Marine Biodiversity* 42(3): 311-327.

- Karl, D. (1995). "Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities." *The microbiology of deep-sea hydrothermal vents*: 35-124.
- Kashefi, K., D. E. Holmes, A.-L. Reysenbach and D. R. Lovley (2002). "Use of Fe (III) as an electron acceptor to recover previously uncultured hyperthermophiles: isolation and characterization of *Geothermobacterium ferrireducens* gen. nov., sp. nov." *Applied and Environmental Microbiology* 68(4): 1735-1742.
- Kashefi, K., D. E. Holmes, J. A. Baross and D. R. Lovley (2003). "Thermophily in the Geobacteraceae: *Geothermobacter ehrlichii* gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic member of the Geobacteraceae from the "Bag City" hydrothermal vent." *Applied and environmental microbiology* 69(5): 2985-2993.
- Kashefi, K., J. M. Tor, D. E. Holmes, C. V. G. Van Praagh, A.-L. Reysenbach and D. R. Lovley (2002). "*Geoglobus ahangari* gen. nov., sp. nov., a novel hyperthermophilic archaeon capable of oxidizing organic acids and growing autotrophically on hydrogen with Fe (III) serving as the sole electron acceptor." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(3): 719-728.
- Kato, S., C. Kobayashi, T. Kakegawa and A. Yamagishi (2009). "Microbial communities in iron-silica-rich microbial mats at deep-sea hydrothermal fields of the Southern Mariana Trough." *Environmental microbiology* 11(8): 2094-2111.
- Kato, S., Y. Takano, T. Kakegawa, H. Oba, K. Inoue, C. Kobayashi, M. Utsumi, K. Marumo, K. Kobayashi and Y. Ito (2010). "Biogeography and biodiversity in sulfide structures of active and inactive vents at deep-sea hydrothermal fields of the Southern Mariana Trough." *Applied and environmental microbiology* 76(9): 2968-2979.
- Kawasumi, T., Y. Igarashi, T. Kodama and Y. Minoda (1984). "*Hydrogenobacter thermophilus* gen. nov., sp. nov., an extremely thermophilic, aerobic, hydrogen-oxidizing bacterium." *International Journal of Systematic Bacteriology* 34(1): 5-10.
- Keller, M., F.-J. Braun, R. Dirmeier, D. Hafenbradl, S. Burggraf, R. Rachel and K. O. Stetter (1995). "*Thermococcus alcaliphilus* sp. nov., a new hyperthermophilic archaeum growing on polysulfide at alkaline pH." *Archives of microbiology* 164(6): 390-395.
- Kelley, D. S., J. A. Karson, D. K. Blackman, G. L. Früh-Green, D. A. Butterfield, M. D. Lilley, E. J. Olson, M. O. Schrenk, K. K. Roe and G. T. Lebon (2001). "An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30 N." *Nature* 412(6843): 145-149.
- Kelley, D. S., J. A. Karson, G. L. Früh-Green, D. R. Yoerger, T. M. Shank, D. A. Butterfield, J. M. Hayes, M. O. Schrenk, E. J. Olson and G. Proskurowski (2005). "A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field." *Science* 307(5714): 1428-1434.
- Khripounoff, A. (2013). Communication personnelle.
- Khripounoff, A., J.-C. Caprais, P. Crassous and J. Etoubleau (2006). "Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule fields of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5,000-m depth." *Limnology and oceanography* 51(5): 2033-2041.
- Kim Juniper, S. and J. Sarrazin (1995). "Interaction of vent biota and hydrothermal deposits: present evidence and future experimentation." *Geophysical Monograph Series* 91: 178-193.
- Kim, S. L. and L. S. Mullineaux (1998). "Distribution and near-bottom transport of larvae and other plankton at hydrothermal vents." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 423-440.

- Kim, S. L., L. S. Mullineaux and K. R. Helfrich (1994). "Larval dispersal via entrainment into hydrothermal vent plumes." *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 99(C6): 12655-12665.
- Kimura, M., T. Tanaka, M. Kyo, M. Ando, T. Oomori, E. Izawa and I. Yoshikawa (1989). "Study of topography, hydrothermal deposits and animal colonies in the middle Okinawa Trough hydrothermal areas using the submersible Shinkai 2000 system." *JAMSTECTR Deepsea Res*(5): 223-234.
- Kojima, S. (2002). "Deep-sea chemoautotrophy-based communities in the Northwestern Pacific." *Journal of Oceanography* 58(2): 343-363.
- Kojima, S., R. Segawa, Y. Fujiwara, K. Fujikura, S. Ohta and J. Hashimoto (2001). "Phylogeny of Hydrothermal-Vent-Endemic Gastropods *Alviniconcha* spp. from the Western Pacific Revealed by Mitochondrial DNA Sequences." *The Biological Bulletin* 200(3): 298-304.
- Kojima, S., R. Segawa, Y. Fujiwara, J. Hashimoto and S. Ohta (2000). "Genetic differentiation of populations of a hydrothermal vent-endemic gastropod, *Ifremeria nautilei*, between the North Fiji Basin and the Manus Basin revealed by nucleotide sequences of mitochondrial DNA." *Zoological Science* 17(8): 1167-1174.
- Kojima, S., S. Ohta, T. Yamamoto, T. Miura, Y. Fujiwara, K. Fujikura and J. Hashimoto (2002). "Molecular taxonomy of vestimentiferans of the western Pacific and their phylogenetic relationship to species of the eastern Pacific." *Marine Biology* 141(1): 57-64.
- Kokoszka F. (2012). "Estimations du mélange vertical le long des sections hydrologiques en Atlantique nord". Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale.
- Koschinsky, A., A. Billings, C. D'avey, N. Dubilier, A. Düster, D. Edge, D. Garbeschönberg, C. German, O. Giere and R. Keir (2006). "Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4 S–10 S) during cruise M68/1." *InterRidge News* 15: 9-15.
- Koschinsky, A., B. Gaye-Haake, C. Arndt, G. Maue, A. Spitz, A. Winkler and P. Halbach (2001). "Experiments on the influence of sediment disturbances on the biogeochemistry of the deep-sea environment." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3629-3651.
- Koslow, J., K. Gowlett-Holmes, J. Lowry, T. O'hara, G. Poore and A. Williams (2001). "Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: community structure and impacts of trawling." *Marine Ecology Progress Series* 213(11): 111-125.
- Kurr, M., R. Huber, H. König, H. W. Jannasch, H. Fricke, A. Trincone, J. K. Kristjansson and K. O. Stetter (1991). "*Methanopyrus kandleri*, gen and sp-nov represents a novel group of hyperthermophilic methanogens, growing at 110°-C." *Archives of microbiology* 156(4): 239-247.
- Kuwabara, T., M. Minaba, N. Ogi and M. Kamekura (2007). "*Thermococcus celericrescens* sp nov., a fast-growing and cell-fusing hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 57: 437-443.
- Kuwabara, T., M. Minaba, Y. Iwayama, I. Inouye, M. Nakashima, K. Marumo, A. Maruyama, A. Sugai, T. Itoh, J. Ishibashi, T. Urabe and M. Kamekura (2005). "*Thermococcus coalescens* sp nov., a cell-fusing hyperthermophilic archaeon from Suiyo Seamount." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 55: 2507-2514.

- Kwak, Y. S., T. Kobayashi, T. Akiba, K. Horikoshi and Y. B. Kim (1995). "A hyperthermophilic sulfur-reducing Archaeobacterium, *Thermococcus* sp dt1331, isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* 59(9): 1666-1669.
- Kyuno, A., M. Shintaku, Y. Fujita, H. Matsumoto, M. Utsumi, H. Watanabe, Y. Fujiwara and J.-I. Miyazaki (2009). "Dispersal and differentiation of deep-sea mussels of the genus *Bathymodiolus* (Mytilidae, Bathymodiolinae)." *Journal of Marine Biology* 2009.
- Lam, P., J. P. Cowen, B. N. Popp and R. D. Jones (2008). "Microbial ammonia oxidation and enhanced nitrogen cycling in the Endeavour hydrothermal plume." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72(9): 2268-2286.
- Lamshead, P. J. D., C. J. Brown, T. J. Ferrero, L. E. Hawkins, C. R. Smith and N. J. Mitchell (2003). "Biodiversity of nematode assemblages from the region of the Clarion-Clipperton Fracture Zone, an area of commercial mining interest." *BMC ecology* 3(1): 1.
- Larock, P. A. and H. L. Ehrlich (1975). "Observations of Bacterial Microcolonies on the Surface of Ferromanganese Nodules from Blake Plateau by Scanning Electron Microscopy." *Microbial ecology* 2(1): 84-96.
- Lartaud, F., C. T. Little, M. De Rafelis, G. Bayon, J. Dymont, B. Ildefonse, V. Gressier, Y. Fouquet, F. Gaill and N. Le Bris (2011). "Fossil evidence for serpentinization fluids fueling chemosynthetic assemblages." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(19): 7698-7703.
- Lartaud, F., M. De Rafelis, G. Oliver, E. Krylova, J. Dymont, B. Ildefonse, R. Thibaud, P. Gente, E. Hoisé and A. L. Meistertzheim (2010). "Fossil clams from a serpentinite-hosted sedimented vent field near the active smoker complex Rainbow, MAR, 36° 13' N: Insight into the biogeography of vent fauna." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11(8).
- Lartaud, F., S. Pareige, M. de Rafelis, L. Feuillassier, M. Bideau, E. Peru, E. De la Vega, K. Nedoncelle, P. Romans and N. Le Bris (2013). "Temporal changes in the growth of two Mediterranean cold-water coral species, in situ and in aquaria." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.
- Lartaud, F., S. Pareige, M. de Rafelis, L. Peuillassier, M. Bideau, E. Peru, P. Romans, F. Alcalá and N. Le Bris (2013). "A new approach for assessing cold-water coral growth in situ using fluorescent calcein staining." *Aquatic Living Resources* 26(2): 187-196.
- Lauerer, G., J. K. Kristjansson, T. A. Langworthy, H. König and K. O. Stetter (1986). "*Methanothermus sociabilis* sp. nov., a Second Species within the Methanothermaceae Growing at 97° C." *Systematic and applied microbiology* 8(1): 100-105.
- Lavelle, J. W. and C. Mohn (2010). "Motion, Commotion, and Biophysical Connections at Deep Ocean Seamounts." *Oceanography* 23(1): 90-103.
- Le Bris, N. and F. Gaill (2007). "How does the annelid *Alvinella pompejana* deal with an extreme hydrothermal environment?" *Life in Extreme Environments*. R. Amils, C. Ellis-Evans and H. Hinghofer-Szalkay, Springer Netherlands: 315-339.
- Le Bris, N. and S. Duperron (2010). "Chemosynthetic communities and biogeochemical energy pathways along the Mid-Atlantic Ridge: The case of *Bathymodiolus azoricus*." *Geophysical Monograph Series* 188: 409-429.
- Le Bris, N., B. Govenar, C. Le Gall and C. R. Fisher (2006). "Variability of physico-chemical conditions in 9 degrees 50 ' N EPR diffuse flow vent habitats." *Marine Chemistry* 98(2-4): 167-182.

- Le Bris, N., L. Anderson, F. Chever and F. Gaill (2008). "Sulfide diffusion and chemoautotrophy requirements in an extremophilic worm tube." *Biological oceanography research trends*. Nova Science, New York: 157-175.
- Le Bris, N., M. Zbinden and F. Gaill (2005). "Processes controlling the physico-chemical micro-environments associated with Pompeii worms." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 52(6): 1071-1083.
- Le Bris, N., P. M. Sarradin and J. C. Caprais (2003). "Contrasted sulphide chemistries in the environment of 13 de grees N EPR vent fauna." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 50(6): 737-747.
- Le Bris, N., P. M. Sarradin and S. Pennec (2001). "A new deep-sea probe for in situ pH measurement in the environment of hydrothermal vent biological communities." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 48(8): 1941-1951.
- Le Bris, N., P. M. Sarradin, D. Birot and A. M. Alayse-Danet (2000). "A new chemical analyzer for in situ measurement of nitrate and total sulfide over hydrothermal vent biological communities." *Marine Chemistry* 72(1): 1-15.
- Le Calvez, T., G. Burgaud, S. Mahe, G. Barbier and P. Vandenkoornhuys (2009). "Fungal Diversity in Deep-Sea Hydrothermal Ecosystems." *Applied and Environmental Microbiology* 75(20): 6415-6421.
- Le Roy, M. (2009). *Suivi temporel de la diversité microbienne dans une cheminée hydrothermale active*. Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- Ledwell, J. R., A. J. Watson, and C. S. Law. "Evidence for slow mixing across the pycnocline from an open-ocean tracer-release experiment." *Nature* 364.6439 (1993): 701-703.
- Lenihan, H. S., S. W. Mills, L. S. Mullineaux, C. H. Peterson, C. R. Fisher and F. Micheli (2008). "Biotic interactions at hydrothermal vents: Recruitment inhibition by the mussel *Bathymodiolus thermophilus*." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 55(12): 1707-1717.
- Levesque, C. and S. K. Juniper (2002). "Particulate matter as a food source at a nascent hydrothermal vent on the Juan de Fuca Ridge." *Cahiers De Biologie Marine* 43(3-4): 289-292.
- Levesque, C., H. Limen and S. K. Juniper (2005). Levesque, C., et al. (2005). "Origin, composition and nutritional quality of particulate matter at deep-sea hydrothermal vents on Axial Volcano, NE Pacific." *Marine Ecology Progress Series* 289: 43-52.
- Levesque, C., S. K. Juniper and J. Marcus (2003). "Food resource partitioning and competition among alvinellid polychaetes of Juan de Fuca Ridge hydrothermal vents." *Marine Ecology Progress Series* 246: 173-182.
- Levin, L. A., D. F. Boesch, A. Covich, C. Dahm, C. Erséus, K. C. Ewel, R. T. Kneib, A. Moldenke, M. A. Palmer and P. Snelgrove (2001). "The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity." *Ecosystems* 4(5): 430-451.
- Levin, L. A., G. F. Mendoza, T. Konotchick and R. Lee (2009). Levin, L. A., et al. (2009). "Macrobenthos community structure and trophic relationships within active and inactive Pacific hydrothermal sediments." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1632-1648.
- Levin, L. A., M. Sibuet, A. J. Gooday, C. R. Smith and A. Vanreusel (2010). "The roles of habitat heterogeneity in generating and maintaining biodiversity on continental margins: an introduction." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 31(1): 1-5.

- Levin, L. A., V. J. Orphan, G. W. Rouse, A. E. Rathburn, W. Ussler, G. S. Cook, S. K. Goffredi, E. M. Perez, A. Waren and B. M. Grupe (2012). "A hydrothermal seep on the Costa Rica margin: middle ground in a continuum of reducing ecosystems." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279(1738): 2580-2588.
- L'Haridon, S., A.-L. Reysenbach, A. Banta, P. Messner, P. Schumann, E. Stackebrandt and C. Jeanthon (2003). "Methanocaldococcus indicus sp. nov., a novel hyperthermophilic methanogen isolated from the Central Indian Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(6): 1931-1935.
- L'Haridon, S., A.-L. Reysenbach, B. Tindall, P. Schönheit, A. Banta, U. Johnsen, P. Schumann, A. Gambacorta, E. Stackebrandt and C. Jeanthon (2006). "Desulfurobacterium atlanticum sp. nov., Desulfurobacterium pacificum sp. nov. and Thermovibrio guaymasensis sp. nov., three thermophilic members of the Desulfurobacteriaceae fam. nov., a deep branching lineage within the Bacteria." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 56(12): 2843-2852.
- L'Haridon, S., M. Miroshnichenko, N. Kostrikina, B. Tindall, S. Spring, P. Schumann, E. Stackebrandt, E. Bonch-Osmolovskaya and C. Jeanthon (2006). "Vulcanibacillus modesticaldus gen. nov., sp. nov., a strictly anaerobic, nitrate-reducing bacterium from deep-sea hydrothermal vents." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 56(5): 1047-1053.
- L'Haridon, S., V. Cilia, P. Messner, G. Raguenes, A. Gambacorta, U. Sleytr, D. Prieur and C. Jeanthon (1998). "Desulfurobacterium thermolithotrophum gen. nov., sp. nov., a novel autotrophic, sulphur-reducing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic bacteriology* 48(3): 701-711.
- Liao, L., X. W. Xu, X. W. Jiang, C. S. Wang, D. S. Zhang, J. Y. Ni and M. Wu (2011). "Microbial diversity in deep-sea sediment from the cobalt-rich crust deposit region in the Pacific Ocean." *FEMS microbiology ecology* 78(3): 565-585.
- Limen, H. and S. K. Juniper (2006). "Habitat controls on vent food webs at Eifuku Volcano, Mariana Arc." *Cahiers De Biologie Marine* 47(4): 449-455.
- Limen, H., C. Levesque and S. K. Juniper (2007). "POM in macro-/meiofaunal food webs associated with three flow regimes at deep-sea hydrothermal vents on Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge." *Marine Biology* 153(2): 129-139.
- Limen, H., S. K. Juniper, V. Tunnicliffe and M. Clement (2006). "Benthic community structure on two peaks of an erupting seamount: Northwest Rota-1 Volcano, Mariana Arc, western Pacific." *Cahiers de biologie marine* 47(4): 457.
- Little, S. A., K. D. Stolzenbach and R. P. Von Herzen (1987). "Measurements of plume flow from a hydrothermal vent field." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) 92(B3): 2587-2596.
- Llodra, E. R., P. A. Tyler and J. T. Copley (2000). "Reproductive biology of three caridean shrimp, Rimicaris exoculata, Chorocaris chacei and Mirocaris fortunata (Caridea: Decapoda), from hydrothermal vents." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 80(3): 473-484.
- Longnecker, K. and A. L. Reysenbach (2001). "Expansion of the geographic distribution of a novel lineage of ϵ -Proteobacteria to a hydrothermal vent site on the Southern East Pacific Rise." *FEMS microbiology ecology* 35(3): 287-293.

- Lonsdale, P. (1977). "Deep-tow observations at mounds abyssal hydrothermal field, Galapagos Rift." *Earth and Planetary Science Letters* 36(1): 92-110.
- Lopez-Garcia, P., A. Vereshchaka and D. Moreira (2007). "Eukaryotic diversity associated with carbonates and fluid-seawater interface in Lost City hydrothermal field." *Environmental Microbiology* 9(2): 546-554.
- López-García, P., F. Gaill and D. Moreira (2002). "Wide bacterial diversity associated with tubes of the vent worm *Riftia pachytila*." *Environmental microbiology* 4(4): 204-215.
- Lopez-Garcia, P., H. Philippe, F. Gail and D. Moreira (2003). "Autochthonous eukaryotic diversity in hydrothermal sediment and experimental microcolonizers at the Mid-Atlantic Ridge." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(2): 697-702.
- Luther, G. W., T. F. Rozan, M. Taillefert, D. B. Nuzzio, C. Di Meo, T. M. Shank, R. A. Lutz and S. C. Cary (2001). "Chemical speciation drives hydrothermal vent ecology." *Nature* 410(6830): 813-816.
- Lutz, R. (1988). "Dispersal of organisms at deep-sea hydrothermal vents: a review." *Oceanol. Acta* 8: 23-29.
- Lutz, R. A., T. M. Shank and R. Evans (2001). Lutz, R. A., T. M. Shank, et al. (2001). "Life after death in the deep sea." *American Scientist* 89(5): 422-431.
- Lutz, R. A., T. M. Shank, et al. Lutz, R., T. Shank, G. Luther III, C. Vetriani, M. Tolstoy, D. Nuzzio, T. Moore, F. Waldhauser, M. Crespo-Medina and A. Chatziefthimou (2008). "Interrelationships between vent fluid chemistry, temperature, seismic activity, and biological community structure at a mussel-dominated, deep-sea hydrothermal vent along the East Pacific Rise." *Journal of Shellfish Research* 27(1): 177-190.
- Maas, P. A., G. D. O'Mullan, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (1999). "Genetic and morphometric characterization of mussels (*Bivalvia* : *Mytilidae*) from Mid-Atlantic hydrothermal vents." *Biological Bulletin* 196(3): 265-272.
- Madigan, M. T. and J. M. Martinko (2007). *Brock biologie des micro-organismes*, Pearson Education France.
- Maier, C., A. Schubert, M. M. B. Sánchez, M. G. Weinbauer, P. Watremez and J.-P. Gattuso (2013). "End of the Century pCO₂ Levels Do Not Impact Calcification in Mediterranean Cold-Water Corals." *PloS one* 8(4): e62655.
- Makita, H., S. Nakagawa, M. Miyazaki, K.-i. Nakamura, F. Inagaki and K. Takai (2012). "Thiofractor thiocaminus gen. nov., sp. nov., a novel hydrogen-oxidizing, sulfur-reducing epsilonproteobacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent chimney in the Nikko Seamount field of the northern Mariana Arc." *Archives of microbiology* 194(9): 785-794.
- Marcon, Y., H. Sahling, C. Borowski, C. dos Santos Ferreira, J. Thal and G. Bohrmann (2013). "Megafaunal distribution and assessment of total methane and sulfide consumption by mussel beds at Menez Gwen hydrothermal vent, based on geo-referenced photomosaics." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*.
- Marcus, J. and V. Tunnicliffe (2002). "Living on the edges of diffuse vents on the Juan de Fuca Ridge." *Cahiers de biologie marine* 43(3-4): 263-266.
- Marcus, J., V. Tunnicliffe and D. A. Butterfield (2009). "Post-eruption succession of macrofaunal communities at diffuse flow hydrothermal vents on Axial Volcano, Juan de Fuca

- Ridge, Northeast Pacific." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 56(19-20): 1586-1598.
- Margolis, S. V. and G. P. Glasby (1973). "Microlaminations in marine manganese nodules as revealed by scanning electron microscopy." *Geological Society of America Bulletin* 84(11): 3601-3610.
- Marsh, A. G., L. S. Mullineaux, C. M. Young and D. T. Manahan (2001). "Larval dispersal potential of the tubeworm *Riftia pachyptila* at deep-sea hydrothermal vents." *Nature* 411(6833): 77-80.
- Marsh, L., J. T. Copley, V. A. Huvenne, K. Linse, W. D. Reid, A. D. Rogers, C. J. Sweeting and P. A. Tyler (2012). "Microdistribution of faunal assemblages at deep-sea hydrothermal vents in the Southern Ocean." *PloS one* 7(10): e48348.
- Marteinsson, V. T., J.-L. Birrien, A.-L. Reysenbach, M. Vernet, D. Marie, A. Gambacorta, P. Messner, U. B. Sleytr and D. Prieur (1999). "Thermococcus barophilus sp. nov., a new barophilic and hyperthermophilic archaeon isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic bacteriology* 49(2): 351-359.
- Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl and W. W. Broenkow (1987). "VERTEX: Carbon cycling in the northeast Pacific." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 34(2): 267-285.
- Martin, J. W. and J. C. Christiansen (1995). "A new species of the shrimp genus *Chorocaris* Martin & Hessler, 1990 (Crustacea: Decapoda: Bresiliidae) from hydrothermal vent fields along the Mid-Atlantic Ridge." *Proceedings-Biological Society of Washington* 108: 220-220.
- Martin, J. W. and R. R. Hessler (1990). *Chorocaris vandoverae*, a new genus and species of hydrothermal vent shrimp (Crustacea, Decapoda, Bresiliidae) from the western Pacific, Natural History Museum of Los Angeles County.
- Martineu, P., S. K. Juniper, C. R. Fisher and G. J. Massoth (1997). "Sulfide binding in the body fluids of hydrothermal vent alvinellid polychaetes." *Physiological Zoology* 70(5): 578-588.
- Massoth, G., E. Baker, T. Worthington, J. Lupton, C. de Ronde, R. Arculus, S. Walker, K. i. Nakamura, J. i. Ishibashi and P. Stoffers (2007). "Multiple hydrothermal sources along the south Tonga arc and Valu Fa Ridge." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 8(11).
- Matabos, M., E. Thiebaut, D. Le Guen, F. Sadosky, D. Jollivet and F. Bonhomme (2008). "Geographic clines and stepping-stone patterns detected along the East Pacific Rise in the vetigastropod *Lepetodrilus elevatus* reflect species crypticism." *Marine Biology* 153(4): 545-563.
- Matabos, M., N. Le Bris, S. Pendlebury and E. Thiebaut (2008). "Role of physico-chemical environment on gastropod assemblages at hydrothermal vents on the East Pacific Rise (13 degrees N/EPR)." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 88(5): 995-1008.
- Matabos, M., S. Plouviez, S. Hourdez, D. Desbruyeres, P. Legendre, A. Waren, D. Jollivet and E. Thiebaut (2011). "Faunal changes and geographic crypticism indicate the occurrence of a biogeographic transition zone along the southern East Pacific Rise." *Journal of Biogeography* 38(3): 575-594.
- McClain, C. R. and S. M. Hardy (2010). "The dynamics of biogeographic ranges in the deep sea." *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 277(1700): 3533-3546.

- McClain, C. R., L. Lundsten, J. Barry and A. DeVogelaere (2010). "Assemblage structure, but not diversity or density, change with depth on a northeast Pacific seamount." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 31: 14-25.
- McCliment, E. A., K. M. Voglesonger, P. A. O'Day, E. E. Dunn, J. R. Holloway and S. C. Cary (2006). "Colonization of nascent, deep-sea hydrothermal vents by a novel Archaeal and Nanoarchaeal assemblage." *Environmental microbiology* 8(1): 114-125.
- McCollom, T. M. (2000). "Geochemical constraints on primary productivity in submarine hydrothermal vent plumes." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 47(1): 85-101.
- McCollom, T. M. (2007). "Geochemical constraints on sources of metabolic energy for chemolithoautotrophy in ultramafic-hosted deep-sea hydrothermal systems." *Astrobiology* 7(6): 933-950.
- McCollom, T. M. and E. L. Shock (1997). "Geochemical constraints on chemolithoautotrophic metabolism by microorganisms in seafloor hydrothermal systems." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 61(20): 4375-4391.
- McHatton, S. C., J. P. Barry, H. W. Jannasch and D. C. Nelson (1996). "High nitrate concentrations in vacuolate, autotrophic marine *Beggiatoa* spp." *Applied and environmental microbiology* 62(3): 954-958.
- McKay, L. J., B. J. MacGregor, J. F. Biddle, D. B. Albert, H. P. Mendlovitz, D. R. Hoer, J. S. Lipp, K. G. Lloyd and A. P. Teske (2012). "Spatial heterogeneity and underlying geochemistry of phylogenetically diverse orange and white *Beggiatoa* mats in Guaymas Basin hydrothermal sediments." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 67: 21-31.
- Mehta, M. P. and J. A. Baross (2006). "Nitrogen fixation at 92 C by a hydrothermal vent archaeon." *Science* 314(5806): 1783-1786.
- Mehta, M. P., D. A. Butterfield and J. A. Baross (2003). "Phylogenetic diversity of nitrogenase (*nifH*) genes in deep-sea and hydrothermal vent environments of the Juan de Fuca Ridge." *Applied and environmental microbiology* 69(2): 960-970.
- Menot, L. (2005). "Biodiversity and resilience of macrobenthic communities in the Clarion-Clipperton Fracture Zone." Report to the International Seabed Authority. Ifremer, Brest, p. 28.
- Menot, L., Ruhlemann, C., Galéron, J. (2012). "Bionod scientific shipboard party, 2012. BIONOD: A French-German cruise to study species distribution and biodiversity patterns across polymetallic nodule fields in the North-East Pacific." 13th Deep-Sea Biology Symposium, Wellington, New-Zealand.
- Mével, G. and D. Prieur (1998). "Thermophilic heterotrophic nitrifiers isolated from Mid-Atlantic Ridge deep-sea hydrothermal vents." *Canadian Journal of Microbiology* 44(8): 723-733.
- Mével, G. and D. Prieur (2000). "Heterotrophic nitrification by a thermophilic *Bacillus* species as influenced by different culture conditions." *Canadian Journal of Microbiology* 46(5): 465-473.
- Micheli, F., C. H. Peterson, L. S. Mullineaux, C. R. Fisher, S. W. Mills, G. Sancho, G. A. Johnson and H. S. Lenihan (2002). "Predation structures communities at deep-sea hydrothermal vents." *Ecological Monographs* 72(3): 365-382.

- Miljutin, D. M. and M. A. Miljutina (2009). "Deep-sea nematodes of the family Microalaimidae from the Clarion-Clipperton Fracture Zone (North-Eastern Tropic Pacific), with the descriptions of three new species." *Zootaxa*(2096): 137-172.
- Miljutin, D. M. and M. A. Miljutina (2009). "Description of *Bathynema nodinauti* gen. n., sp. n. and four new *Trophomera* species (Nematoda: Benthimermithidae) from the Clarion-Clipperton Fracture Zone (Eastern Tropic Pacific), supplemented with the keys to genera and species." *Zootaxa*(2096): 173-196.
- Miljutina, M. A. and D. M. Miljutin (2012). "Seven new and four known species of the genus *Acantholaimus* (Nematoda: Chromadoridae) from the abyssal manganese nodule field (Clarion-Clipperton Fracture Zone, North-Eastern Tropical Pacific)." *Helgoland Marine Research* 66(3): 413-462.
- Miljutina, M. A., D. M. Miljutin, R. Mahatma and J. Galéron (2010). "Deep-sea nematode assemblages of the Clarion-Clipperton Nodule Province (Tropical North-Eastern Pacific)." *Marine Biodiversity* 40(1): 1-15.
- Milligan, B. N. and V. Tunnicliffe (1994). "Vent and nonvent faunas of cleft segment, Juan-de-Fuca Ridge, and their relations to lava age." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 99(B3): 4777-4786.
- Mills, S. W., L. S. Mullineaux and P. A. Tyler (2007). "Habitat associations in gastropod species at east Pacific rise hydrothermal vents (9 degrees 50 ' N)." *Biological Bulletin* 212(3): 185-194.
- Miroshnichenko, M. L., E. A. Bonchosmolovskaya, A. Neuner, N. A. Kostrikina, N. A. Chernych and V. A. Alekseev (1989). "Habitat associations in gastropod species at east Pacific rise hydrothermal vents (9 ° 50 ' N)." *Biological Bulletin* 212(3): 185-194.
- Miroshnichenko, M. L., E. A. Bonchosmolovskaya, A. Neuner, N. A. Kostrikina, N. A. Chernych and V. A. Alekseev (1989). "*Thermococcus-stetteri* sp-nov, a new extremely thermophilic marine sulfur-metabolizing archaeobacterium." *Systematic and Applied Microbiology* 12(3): 257-262.
- Miroshnichenko, M., A. Slobodkin, N. Kostrikina, S. L'Haridon, O. Nercessian, S. Spring, E. Stackebrandt, E. Bonch-Osmolovskaya and C. Jeanthon (2003). "*Deferribacter abyssi* sp. nov., an anaerobic thermophile from deep-sea hydrothermal vents of the Mid-Atlantic Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(5): 1637-1641.
- Miroshnichenko, M., G. Gongadze, F. Rainey, A. Kostyukova, A. Lysenko, N. Chernych and E. Bonch-Osmolovskaya (1998). "*Thermococcus gorgonarius* sp. nov. and *Thermococcus pacificus* sp. nov.: heterotrophic extremely thermophilic archaea from New Zealand submarine hot vents." *International journal of systematic bacteriology* 48(1): 23-29.
- Miroshnichenko, M., N. Kostrikina, S. L'Haridon, C. Jeanthon, H. Hippe, E. Stackebrandt and E. Bonch-Osmolovskaya (2002). "*Nautilia lithotrophica* gen. nov., sp. nov., a thermophilic sulfur-reducing epsilon-proteobacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(4): 1299-1304.
- Miroshnichenko, M., S. L'haridon, C. Jeanthon, A. Antipov, N. Kostrikina, B. Tindall, P. Schumann, S. Spring, E. Stackebrandt and E. Bonch-Osmolovskaya (2003). "*Oceanithermus profundus* gen. nov., sp. nov., a thermophilic, microaerophilic, facultatively chemolithoheterotrophic bacterium from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(3): 747-752.

- Miroshnichenko, M., S. L'haridon, O. Nercessian, A. Antipov, N. Kostrikina, B. Tindall, P. Schumann, S. Spring, E. Stackebrandt and E. Bonch-Osmolovskaya (2003). "Vulcanithermus mediatlanticus gen. nov., sp. nov., a novel member of the family Thermaceae from a deep-sea hot vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(4): 1143-1148.
- Miroshnichenko, M., S. L'haridon, P. Schumann, S. Spring, E. Bonch-Osmolovskaya, C. Jeanthon and E. Stackebrandt (2004). "Caminibacter profundus sp. nov., a novel thermophile of Nautiliales ord. nov. within the class 'Epsilonproteobacteria', isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(1): 41-45.
- Miura, T. (1994). "Two new scale-worms (Polynoidae: Polychaeta) from the Lau back-arc and North Fiji basins, South Pacific Ocean." *Proceedings-Biological Society of Washington* 107: 532-532.
- Miura, T. and D. Desbruyères (1995). "Two new species of Opisthotrochopodus (Polychaeta: Polynoidae: Branchinotogluminae) from the Lau and the North Fiji Bac-arc Basins, southwestern Pacific Ocean." *Proceedings-Biological Society of Washington* 108: 583-595.
- Miura, T. and J. Hashimoto (1991). "Two new branchiate scale-worms (Polynoidae: Polychaeta) from the hydrothermal vent of the Okinawa trough and the volcanic seamount off Chichijima Island." *Proceedings of the Biological Society of Washington* 104(1): 166-174.
- Miura, T. and J. Hashimoto (1993). "Mytilidiphila, a new genus of nautiliniellid polychaetes living in the mantle cavity of deep-sea mytilid bivalves collected from the Okinawa Trough." *Zoological Science* 10(1): 169-174.
- Moalic, Y., D. Desbruyeres, C. M. Duarte, A. F. Rozenfeld, C. Bachraty and S. Arnaud-Haond (2012). "Biogeography Revisited with Network Theory: Retracing the History of Hydrothermal Vent Communities." *Systematic Biology* 61(1): 127-137.
- Molodtsova, T. N., N. P. Sanamyan and N. B. Keller (2008). "Anthozoa from the northern mid-Atlantic ridge and charlie-gibbs fracture zone." *Marine Biology Research* 4(1-2): 112-130.
- Monty, C. (1973). "Les nodules de manganese sont des stromatolithes oceaniques." *CR Acad. Sci. Paris* 276: 3285-3288.
- Moore, T. S., T. M. Shank, D. B. Nuzzio and G. W. Luther III (2009). "Time-series chemical and temperature habitat characterization of diffuse flow hydrothermal sites at 9 50' N East Pacific Rise." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1616-1621.
- Morato, T., S. D. Hoyle, V. Allain and S. J. Nicol (2010). "Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(21): 9707-9711.
- Morgan, C. L., J. A. Nichols, B. W. Selk, J. R. Toth and C. Wallin (1993). "Preliminary analysis of exploration data from pacific deposits of manganese nodules." *Marine georesources & geotechnology* 11(1): 1-25.
- Mori, K., A. Maruyama, T. Urabe, K.-I. Suzuki and S. Hanada (2008). "Archaeoglobus infectus sp. nov., a novel thermophilic, chemolithoheterotrophic archaeon isolated from a deep-sea rock collected at Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, western Pacific Ocean." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 58(4): 810-816.

- Mortensen, P., L. Buhl-Mortensen, A. Gebruk and E. Krylova (2008). "Occurrence of deep-water corals on the Mid-Atlantic Ridge based on MAR-ECO data." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55(1): 142-152.
- Moussard, H., S. L'Haridon, B. Tindall, A. Banta, P. Schumann, E. Stackebrandt, A.-L. Reysenbach and C. Jeanthon (2004). "Thermodesulfatator indicus gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic chemolithoautotrophic sulfate-reducing bacterium isolated from the Central Indian Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(1): 227-233.
- Moyer, C. L., F. C. Dobbs and D. M. Karl (1995). "Phylogenetic diversity of the bacterial community from a microbial mat at an active, hydrothermal vent system, Loihi Seamount, Hawaii." *Applied and environmental microbiology* 61(4): 1555-1562.
- Müller, W. E., X. Wang, H. C. Schröder, M. Korzhev, V. A. Grebenjuk, J. S. Markl, K. P. Jochum, D. Pisignano and M. Wiens (2010). "A cryptochrome-based photosensory system in the siliceous sponge *Suberites domuncula* (Demospongiae)." *Febs Journal* 277(5): 1182-1201.
- Mullineaux, L. S. (1987). "Organisms living on manganese nodules and crusts - distribution and abundance at 3 North Pacific sites." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 34(2): 165-184.
- Mullineaux, L. S. (1989). "Vertical distributions of the epifauna on manganese nodules - implications for settlement and feeding." *Limnology and Oceanography* 34(7): 1247-1262.
- Mullineaux, L. S. and S. W. Mills (1997). "A test of the larval retention hypothesis in seamount-generated flows." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 44(5): 745-&.
- Mullineaux, L. S., C. H. Peterson, F. Micheli and S. W. Mills (2003). "Successional mechanism varies along a gradient in hydrothermal fluid flux at deep-sea vents." *Ecological Monographs* 73(4): 523-542.
- Mullineaux, L. S., C. R. Fisher, C. H. Peterson and S. W. Schaeffer (2000). "Tubeworm succession at hydrothermal vents: use of biogenic cues to reduce habitat selection error?" *Oecologia* 123(2): 275-284.
- Mullineaux, L. S., D. K. Adams, S. W. Mills and S. E. Beaulieu (2010). "Larvae from afar colonize deep-sea hydrothermal vents after a catastrophic eruption." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(17): 7829-7834.
- Mullineaux, L. S., F. Micheli, C. H. Peterson, H. S. Lenihan and N. Markus (2009). "Imprint of past environmental regimes on structure and succession of a deep-sea hydrothermal vent community." *Oecologia* 161(2): 387-400.
- Mullineaux, L. S., N. Le Bris, S. W. Mills, P. Henri, S. R. Bayer, R. G. Secrist and N. Siu (2012). "Detecting the influence of initial pioneers on succession at deep-sea vents." *PloS one* 7(12): e50015.
- Mullineaux, L. S., S. W. Mills and E. Goldman (1998). "Recruitment variation during a pilot colonization study of hydrothermal vents (9 ° 50 ' N, East Pacific Rise)." *Deep-Sea Research Part Ii-Topical Studies in Oceanography* 45(1-3): 441-464.
- Munk, W. and C. Wunsch (1998). "Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 45(12): 1977-2010.

- Nagahama, T., M. Hamamoto and K. Horikoshi (2006). "Rhodotorula pacifica sp nov., a novel yeast species from sediment collected on the deep-sea floor of the north-west Pacific Ocean." *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 56: 295-299.
- Nakagawa, S., F. Inagaki, K. Takai, K. Horikoshi and Y. Sako (2005). "Thioreductor micantisoli gen. nov., sp nov., a novel mesophilic, sulfur-reducing chemolithoautotroph within the epsilon-Proteobacteria isolated from hydrothermal sediments in the Mid-Okinawa Trough." *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55: 599-605.
- Nakagawa, S., K. Takai, F. Inagaki, H. Chiba, J. i. Ishibashi, S. Kataoka, H. Hirayama, T. Nunoura, K. Horikoshi and Y. Sako (2005). "Variability in microbial community and venting chemistry in a sediment-hosted backarc hydrothermal system: Impacts of seafloor phase-separation." *FEMS microbiology ecology* 54(1): 141-155.
- Nakagawa, S., K. Takai, F. Inagaki, H. Hirayama, T. Nunoura, K. Horikoshi and Y. Sako (2005). "Distribution, phylogenetic diversity and physiological characteristics of epsilon-Proteobacteria in a deep-sea hydrothermal field." *Environmental microbiology* 7(10): 1619-1632.
- Nakagawa, S., K. Takai, K. Horikoshi and Y. Sako (2003). "Persephonella hydrogeniphila sp. nov., a novel thermophilic, hydrogen-oxidizing bacterium from a deep-sea hydrothermal vent chimney." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(3): 863-869.
- Nakagawa, S., K. Takai, K. Horikoshi and Y. Sako (2004). "Aeropyrum camini sp. nov., a strictly aerobic, hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent chimney." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(2): 329-335.
- Nakagawa, T. and M. Fukui (2003). "Molecular characterization of community structures and sulfur metabolism within microbial streamers in Japanese hot springs." *Applied and environmental microbiology* 69(12): 7044-7057.
- Nakagawa, T., K. Takai, Y. Suzuki, H. Hirayama, U. Konno, U. Tsunogai and K. Horikoshi (2006). "Geomicrobiological exploration and characterization of a novel deep-sea hydrothermal system at the TOTO caldera in the Mariana Volcanic Arc." *Environmental microbiology* 8(1): 37-49.
- Nakagawa, T., S. Nakagawa, F. Inagaki, K. Takai and K. Horikoshi (2004). "Phylogenetic diversity of sulfate-reducing prokaryotes in active deep-sea hydrothermal vent chimney structures." *FEMS microbiology letters* 232(2): 145-152.
- Nakamura, K., H. Watanabe, J. Miyazaki, K. Takai, S. Kawagucci, T. Noguchi, S. Nemoto, T. Watsuji, T. Matsuzaki, T. Shibuya, K. Okamura, M. Mochizuki, Y. Orihashi, T. Ura, A. Asada, D. Marie, M. Koonjul, M. Singh, G. Beedesssee, M. Bhikajee and K. Tamaki (2012). "Discovery of New Hydrothermal Activity and Chemosynthetic Fauna on the Central Indian Ridge at 186 degrees-206 degrees S." *Plos One* 7(3).
- Nedoncelle, K., F. Lartaud, M. de Rafelis, S. Boulila and N. Le Bris (2013). "A new method for high-resolution bivalve growth rate studies in hydrothermal environments." *Marine Biology* 160(6): 1427-1439.
- Nees, H. A., R. A. Lutz, T. M. Shank and G. W. Luther III (2009). "Pre-and post-eruption diffuse flow variability among tubeworm habitats at 9 50' north on the East Pacific Rise." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1607-1615.
- Nees, H. A., T. S. Moore, K. M. Mullaugh, R. R. Holyoke, C. P. Janzen, S. Ma, E. Metzger, T. J. Waite, M. Yucel, R. A. Lutz, T. M. Shank, C. Vetriani, D. B. Nuzzio and G. W. Luther

- (2008). "Hydrothermal vent mussel habitat chemistry, pre- and post-eruption at 9 degrees 50' North on the East Pacific Rise." *Journal of Shellfish Research* 27(1): 169-175.
- Nelson, D. C., C. O. Wirsen and H. W. Jannasch (1989). "Characterization of large, autotrophic *Beggiatoa* spp. abundant at hydrothermal vents of the Guaymas Basin." *Applied and Environmental Microbiology* 55(11): 2909-2917.
- Nelson, D. C., N. P. Revsbech and B. B. Jørgensen (1986). "Microoxic-anoxic niche of *Beggiatoa* spp.: microelectrode survey of marine and freshwater strains." *Applied and environmental microbiology* 52(1): 161-168.
- Nercessian, O., A. L. Reysenbach, D. Prieur and C. Jeanthon (2003). "Archaeal diversity associated with in situ samplers deployed on hydrothermal vents on the East Pacific Rise (13 N)." *Environmental microbiology* 5(6): 492-502.
- Nercessian, O., M. Prokofeva, A. Lebedinski, S. L'Haridon, C. Cary, D. Prieur and C. Jeanthon (2004). "Design of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes for detecting cultured and uncultured archaeal lineages in high-temperature environments." *Environmental microbiology* 6(2): 170-182.
- Neuner, A., H. W. Jannasch, S. Belkin and K. O. Stetter (1990). "*Thermococcus litoralis* sp. nov.: a new species of extremely thermophilic marine archaeobacteria." *Archives of microbiology* 153(2): 205-207.
- Newman, W. A. and T. Yamaguchi (1995). "A new sessile barnacle (Cirripedia, Brachylepadomorpha) from the Lau Back-Arc Basin, Tonga; first record of a living representative since the Miocene." *Bulletin du Muséum national d'histoire naturelle. Section A, Zoologie, biologie et écologie animales* 17(3-4): 221-243.
- Nikurashin, M., G. Vallis, and A. Adcroft (2013). "Routes to energy dissipation for geostrophic flows in the Southern Ocean". *Nature Geoscience*, 6, 48–51.
- Nozawa, F., H. Kitazato, M. Tsuchiya and A. J. Gooday (2006). "'Live' benthic foraminifera at an abyssal site in the equatorial Pacific nodule province: Abundance, diversity and taxonomic composition." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 53(8): 1406-1422.
- Nunoura, T., H. Oida, M. Miyazaki and Y. Suzuki (2008). "*Thermosulfidibacter takaii* gen. nov., sp. nov., a thermophilic, hydrogen-oxidizing, sulfur-reducing chemolithoautotroph isolated from a deep-sea hydrothermal field in the Southern Okinawa Trough." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 58(3): 659-665.
- Nunoura, T., H. Oida, M. Nakaseama, A. Kosaka, S. B. Ohkubo, T. Kikuchi, H. Kazama, S. Hosoi-Tanabe, K.-i. Nakamura and M. Kinoshita (2010). "Archaeal diversity and distribution along thermal and geochemical gradients in hydrothermal sediments at the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field in the Southern Okinawa trough." *Applied and environmental microbiology* 76(4): 1198-1211.
- Nunoura, T., M. Miyazaki, Y. Suzuki, K. Takai and K. Horikoshi (2008). "*Hydrogenivirga okinawensis* sp. nov., a thermophilic sulfur-oxidizing chemolithoautotroph isolated from a deep-sea hydrothermal field, Southern Okinawa Trough." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 58(3): 676-681.
- O'Mullan, G., P. Maas, R. Lutz and R. Vrijenhoek (2001). "A hybrid zone between hydrothermal vent mussels (Bivalvia: Mytilidae) from the Mid-Atlantic Ridge." *Molecular Ecology* 10(12): 2819-2831.

- O'Hara, T. D. (2007). "Seamounts: centres of endemism or species richness for Ophiuroids?" *Global Ecology and Biogeography* 16(6): 720-732.
- Okutani, T. and S. Ohta (1988). "A new gastropod mollusk associated with hydrothermal vents in the Mariana Back-Arc Basin, Western Pacific." *Venus* 47(1): 1-9.
- Okutani, T., Ohta, S., (1993). "New buccinid and turrid gastropods from North Fiji and Lau Basins." *Venus* 52: 217-221.
- Orcutt, B. N., J. B. Sylvan, N. J. Knab and K. J. Edwards (2011). "Microbial ecology of the dark ocean above, at, and below the seafloor." *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 75(2): 361-422.
- Pagé, A., M. K. Tivey, D. S. Stakes and A. L. Reysenbach (2008). "Temporal and spatial archaeal colonization of hydrothermal vent deposits." *Environmental microbiology* 10(4): 874-884.
- Parker, C., K. Von Damm, K. Beers, D. Green, B. Alker and C. German (2005). Time series fluid compositions from the TAG hydrothermal mound, MAR: 1986-2004. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Parulekar, A. H., S. N. Harkantra, Z. A. Ansari and S. G. P. Matondkar (1982). "Abyssal benthos of the Central Indian-ocean." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 29(12): 1531-1537.
- Paterson, G. L., G. D. Wilson, N. Cosson and P. A. Lamont (1998). "Hessler and Jumars (1974) revisited: abyssal polychaete assemblages from the Atlantic and Pacific." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 225-251.
- Pelayo, A. M., S. Stein and C. A. Stein (1994). "Estimation of oceanic hydrothermal heat flux from heat flow and depths of midocean ridge seismicity and magma chambers." *Geophysical research letters* 21(8): 713-716.
- Pérez-Rodríguez, I., A. Grosche, L. Massenburg, V. Starovoytov, R. A. Lutz and C. Vetriani (2012). "*Phorcysia thermohydrogeniphila* gen. nov., sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, nitrate-ammonifying bacterium from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 62(Pt 10): 2388-2394.
- Petersen, J. M., A. Ramette, C. Lott, M. A. Cambon-Bonavita, M. Zbinden and N. Dubilier (2010). "Dual symbiosis of the vent shrimp *Rimicaris exoculata* with filamentous gamma- and epsilon-proteobacteria at four Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent fields." *Environmental microbiology* 12(8): 2204-2218.
- Pikuta, E. V., D. Marsic, T. Itoh, A. K. Bej, J. Tang, W. B. Whitman, J. D. Ng, O. K. Garriott and R. B. Hoover (2007). "*Thermococcus thio-reducens* sp. nov., a novel hyperthermophilic, obligately sulfur-reducing archaeon from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 57(7): 1612-1618.
- Pitcher, T. J., M. R. Clark, T. Morato and R. Watson (2010). "Seamount Fisheries: Do they have a future?" *Oceanography* 23(1): 134.
- Pledger, R. J. and J. A. Baross (1989). "Characterization of an Extremely Thermophilic Archaeobacterium Isolated from a Black Smoker Polychaete (*Paralvinella* sp.) at the Juan de Fuca Ridge." *Systematic and Applied Microbiology* 12(3): 249-256.
- Pledger, R. J. and J. A. Baross (1991). "Preliminary description and nutritional characterization of a chemoorganotrophic archaeobacterium growing at temperatures of up to

- 110° isolated from a submarine hydrothermal vent environment." *Journal of general microbiology* 137(1): 203-211.
- Pley, U., J. Schipka, A. Gambacorta, H. W. Jannasch, H. Fricke, R. Rachel and K. O. Stetter (1991). "Pyrodictium abyssi sp. nov. Represents a Novel Heterotrophic Marine Archaeal Hyperthermophile Growing at 110° C." *Systematic and applied microbiology* 14(3): 245-253.
- Plouviez, S., D. Le Guen, O. Lecompte, F. Lallier and D. Jollivet (2010). "Determining gene flow and the influence of selection across the equatorial barrier of the East Pacific Rise in the tube-dwelling polychaete *Alvinella pompejana*." *BMC evolutionary biology* 10(1): 220.
- Plouviez, S., T. F. Schultz, G. McGinnis, H. Minshall, M. Rudder and C. L. Van Dover (2013). "Genetic diversity of hydrothermal-vent barnacles in Manus Basin." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*.
- Plouviez, S., T. Shank, B. Faure, C. Daguin-Thiebaut, F. Viard, F. Lallier and D. Jollivet (2009). "Comparative phylogeography among hydrothermal vent species along the East Pacific Rise reveals vicariant processes and population expansion in the South." *Molecular Ecology* 18(18): 3903-3917.
- Podowski, E. L., S. Ma, G. W. Luther III, D. Wardrop and C. R. Fisher (2010). "Biotic and abiotic factors affecting distributions of megafauna in diffuse flow on andesite and basalt along the Eastern Lau Spreading Center, Tonga." *Marine Ecology Progress Series* 418: 25-45.
- Podowski, E. L., T. S. Moore, K. A. Zelnio, G. W. Luther III and C. R. Fisher (2009). "Distribution of diffuse flow megafauna in two sites on the Eastern Lau Spreading Center, Tonga." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56(11): 2041-2056.
- Polz, M. F. and C. M. Cavanaugh (1995). "Dominance of one bacterial phylotype at a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent site." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92(16): 7232-7236.
- Polz, M. F., J. J. Robinson, C. M. Cavanaugh and C. L. Van Dover (1998). "Trophic ecology of massive shrimp aggregations at a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent site." *Limnology and Oceanography* 43(7): 1631-1638.
- Polzin, K., J. Toole, J. Ledwell and R. Schmitt (1997). "Spatial variability of turbulent mixing in the abyssal ocean." *Science* 276(5309): 93-96.
- Pond, D., D. Dixon and J. Sargent (1997). "Wax-ester reserves facilitate dispersal of hydrothermal vent shrimps." *Marine Ecology Progress Series* 146(1): 289-290.
- Postec, A., C. Le Breton, M.-L. Fardeau, F. Lesongeur, P. Pignet, J. Querellou, B. Ollivier and A. Godfroy (2005). "Marinitoga hydrogenitolerans sp. nov., a novel member of the order Thermotogales isolated from a black smoker chimney on the Mid-Atlantic Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 55(3): 1217-1221.
- Powell, M. A., R. D. Vetter and G. N. Somero (1987). "Sulfide detoxification and energy exploitation by marine animals." *Comparative physiology: life in water and on land*. Fidia Research series IX-Liviana press, Padova: 241-250.
- Pradillon, F., M. Zbinden, N. Le Bris, S. Hourdez, A. S. Barnay and F. Gaill (2009). "Development of assemblages associated with alvinellid colonies on the walls of high-temperature vents at the East Pacific Rise." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 56(19-20): 1622-1631.

- Pranal, V. (1995). Marqueurs et caractéristiques biochimiques des associations symbiotiques mollusque-bactéries chimiosynthétiques, Université de Paris 06, Paris, FRANCE Travaux Universitaires - Thèse nouveau doctorat: 250p.
- Preisler, A., D. De Beer, A. Lichtschlag, G. Lavik, A. Boetius and B. B. Jørgensen (2007). "Biological and chemical sulfide oxidation in a Beggiatoa inhabited marine sediment." *The ISME journal* 1(4): 341-353.
- Proskurowski, G., M. D. Lilley and E. J. Olson (2008). "Stable isotopic evidence in support of active microbial methane cycling in low-temperature diffuse flow vents at 9 ° 50 ' N East Pacific Rise." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 72(8): 2005-2023.
- Rabus, R., T. A. Hansen and F. Widdel (2006). Dissimilatory sulfate-and sulfur-reducing prokaryotes. *The prokaryotes*, Springer: 659-768.
- Radziejewska, T. (1997). Immediate responses of benthic meio-and megafauna to disturbance caused by polymetallic nodule miner simulator. Proceedings, international symposium, environmental studies for deep-sea mining.
- Radziejewska, T. (2002). " Responses of deep-sea meiobenthic communities to sediment disturbance simulating effects of polymetallic nodule mining (vol 87, p g 461, 2002)." *International review of hydrobiology* 87(5-6): 675-675.
- Radziejewska, T., I. Drzycimski, V. V. Galtsova, L. V. Kulangieva and V. Stoyanova (2001). Changes in genus-level diversity of meiobenthic free-living nematodes (Nematoda) and harpacticoids (Copepoda harpacticoida) at an abyssal site following experimental sediment disturbance. Cupertino, International Society Offshore& Polar Engineers.
- Radziejewska, T., J. Rokicka-Praxmayer and V. Stoyanova (2001). IOM BIE revisited: Meiobenthos at the IOM BIE site 5 years after the experimental disturbance. Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp., Szczecin, Poland.
- Rassa, A. C., S. M. McAllister, S. A. Safran and C. L. Moyer (2009). "Zeta-proteobacteria dominate the colonization and formation of microbial mats in low-temperature hydrothermal vents at Loihi Seamount, Hawaii." *Geomicrobiology Journal* 26(8): 623-638.
- Ravaux, J., F. Gaill, N. Le Bris, P.-M. Sarradin, D. Jollivet and B. Shillito (2003). "Heat-shock response and temperature resistance in the deep-sea vent shrimp *Rimicaris exoculata*." *Journal of Experimental Biology* 206(14): 2345-2354.
- Ravaux, J., G. Hamel, M. Zbinden, A. A. Tasiemski, I. Boutet, N. Leger, A. Tanguy, D. Jollivet and B. Shillito (2013). "Thermal Limit for Metazoan Life in Question: In Vivo Heat Tolerance of the Pompeii Worm." *Plos One* 8(5).
- Ravaux, J., J.-Y. Toullec, N. Léger, P. Lopez, F. Gaill and B. Shillito (2007). "First hsp70 from two hydrothermal vent shrimps, *Mirocaris fortunata* and *Rimicaris exoculata*: Characterization and sequence analysis." *Gene* 386(1): 162-172.
- Ravot, G., B. Ollivier, M. Magot, B. Patel, J. Crolet, M. Fardeau and J. Garcia (1995). "Thiosulfate reduction, an important physiological feature shared by members of the order thermotogales." *Applied and environmental microbiology* 61(5): 2053-2055.
- Reid, W. D., C. J. Sweeting, B. D. Wigham, K. Zwirgmaier, J. A. Hawkes, R. A. McGill, K. Linse and N. V. Polunin (2013). "Spatial differences in East Scotia Ridge hydrothermal vent food webs: influences of chemistry, microbiology and predation on trophodynamics." *Plos one* 8(6): e65553.

- Renaud-Mornant, J. and N. Gourbault (1990). "Evaluation of abyssal meiobenthos in the eastern central Pacific (Clarion-Clipperton fracture zone)." *Progress in Oceanography* 24(1): 317-329.
- Renninger, G., L. Kass, R. Gleeson, C. Van Dover, B. Battelle, R. Jinks, E. Herzog and S. Chamberlain (1995). "Sulfide as a chemical stimulus for deep-sea hydrothermal vent shrimp." *The Biological Bulletin* 189(2): 69-76.
- Reveillaud, J., A. Freiwald, D. Van Rooij, E. Le Guilloux, A. Altuna, A. Foubert, A. Vanreusel, K. Olu-Le Roy and J.-P. Henriët (2008). "The distribution of scleractinian corals in the Bay of Biscay, NE Atlantic." *Facies* 54(3): 317-331.
- Rex, M. A., R. J. Etter, J. S. Morris, J. Crouse, C. R. McClain, N. A. Johnson, C. T. Stuart, J. W. Deming, R. Thies and R. Avery (2006). "Global bathymetric patterns of standing stock and body size in the deep-sea benthos." *Marine Ecology-Progress Series*- 317: 1.
- Reysenbach, A.-L. and S. L. Cady (2001). "Microbiology of a ncient and modern hydrothermal systems." *TRENDS in Microbiology* 9(2): 79-86.
- Reysenbach, A.-L., K. Longnecker and J. Kirshtein (2000). "Novel bacterial and archaeal lineages from an in situ growth chamber deployed at a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent." *Applied and environmental microbiology* 66(9): 3798-3806.
- Reysenbach, A.-L., Y. Liu, A. B. Banta, T. J. Beveridge, J. D. Kirshtein, S. Schouten, M. K. Tivey, K. L. Von Damm and M. A. Voytek (2006). "A ubiquitous thermoacidophilic archaeon from deep-sea hydrothermal vents." *Nature* 442(7101): 444-447.
- Richer de Forges B, Koslow JA, Poore GCB (2000) Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the southwest Pacific. *Nature* 405:944–947
- Rickard, D. (1995). "Kinetics of FeS precipitation: Part 1. Competing reaction mechanisms." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(21): 4367-4379.
- Riddihough, R. (1977). "A model for recent plate interactions off Canada's west coast." *Canadian Journal of Earth Sciences* 14(3): 384-396.
- Riou, V., S. Halary, S. Duperron, S. Bouillon, M. Elskens, R. Bettencourt, R. Santos, F. Dehairs and A. Colaço (2008). "Influence of CH₄ and H₂S availability on symbiont distribution, carbon assimilation and transfer in the dual symbiotic vent mussel *Bathymodiolus azoricus*." *Biogeosciences* 5: 1681-1691.
- Roberts, J. M., A. J. Wheeler and A. Freiwald (2006). "Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems." *Science* 312(5773): 543-547.
- Roberts, J., A. Davies, L. Henry, L. Dodds, G. Duineveld, M. Lavaleye, C. Maier, R. Van Soest, M. Bergman and V. Huhnerbach (2009). "Mingulay reef complex: an interdisciplinary study of cold-water coral habitat, hydrography and biodiversity." *Marine Ecology Progress Series* 397: 139-151.
- Robigou, V., J. R. Delaney and D. S. Stakes (1993). "Large massive sulfide deposits in a newly discovered active hydrothermal system, the High-Rise field, Endeavour segment, Juan de Fuca ridge." *Geophysical Research Letters* 20(17): 1887-1890.
- Robinson, J. J., K. M. Scott, S. T. Swanson, M. H. O Leary, K. Horken, F. R. Tabita and C. M. Cavanaugh (2003). "Kinetic isotope effect and characterization of form II RubisCO from the chemoautotrophic endosymbionts of the hydrothermal vent tubeworm *Riftia pachyptila*." *Limnology and oceanography* 48(1; NUMB 1): 48-54.

- Rodrigues, N., R. Sharma and B. Nagender Nath (2001). "Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3411-3426.
- Roeske, C. and M. H. O'Leary (1984). "Carbon isotope effects on enzyme-catalyzed carboxylation of ribulose biphosphate." *Biochemistry* 23(25): 6275-6284.
- Rogers, D. R., C. M. Santelli and K. J. Edwards (2003). "Geomicrobiology of deep-sea deposits: estimating community diversity from low-temperature seafloor rocks and minerals." *Geobiology* 1(2): 109-117.
- Rona, P. A., K. Boström and S. Epstein (1980). "Hydrothermal quartz vug from the mid-atlantic ridge." *Geology* 8(12): 569-572.
- Rona, P., G. Klinkhammer, T. Nelsen, J. Trefry and H. Elderfield (1986). "Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge."
- Rouxel, O., N. Dobbek, J. Ludden and Y. Fouquet (2003). "Iron isotope fractionation during oceanic crust alteration." *Chemical Geology* 202(1): 155-182.
- Rowden, A. A., J. F. Dower, T. A. Schlacher, M. Consalvey and M. R. Clark (2010). "Paradigms in seamount ecology: fact, fiction and future." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 31: 226-241.
- Rowden, A. A., K. E. Schnabel, T. A. Schlacher, E. Macpherson, S. T. Ahyong and B. Richer de Forges (2010). "Squat lobster assemblages on seamounts differ from some, but not all, deep-sea habitats of comparable depth." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 31: 63-83.
- Rowden, A. A., M. Clark, S. O'Shea and D. McKnight (2003). Benthic biodiversity of seamounts on the southern Kermadec volcanic arc, Ministry of Fisheries.
- Rowden, A. A., T. A. Schlacher, A. Williams, M. R. Clark, R. Stewart, F. Althaus, D. A. Bowden, M. Consalvey, W. Robinson and J. Dowdney (2010). "A test of the seamount oasis hypothesis: seamounts support higher epibenthic megafaunal biomass than adjacent slopes." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 31: 95-106.
- Ruby, E. and H. Jannasch (1982). "Physiological characteristics of *Thiomicrospira* sp. Strain L-12 isolated from deep-sea hydrothermal vents." *Journal of bacteriology* 149(1): 161-165.
- Ruby, E., C. Wirsen and H. Jannasch (1981). "Chemolithotrophic sulfur-oxidizing bacteria from the Galapagos Rift hydrothermal vents." *Applied and environmental microbiology* 42(2): 317-324.
- Rueter, P., R. Rabus, H. Wilkest, F. Aeckersberg, F. A. Rainey, H. W. Jannasch and F. Widdel (1994). "Anaerobic oxidation of hydrocarbons in crude oil by new types of sulphate-reducing bacteria." *Nature* 372(6505): 455-458.
- Russ, L., B. Kartal, H. J. Op Den Camp, M. Sollai, J. Le Bruchec, J.-C. Caprais, A. Godfroy, J. S. S. Damsté and M. S. Jetten (2013). "Presence and diversity of anammox bacteria in cold hydrocarbon-rich seeps and hydrothermal vent sediments of the Guaymas Basin." *Frontiers in microbiology* 4.
- Sabatier, P., J.-L. Reyss, J. M. Hall-Spencer, C. Colin, N. Frank, N. Tisnerat-Laborde, L. Bordier and E. Douville (2012). "210Pb-226Ra chronology reveals rapid growth rate of *Madrepora oculata* and *Lophelia pertusa* on world's largest cold-water coral reef." *Biogeosciences* 9: 1253-1265.

- Saldanha, L. and M. Biscoito (1997). "Fishes from the Lucky Strike and Menez Gwen hydrothermal vent sites (Mid-Atlantic Ridge)." *Boletim do Museu Municipal do Funchal* 49: 189-206.
- Samadi, S., L. Botton, E. Macpherson, B. R. De Forges and M.-C. Boisselier (2006) "Seamount endemism questioned by the geographic distribution and population genetic structure of marine invertebrates." *Marine Biology* 149(6): 1463-1475.
- Sander, S. G. and A. Koschinsky (2011). "Metal flux from hydrothermal vents increased by organic complexation." *Nature Geoscience* 4(3): 145-150.
- Santos, M., M. Moita, I. Bashmachnikov, G. Menezes, V. Carmo, C. Loureiro, A. Mendonça, A. Silva and A. Martins (2013). "Phytoplankton variability and oceanographic conditions at Condor seamount, Azores (NE Atlantic)." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*.
- Sarradin, P. M., M. Waeles, S. Bernagout, C. Le Gall, J. Sarrazin and R. Riso (2009). "Speciation of dissolved copper within an active hydrothermal edifice on the Lucky Strike vent field (MAR, 37 ° N)." *Science of the Total Environment* 407(2): 869-878.
- Sarradin, P.-M., D. Lannuzel, M. Waeles, P. Crassous, N. Le Bris, J. C. Caprais, Y. Fouquet, M. C. Fabri and R. Riso (2008). "Dissolved and particulate metals (Fe, Zn, Cu, Cd, Pb) in two habitats from an active hydrothermal field on the EPR at 13 ° N." *Science of the Total Environment* 392(1): 119-129.
- Sarradin, P.-M., J.-C. Caprais, P. Briand, F. Gaill, B. Shillito and D. Desbruyeres (1998). "Chemical and thermal description of the environment of the Genesis hydrothermal vent community (13 ° N, EPR)." *Cahiers De Biologie Marine* 39(2): 159-167.
- Sarradin, P.-M., J.-C. Caprais, R. Riso, R. Kerouel and A. Aminot (1999). "Chemical environment of the hydrothermal mussel communities in the Lucky Strike and Menez Gwen vent fields, Mid Atlantic ridge." *Cahiers De Biologie Marine* 40(1): 93-104.
- Sarrazin, J. and S. K. Juniper (1999). "Biological characteristics of a hydrothermal edifice mosaic community." *Marine Ecology Progress Series* 185: 1-19.
- Sarrazin, J., C. Levesque, S. Juniper and M. Tivey (2002). "Mosaic community dynamics on Juan de Fuca Ridge sulphide edifices: substratum, temperature and implications for trophic structure." *CBM-Cahiers de Biologie Marine* 43(3-4): 275-279.
- Sarrazin, J., C. Walter, P.-M. Sarradin, A. Brind'Amour, D. Desbruyeres, P. Briand, M.-C. Fabri, S. Van Gaever, A. Vanreusel, C. Bachraty and E. Thiebaut (2006). "Community structure and temperature dynamics within a mussel assemblage on the Southern East Pacific Rise." *Cahiers De Biologie Marine* 47(4): 483-490.
- Sarrazin, J., J. Blandin, L. Delauney, S. Dentrecolas, P. Dorval, J. Dupont, J. Legrand, D. Leroux, P. Leon and J. Lévêque (2007). TEMPO: a new ecological module for studying deep-sea community dynamics at hydrothermal vents. OCEANS 2007-Europe, Ieee.
- Sarrazin, J., S. K. Juniper, G. Massoth and P. Legendre (1999). "Physical and chemical factors influencing species distributions on hydrothermal sulfide edifices of the Juan de Fuca Ridge, northeast Pacific." *Marine Ecology Progress Series* 190: 89-112.
- Sarrazin, J., V. Robigou, S. K. Juniper and J. R. Delaney (1997). "Biological and geological dynamics over four years on a high-temperature sulfide structure at the Juan de Fuca Ridge hydrothermal observatory." *Marine Ecology Progress Series* 153: 5-24.

- Sauvadet, A. L., A. Gobet and L. Guillou (2010). "Comparative analysis between protist communities from the deep-sea pelagic ecosystem and specific deep hydrothermal habitats." *Environmental microbiology* 12(11): 2946-2964.
- Schäfer, S., C. Barkowski and G. Fuchs (1986). "Carbon assimilation by the autotrophic thermophilic archaeobacterium *Thermoproteus neutrophilus*." *Archives of microbiology* 146(3): 301-308.
- Schauer, R., H. Røy, N. Augustin, H. H. Gennerich, M. Peters, F. Wenzhoefer, R. Amann and A. Meyerdierks (2011). "Bacterial sulfur cycling shapes microbial communities in surface sediments of an ultramafic hydrothermal vent field." *Environmental Microbiology* 13(10): 2633-2648.
- Schlacher, T. A., A. R. Baco, A. A. Rowden, T. D. O'Hara, M. R. Clark, C. Kelley and J. F. Dower (2013). "Seamount benthos in a cobalt-rich crust region of the central Pacific: conservation challenges for future seabed mining." *Diversity and Distributions* online first.
- Schmidt, C., L. Corbari, F. Gaill and N. Le Bris (2009). "Biotic and abiotic controls on iron oxyhydroxide formation in the gill chamber of the hydrothermal vent shrimp *Rimicaris exoculata*." *Geobiology* 7(4): 454-464.
- Schmidt, C., N. Le Bris and F. Gaill (2008). "Interactions of deep-sea vent invertebrates with their environment: the case of *Rimicaris exoculata*." *Journal of Shellfish Research* 27(1): 79-90.
- Schmidt, C., R. Vuillemin, C. Le Gall, F. Gaill and N. Le Bris (2008). "Geochemical energy sources for microbial primary production in the environment of hydrothermal vent shrimps." *Marine Chemistry* 108(1): 18-31.
- Schone, B. R. and O. Giere (2005). "Growth increments and stable isotope variation in shells of the deep-sea hydrothermal vent bivalve mollusk *Bathymodiolus brevior* from the North Fiji Basin, Pacific Ocean." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 52(10): 1896-1910.
- Schrenk, M. O., D. S. Kelley, J. R. Delaney and J. A. Baross (2003). "Incidence and diversity of microorganisms within the walls of an active deep-sea sulfide chimney." *Applied and environmental microbiology* 69(6): 3580-3592.
- Schrenk, M. O., D. S. Kelley, S. A. Bolton and J. A. Baross (2004). "Low archaeal diversity linked to seafloor geochemical processes at the Lost City Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge." *Environmental microbiology* 6(10): 1086-1095.
- Schulz, H. D. and M. Zabel (2006). *Marine geochemistry*, Springer.
- Seegerer, A., T. A. Langworthy and K. O. Stetter (1988). "*Thermoplasma acidophilum* and *Thermoplasma volcanium* sp. nov. from Solfatara Fields." *Systematic and applied microbiology* 10(2): 161-171.
- Sen, A., E. L. Becker, E. L. Podowski, L. N. Wickes, S. Ma, K. M. Mullaugh, S. Hourdez, G. W. Luther III and C. R. Fisher (2013). "Distribution of mega fauna on sulfide edifices on the Eastern Lau Spreading Center and Valu Fa Ridge." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 72: 48-60.
- Shank, T. M. (2010). "New England and Corner Rise Seamounts." *Oceanography* 23(1): 104-105.
- Shank, T. M. (2010). "Seamounts Deep-Ocean Laboratories of Faunal Connectivity, Evolution, and Endemism." *Oceanography* 23(1): 108-122.

- Shank, T. M. and J. W. Martin (2003). "A new caridean shrimp of the family Alvinocarididae from thermal vents at Menez Gwen on the Mid-Atlantic Ridge." *PROCEEDINGS-BIOLOGICAL SOCIETY OF WASHINGTON* 116(1): 158-167.
- Shank, T. M. and K. M. Halanych (2007). "Toward a mechanistic understanding of larval dispersal: insights from genomic fingerprinting of the deep-sea hydrothermal vent tubeworm *Riftia pachyptila*." *Marine Ecology* 28(1): 25-35.
- Shank, T. M., D. J. Fornari, K. L. Von Damm, M. D. Lilley, R. M. Haymon and R. A. Lutz (1998). "Temporal and spatial patterns of biological community development at nascent deep-sea hydrothermal vents (9 50' N, East Pacific Rise)." *Deep-Sea Research Part II* 45(1-3): 465-515.
- Shank, T. M., M. B. Black, K. M. Halanych, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (1999). "Miocene radiation of deep-sea hydrothermal vent shrimp (Caridea : Bresiliidae): Evidence from mitochondrial cytochrome oxidase subunit I." *Molecular Phylogenetics and Evolution* 13(2): 244-254.
- Sharma, R. (2001). "Indian Deep-sea Environment Experiment (INDEX):: An appraisal." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3295-3307.
- Sharma, R. and A. S. Rao (1992). "Geological factors associated with megabenthic activity in the Central Indian Basin." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 39(3): 705-713.
- Shillito, B., D. Jollivet, P.-M. Sarradin, P. Rodier, F. Lallier, D. Desbruyères and F. Gaill (2001). "Temperature resistance of *Hesiolyra bergi*, a polychaetous annelid living on deep-sea vent smoker walls." *Marine Ecology Progress Series* 216: 141-149.
- Shillito, B., N. L. Bris, F. Gaill, J.-F. Rees and F. Zal (2004). "First access to live *Alvinellas*." *High Pressure Research* 24(1): 169-172.
- Shillito, B., N. Le Bris, S. Hourdez, J. Ravauxl, D. Cottin, J. C. Caprais, D. Jollivet and F. Gaill (2006). "Temperature resistance studies on the deep-sea vent shrimp *Mirocatis fortunata*." *Journal of Experimental Biology* 209(5): 945-955.
- Short, J. and A. Metaxas (2011). "Gregarious settlement of tubeworms at deep-sea hydrothermal vents on the Tonga–Kermadec arc, South Pacific." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 91(01): 15-22.
- Sievert, S. M., M. Hügler, C. D. Taylor and C. O. Wirsen (2008). *Sulfur oxidation at deep-sea hydrothermal vents. Microbial sulfur metabolism*, Springer: 238-258.
- Singer, E., J. F. Heidelberg, A. Dhillon and K. J. Edwards (2013). "Metagenomic insights into the dominant Fe (II) oxidizing Zetaproteobacteria from an iron mat at Lō' ihi, Hawai' i." *Frontiers in microbiology* 4.
- Slobodkin, A. I., A.-L. Reysenbach, G. B. Slobodkina, R. V. Baslerov, N. A. Kostrikina, I. D. Wagner and E. Bonch-Osmolovskaya (2012). "Thermosulfurimonas dismutans gen. nov., sp. nov., an extremely thermophilic sulfur-disproportionating bacterium from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 62(Pt 11): 2565-2571.
- Slobodkin, A., B. Campbell, S. C. Cary, E. Bonch-Osmolovskaya and C. Jeanthon (2001). "Evidence for the presence of thermophilic Fe (III)-reducing microorganisms in deep-sea hydrothermal vents at 13° N (East Pacific Rise)." *FEMS microbiology ecology* 36(2-3): 235-243.

- Slobodkina, G. B., A.-L. Reysenbach, A. Panteleeva, N. Kostrikina, I. Wagner, E. Bonch-Osmolovskaya and A. I. Slobodkin (2012). "Deferrisoma camini gen. nov., sp. nov., a moderately thermophilic, dissimilatory iron (III)-reducing bacterium from a deep-sea hydrothermal vent that forms a distinct phylogenetic branch in the Deltaproteobacteria." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 62(Pt 10): 2463-2468.
- Slobodkina, G., T. Kolganova, J. Querellou, E. Bonch-Osmolovskaya and A. I. Slobodkin (2009). "Geoglobus acetivorans sp. nov., an iron (III)-reducing archaeon from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 59(11): 2880-2883.
- Slobodkina, G., T. Kolganova, N. Chernyh, J. Querellou, E. Bonch-Osmolovskaya and A. Slobodkin (2009). "Deferribacter autotrophicus sp. nov., an iron (III)-reducing bacterium from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 59(6): 1508-1512.
- Smith Jr, K., R. Baldwin, D. Karl and A. Boetius (2002). "Benthic community responses to pulses in pelagic food supply: North Pacific Subtropical Gyre." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 49(6): 971-990.
- Smith Jr, K., R. Kaufmann and R. Baldwin (1994). "Coupling of near-bottom pelagic and benthic processes at abyssal depths in the eastern North Pacific Ocean." *Limnology and Oceanography*: 1101-1118.
- Smith, C. R. and A. W. Demopoulos (2003). "The deep Pacific ocean floor." *Ecosystems of the World*: 179-218.
- Smith, C. R., F. C. De Leo, A. F. Bernardino, A. K. Sweetman and P. M. Arbizu (2008). "Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change." *Trends in Ecology & Evolution* 23(9): 518-528.
- Smith, C. R., W. Berelson, D. J. Demaster, F. C. Dobbs, D. Hammond, D. J. Hoover, R. H. Pope and M. Stephens (1997). "Latitudinal variations in benthic processes in the abyssal equatorial Pacific: control by biogenic particle flux." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 44(9): 2295-2317.
- Smith, J. L., B. J. Campbell, T. E. Hanson, C. L. Zhang and S. C. Cary (2008). "Nautilia profundicola sp. nov., a thermophilic, sulfur-reducing epsilonproteobacterium from deep-sea hydrothermal vents." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 58(7): 1598-1602.
- Snider, L. J., B. R. Burnett and R. R. Hessler (1984). "Nautilia profundicola sp. nov., a thermophilic, sulfur-reducing epsilonproteobacterium from deep-sea hydrothermal vents." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 58(7): 1598-1602.
- Snider, L. J., B. R. Burnett and R. R. Hessler (1984). "The composition and distribution of meiofauna and nanobiota in a central North Pacific deep-sea area." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 31(10): 1225-1249.
- Soto, L. A. (2009). "Stable carbon and nitrogen isotopic signatures of fauna associated with the deep-sea hydrothermal vent system of Guaymas Basin, Gulf of California." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(19): 1675-1682.
- Southward, A. J. and W. A. Newman (1998). "Ectosymbiosis between filamentous sulphur bacteria and a stalked barnacle (Scalpellomorpha, Neolepadinae) from the Lau Back Arc Basin, Tonga." *Cahiers De Biologie Marine* 39(3-4): 259-262.

- Southward, E. C. (1986). "Gill symbionts in thyasirids and other bivalve molluscs." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 66(4): 889-814.
- Southward, E. C., V. Tunnicliffe and M. Black (1995). "Behaviour and feeding of the nassariid gastropod *Cyclope neritea*, abundant at hydrothermal brine seeps off Milos (Aegean Sea)." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77(3): 753-771.
- Southward, E. C., V. Tunnicliffe and M. Black (1995). "Revision of the species of *Ridgeia* from Northeast Pacific hydrothermal vents, with a redescription of *Ridgeia-piscesae* jones (Pogonophora, *Obturata* equals *Vestimentifera*)." *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie* 73(2): 282-295.
- Spieß, F. N. (1987). "Sea-floor research and ocean technology." *Marine Technology Society Journal* 21(2): 5-17.
- Spieß, F. N. (1987). Environmental effects of deep sea dredging, Scripps Institution of Oceanography.
- Statham, P., C. German and D. Connelly (2005). "Iron (II) distribution and oxidation kinetics in hydrothermal plumes at the Kairei and Edmond vent sites, Indian Ocean." *Earth and Planetary Science Letters* 236(3): 588-596.
- Staudigel, H. and S. R. Hart (1983). "Alteration of basaltic glass: Mechanisms and significance for the oceanic crust-seawater budget." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47(3): 337-350.
- Stecher, J., M. Türkay and C. Borowski (2002). "Faunal assemblages on the Pacific-Antarctic Ridge near the Foundation Seamount Chain (37 ° 30 ' S, 110 ° 30 ' W)." *Cahiers De Biologie Marine* 43(3-4): 271-274.
- Stein, J. L., S. C. Cary, R. R. Hessler, R. D. Vetter, H. Felbeck, S. Ohta and J. J. Childress (1988). "Chemoautotrophic symbiosis in a hydrothermal vent gastropod." *The Biological Bulletin* 174(3): 373-378.
- Stemann, L., A. Hosia, M. J. Youngbluth, H. Soiland, M. Picheral and G. Gorsky (2008). "Vertical distribution (0-1000 m) of macrozooplankton, estimated using the Underwater Video Profiler, in different hydrographic regimes along the northern portion of the Mid-Atlantic Ridge." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 55(1-2): 94-105.
- Stemann, L., D. Eloire, A. Sciandra, G. A. Jackson, L. Guidi, M. Picheral and G. Gorsky (2008). "Volume distribution for particles between 3.5 to 2000 μ m in the upper 200 m region of the South Pacific Gyre." *Biogeosciences* 5(2): 299-310.
- Stetter, K. O., M. Thomm, J. Winter, G. Wildgruber, H. Huber, W. Zillig, D. Jané-Covic, H. König, P. Palm and S. Wunderl (1981). "Methanothermus fervidus, sp. nov., a novel extremely thermophilic methanogen isolated from an Icelandic hot spring." *Zentralblatt für Bakteriologie Mikrobiologie und Hygiene. I. Abt. Originale C: Allgemeine, angewandte und ökologische Mikrobiologie* 2(2): 166-178.
- Stocks, K. I. and P. J. Hart (2007). "Biogeography and biodiversity of seamounts." *Seamounts: Ecology, Fisheries, and Conservation*: 255-281.
- Stohr, S. and M. Segonzac (2005). "Deep-sea ophiuroids (Echinodermata) from reducing and non-reducing environments in the North Atlantic Ocean." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 85(2): 383-402.

- Sunamura, M., Y. Higashi, C. Miyako, J.-i. Ishibashi and A. Maruyama (2004). "Two bacteria phylotypes are predominant in the Suiyo Seamount hydrothermal plume." *Applied and environmental microbiology* 70(2): 1190-1198.
- Sutton, T., F. Porteiro, M. Heino, I. Byrkjedal, G. Langhelle, C. Anderson, J. Horne, H. Søliland, T. Falkenhaus and O. Godø (2008). "Vertical structure, biomass and topographic association of deep-pelagic fishes in relation to a mid-ocean ridge system." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55(1): 161-184.
- Suzuki, Y., F. Inagaki, K. Takai, K. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Microbial diversity in inactive chimney structures from deep-sea hydrothermal systems." *Microbial ecology* 47(2): 186-196.
- Suzuki, Y., S. Kojima, H. Watanabe, M. Suzuki, S. Tsuchida, T. Nunoura, H. Hirayama, K. Takai, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2006). "Single host and symbiont lineages of hydrothermal-vent gastropods *Ifremeria nautili* (Provannidae): biogeography and evolution." *Marine ecology. Progress series* 315: 167-175.
- Suzuki, Y., S. Kojima, T. Sasaki, M. Suzuki, T. Utsumi, H. Watanabe, H. Urakawa, S. Tsuchida, T. Nunoura and H. Hirayama (2006). "Host-symbiont relationships in hydrothermal vent gastropods of the genus *Alviniconcha* from the Southwest Pacific." *Applied and environmental microbiology* 72(2): 1388-1393.
- Suzuki, Y., T. Sasaki, M. Suzuki, Y. Nogi, T. Miwa, K. Takai, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2005). "Novel chemoautotrophic endosymbiosis between a member of the Epsilonproteobacteria and the hydrothermal-vent gastropod *Alviniconcha* aff. *hessleri* (Gastropoda: Provannidae) from the Indian Ocean." *Applied and environmental microbiology* 71(9): 5440-5450.
- Sweetman, A. and U. Witte (2008). "Response of an abyssal macrofaunal community to a phytodetrital pulse." *Marine ecology. Progress series* 355: 73.
- Sweetman, A. K., L. A. Levin, H. T. Rapp and C. Schander (2013). "Faunal trophic structure at hydrothermal vents on the southern Mohn's Ridge, Arctic Ocean." *Marine ecology. Progress series* 473: 115-131.
- Sylvan, J. B., B. C. Pyenson, O. Rouxel, C. R. German and K. J. Edwards (2012). "Time-series analysis of two hydrothermal plumes at 9°50' N East Pacific Rise reveals distinct, heterogeneous bacterial populations." *Geobiology* 10(2): 178-192.
- Sylvan, J. B., B. M. Toner and K. J. Edwards (2012). Sylvan, J. B., B. M. Toner, et al. (2012). "Life and Death of Deep-Sea Vents: Bacterial Diversity and Ecosystem Succession on Inactive Hydrothermal Sulfides." *Mbio* 3(1).
- Tagliabue, A., L. Bopp, J.-C. Dutay, A. R. Bowie, F. Chéver, P. Jean-Baptiste, E. Bucciarelli, D. Lannuzel, T. Remenyi and G. Sarthou (2010). "Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory." *Nature Geoscience* 3(4): 252-256.
- Takai, K. and K. Horikoshi (1999). "Genetic diversity of archaea in deep-sea hydrothermal vent environments." *Genetics* 152(4): 1285-1297.
- Takai, K. and K. Nakamura (2011). "Archaeal diversity and community development in deep-sea hydrothermal vents." *Current Opinion in Microbiology* 14(3): 282-291.
- Takai, K., A. Inoue and K. Horikoshi (2002). "Methanothermococcus okinawensis sp. nov., a thermophilic, methane-producing archaeon isolated from a Western Pacific deep-sea hydrothermal vent system." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 52(4): 1089-1095.

- Takai, K., A. Sugai, T. Itoh and K. Horikoshi (2000). "Palaeococcus ferrophilus gen. nov., sp. nov., a barophilic, hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent chimney." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 50(2): 489-500.
- Takai, K., H. Hirayama, T. Nakagawa, Y. Suzuki, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Thiomicrospira thermophila sp. nov., a novel microaerobic, thermotolerant, sulfur-oxidizing chemolithomixotroph isolated from a deep-sea hydrothermal fumarole in the TOTO caldera, Mariana Arc, Western Pacific." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(6): 2325-2333.
- Takai, K., H. Hirayama, T. Nakagawa, Y. Suzuki, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2005). "Lebetimonas acidiphila gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic, acidophilic, hydrogen-oxidizing chemolithoautotroph within the 'Epsilonproteobacteria', isolated from a deep-sea hydrothermal fumarole in the Mariana Arc." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 55(1): 183-189.
- Takai, K., K. H. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Hydrogenimonas thermophila gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic, hydrogen-oxidizing chemolithoautotroph within the ϵ -Proteobacteria, isolated from a black smoker in a Central Indian Ridge hydrothermal field." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(1): 25-32.
- Takai, K., K. H. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Methanotorris formicicus sp. nov., a novel extremely thermophilic, methane-producing archaeon isolated from a black smoker chimney in the Central Indian Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(4): 1095-1100.
- Takai, K., M. Suzuki, S. Nakagawa, M. Miyazaki, Y. Suzuki, F. Inagaki and K. Horikoshi (2006). "Sulfurimonas paralvinellae sp. nov., a novel mesophilic, hydrogen- and sulfur-oxidizing chemolithoautotroph within the Epsilonproteobacteria isolated from a deep-sea hydrothermal vent polychaete nest, reclassification of Thiomicrospira denitrificans as Sulfurimonas denitrificans comb. nov. and emended description of the genus Sulfurimonas." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 56(8): 1725-1733.
- Takai, K., S. Nakagawa, Y. Sako and K. Horikoshi (2003). "Balnearium lithotrophicum gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic, strictly anaerobic, hydrogen-oxidizing chemolithoautotroph isolated from a black smoker chimney in the Suiyo Seamount hydrothermal system." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 53(6): 1947-1954.
- Takai, K., T. Gamo, U. Tsunogai, N. Nakayama, H. Hirayama, K. H. Nealson and K. Horikoshi (2004). "Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyperthermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (HyperSLiME) beneath an active deep-sea hydrothermal field." *Extremophiles* 8(4): 269-282.
- Takai, K., T. Komatsu, F. Inagaki and K. Horikoshi (2001). "Distribution of archaea in a black smoker chimney structure." *Applied and Environmental Microbiology* 67(8): 3618-3629.
- Takai, K., T. Nunoura, J.-i. Ishibashi, J. Lupton, R. Suzuki, H. Hamasaki, Y. Ueno, S. Kawagucci, T. Gamo and Y. Suzuki (2008). "Variability in the microbial communities and hydrothermal fluid chemistry at the newly discovered Mariner hydrothermal field, southern Lau Basin." *Journal of Geophysical Research* 113(G2): G02031.
- Tao, C. H., G. H. Wu, X. M. Deng, Z. Y. Qiu, C. H. Han and Y. M. Long (2013). "New discovery of seafloor hydrothermal activity on the Indian Ocean Carlsberg Ridge and

- Southern North Atlantic Ridge-progress during the 26th Chinese COMRA cruise." *Acta Oceanologica Sinica* 32(8): 85-88.
- Teixeira, S., E. A. Serrão and S. Arnaud-Haond (2012). "Panmixia in a fragmented and unstable environment: the hydrothermal shrimp *Rimicaris exoculata* disperses extensively along the Mid-Atlantic Ridge." *PloS one* 7(6): e38521.
- Teixeira, S., M. A. Cambon-Bonavita, E. A. Serrão, D. Desbruyères and S. Arnaud-Haond (2011). "Recent population expansion and connectivity in the hydrothermal shrimp *Rimicaris exoculata* along the Mid-Atlantic Ridge." *Journal of Biogeography* 38(3): 564-574.
- Teske, A., K.-U. Hinrichs, V. Edgcomb, A. de Vera Gomez, D. Kysela, S. P. Sylva, M. L. Sogin and H. W. Jannasch (2002). "Microbial diversity of hydrothermal sediments in the Guaymas Basin: evidence for anaerobic methanotrophic communities." *Applied and Environmental Microbiology* 68(4): 1994-2007.
- Thaler, A. D., K. Zelnio, W. Saleu, T. F. Schultz, J. Carlsson, C. Cunningham, R. C. Vrijenhoek and C. L. Van Dover (2011). "The spatial scale of genetic subdivision in populations of *Ifremeria nautiliei*, a hydrothermal-vent gastropod from the southwest Pacific." *Bmc Evolutionary Biology* 11(1): 372.
- Thiel, H. and G. Schriever (1990). "Deep-sea mining, environmental impact and the DISCOL project." *Ambio. Stockholm* 19(5): 245-250.
- Thiel, H., G. Schriever, A. Ahnert, H. Bluhm, C. Borowski and K. Vopel (2001). "The large-scale environmental impact experiment DISCOL—reflection and foresight." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3869-3882.
- Thiel, H., G. Schriever, C. Bussau and C. Borowski (1993). "Manganese-nodule crevice fauna." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 40(2): 419-423.
- Thiem, Ø., E. Ravagnan, J. H. Fosså and J. Berntsen (2006). "Food supply mechanisms for cold-water corals along a continental shelf edge." *Journal of Marine Systems* 60(3): 207-219.
- Thistle, D. and L. A. Levin (1998). "The effect of experimentally increased near-bottom flow on metazoan meiofauna at a deep-sea site, with comparison data on macrofauna." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 45(4-5): 625-+.
- Thistle, D., L. A. Levin, A. J. Gooday, O. Pfannkuche and P. John D Lamshead (1999). "Physical reworking by near-bottom flow alters the metazoan meiofauna of Fieberling Guyot (northeast Pacific)." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 46(12): 2041-2052.
- Thorseth, I., R. Pedersen, C. Kruber and J. Kosler (2007). Low-Temperature Hydrothermal Deposits at the 71 N Vent Fields at the Arctic Mid-Ocean Ridge: Architecture, Microtextures, and Geochemistry. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Thresher, R. E., B. Tilbrook, S. Fallon, N. C. Wilson and J. Adkins (2011). "Effects of chronic low carbonate saturation levels on the distribution, growth and skeletal chemistry of deep-sea corals and other seamount megabenthos." *Marine Ecology Progress Series* 442: 87-99.
- Thresher, R., J. Adkins, S. Fallon, K. Gowlett-Holmes, F. Althaus and A. Williams (2011). "Extraordinarily high biomass benthic community on Southern Ocean seamounts." *Scientific Reports* 1.

- Thurnherr, A., L. St Laurent, K. Speer, J. Toole and J. Ledwell (2005). "Mixing associated with sills in a canyon on the midocean ridge flank." *Journal of Physical Oceanography* 35(8): 1370-1381.
- Tilot, V. (1992). La structure des assemblages megabenthiques d'une province à nodules polymétalliques de l'océan Pacifique tropical Est, Université de Brest, FRANCE. Thèse nouveau doctorat: 381p.
- Tivey, M. K. (1995). "The influence of hydrothermal fluid composition and advection rates on black smoker chimney mineralogy - insights from modeling transport and reaction." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 59(10): 1933-1949.
- Tivey, M. K. (2004). Environmental conditions within active seafloor vent structures: Sensitivity to vent fluid composition and fluid flow. *Subseafloor Biosphere at Mid-Ocean Ranges*. W. S. D. Wilcock, E. F. DeLong, D. S. Kelley, J. A. Baross and S. C. Cary. Washington, Amer Geophysical Union. 144: 137-152.
- Tivey, M. K. (2007). "Generation of Seafloor Hydrothermal Vent Fluids and Associated Mineral Deposits." *Oceanography* 20(1): 50-65.
- Tivey, M. K., A. M. Bradley, T. M. Joyce and D. Kadko (2002). "Insights into tide-related variability at seafloor hydrothermal vents from time-series temperature measurements." *Earth and Planetary Science Letters* 202(3-4): 693-707.
- Tokeshi, M. (2011). "Spatial structures of hydrothermal vents and vent-associated megafauna in the back-arc basin system of the Okinawa Trough, western Pacific." *Journal of Oceanography* 67(5): 651-665.
- Toner, B. M., M. A. Marcus, K. J. Edwards, O. J. Rouxel and C. R. German (2012). "Measuring the Form of Iron in Hydrothermal Plume Particles." *Oceanography* 25(1): 209-212.
- Toner, B. M., R. A. Lesniewski, J. J. Marlow, L. J. Briscoe, C. M. Santelli, W. Bach, B. N. Orcutt and K. J. Edwards (2013). "Mineralogy drives bacterial biogeography of hydrothermally inactive seafloor sulfide deposits." *Geomicrobiology Journal* 30(4): 313-326.
- Toner, B. M., S. A. Bennett, N.-C. Chu and C. R. German (2009). "Deep ocean interactions between hydrothermally-sourced iron and organic carbon." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 73(13): A1340-A1340.
- Toner, B. M., T. S. Berquó, F. M. Michel, J. V. Sorensen, A. S. Templeton and K. J. Edwards (2012). "Mineralogy of iron microbial mats from Loihi Seamount." *Abstracts of Papers of the American Chemical Society* 243.
- Tracey, D. M., A. A. Rowden, K. A. Mackay and T. Compton (2011). "Habitat-forming cold-water corals show affinity for seamounts in the New Zealand region." *Marine Ecology Progress Series* 430: 1-22.
- Trask, J. L. and C. L. Van Dover (1999). "Site-specific and ontogenetic variations in nutrition of mussels (*Bathymodiulus* sp.) from the Lucky Strike hydrothermal vent field, Mid-Atlantic Ridge." *Limnology and Oceanography* 44(2): 334-343.
- Trimble, R. and H. Ehrlich (1968). "Bacteriology of manganese nodules III. Reduction of MnO₂ by two strains of nodule bacteria." *Applied microbiology* 16(5): 695-702.
- Trueblood, D. D., E. Ozturgut, M. Pilipchuk and I. F. Gloumov (1997). The ecological impacts of the joint U. S.-Russian benthic impact experiment. *Proceedings of the*

Second(1997) ISOPE Ocean Mining Symposium: Exploration and Survey, Environment, Mining Systems and Technology, and Processing.

Tsurumi, M. (2003). "Diversity at hydrothermal vents." *Global Ecology and Biogeography* 12(3): 181-190.

Tsurumi, M. and V. Tunnicliffe (2001). "Characteristics of a hydrothermal vent assemblage on a volcanically active segment of Juan de Fuca Ridge, northeast Pacific." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(3): 530-542.

Tsurumi, M., R. C. de Graaf and V. Tunnicliffe (2003). "Distributional and biological aspects of copepods at hydrothermal vents on the Juan de Fuca Ridge, north-east Pacific Ocean." *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 83(03): 469-477.

Tunnicliffe, V. (1988). "Biogeography and evolution of hydrothermal-vent fauna in the eastern Pacific Ocean." *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences* 233(1272): 347-366.

Tunnicliffe, V. (1990). "Observations on the effects of sampling on hydrothermal vent habitat and fauna of Axial Seamount, Juan-de-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 95(B8): 12961-12966.

Tunnicliffe, V. (1991). "The biology of hydrothermal vents - Ecology and evolution." *Oceanography and Marine Biology* 29: 319-407.

Tunnicliffe, V. (1992). "Hydrothermal-vent communities of the deep-sea." *American Scientist* 80(4): 336-349.

Tunnicliffe, V. and A. R. Fontaine (1987). "Faunal composition and organic-surface encrustations at hydrothermal vents on the southern Juan-de-Fuca Ridge." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 92(B11): 11303-11314.

Tunnicliffe, V. and C. M. R. Fowler (1996). "Influence of sea-floor spreading on the global hydrothermal vent fauna." *Nature* 379(6565): 531-533.

Tunnicliffe, V. and R. G. Jensen (1987). "Distribution and behavior of the spider crab *Macroregonia-macrochira* Sakai (Brachyura) around the hydrothermal vents of the Northeast Pacific." *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie* 65(10): 2443-2449.

Tunnicliffe, V. and S. K. Juniper (1983). "New hydrothermal vent discovery in the Northeast Pacific - tube-worm bioherms and bacterial glue." *American Zoologist* 23(4): 966-966.

Tunnicliffe, V. and S. K. Juniper (1990). "Dynamic character of the hydrothermal vent habitat and the nature of sulfide chimney fauna." *Progress in Oceanography* 24(1-4): 1-13.

Tunnicliffe, V., A. G. McArthur and D. McHugh (1998). "A biogeographical perspective of the deep-sea hydrothermal vent fauna." *Advances in Marine Biology*, Vol 34 34: 353-442.

Tunnicliffe, V., K. T. Davies, D. A. Butterfield, R. W. Embley, J. M. Rose and W. W. Chadwick Jr (2009). Tunnicliffe, V., K. T. A. Davies, et al. (2009). "Survival of mussels in extremely acidic waters on a submarine volcano." *Nature Geoscience* 2(5): 344-348.

Tunnicliffe, V., M. Botros, M. E. Deburgh, A. Dinet, H. P. Johnson, S. K. Juniper and R. E. McDuff (1986). "Hydrothermal vents of Explorer Ridge, Northeast Pacific." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 33(3): 401-412.

Tunnicliffe, V., R. W. Embley, J. F. Holden, D. A. Butterfield, G. J. Massoth and S. K. Juniper (1997). "Biological colonization of new hydrothermal vents following an eruption on

- Juan de Fuca Ridge." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(9): 1627-1644.
- Tunnicliffe, V., S. K. Juniper and M. De Burgh (1985). "The hydrothermal vent community on axial seamount, Juan de Fuca Ridge." *Bulletin of the Biological Society of Washington*(6): 453-464.
- Turnipseed, M., K. Knick, R. Lipcius, J. Dreyer and C. Van Dover (2003). "Diversity in mussel beds at deep-sea hydrothermal vents and cold seeps." *Ecology Letters* 6(6): 518-523.
- Tyler, P. A. and C. M. Young (1999). "Reproduction and dispersal at vents and cold seeps." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 79(2): 193-208.
- Tyler, P. A. and D. R. Dixon (2000). "Temperature/pressure tolerance of the first larval stage of *Mirocaris fortunata* from Lucky Strike hydrothermal vent field." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 80(4): 739-740.
- Ulloa, O., D. E. Canfield, E. F. DeLong, R. M. Letelier and F. J. Stewart (2012). "Microbial oceanography of anoxic oxygen minimum zones." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(40): 15996-16003.
- Urakawa, H., N. Dutilleul, Y. Fujiwara, D. E. Cunningham, S. Kojima and D. A. Stahl (2005). "Hydrothermal vent gastropods from the same family (Provannidae) harbour ϵ - and γ -proteobacterial endosymbionts." *Environmental microbiology* 7(5): 750-754.
- Van Dover, C. (2000). *The ecology of deep-sea hydrothermal vents*, Princeton University Press.
- Van Dover, C. (2002). "Trophic relationships among invertebrates at the Kairei hydrothermal vent field (Central Indian Ridge)." *Marine Biology* 141(4): 761-772.
- Van Dover, C. L. (1990). "Biogeography of hydrothermal vent communities along seafloor spreading centers." *Trends in ecology & evolution* 5(8): 242-246.
- Van Dover, C. L. (1995). "Ecology of mid-Atlantic ridge hydrothermal vents." *Geological Society, London, Special Publications* 87(1): 257-294.
- Van Dover, C. L. (2002). "Community structure of mussel beds at deep-sea hydrothermal vents." *Marine Ecology Progress Series* 230: 137-158.
- Van Dover, C. L. (2003). "Variation in community structure within hydrothermal vent mussel beds of the East Pacific Rise." *Marine Ecology Progress Series* 253: 55-66.
- Van Dover, C. L. (2007). "The silent deep - The discovery, ecology, and conservation of the deep sea." *Science* 317(5836): 321-322.
- Van Dover, C. L. (2011). "Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk?" *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 68(2): 341-348.
- Van Dover, C. L. and B. Fry (1989). "Stable isotopic compositions of hydrothermal vent organisms." *Marine Biology* 102(2): 257-263.
- Van Dover, C. L. and J. L. Trask (2000). "Diversity at deep-sea hydrothermal vent and intertidal mussel beds." *Marine Ecology Progress Series* 195: 169-178.
- Van Dover, C. L. and M. B. Doerries (2005). "Community structure in mussel beds at Logatchev hydrothermal vents and a comparison of macrofaunal species richness on slow- and fast-spreading mid-ocean ridges." *Marine Ecology-an Evolutionary Perspective* 26(2): 110-120.

- Van Dover, C. L., C. German, K. G. Speer, L. Parson and R. Vrijenhoek (2002). "Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates." *Science* 295(5558): 1253-1257.
- Van Dover, C. L., G. T. Reynolds, A. D. Chave and J. A. Tyson (1996). "Light at deep-sea hydrothermal vents." *Geophysical Research Letters* 23(16): 2049-2052.
- Van Dover, C. L., S. E. Humphris, D. Fornari, C. M. Cavanaugh, R. Collier, S. K. Goffredi, J. Hashimoto, M. D. Lilley, A. L. Reysenbach, T. M. Shank, K. L. Von Damm, A. Banta, R. M. Gallant, D. Gotz, D. Green, J. Hall, T. L. Harmer, L. A. Hurtado, P. Johnson, Z. P. McKiness, C. Meredith, E. Olson, I. L. Pan, M. Turnipseed, Y. Won, C. R. Young and R. C. Vrijenhoek (2001). "Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents." *Science* 294(5543): 818-823.
- Vargas, M., K. Kashefi, E. L. Blunt-Harris and D. R. Lovley (1998). "Microbiological evidence for Fe (III) reduction on early Earth." *Nature* 395(6697): 65-67.
- Vazquez, F., J. z. Zhang and F. J. Millero (1989). "Effect of metals on the rate of the oxidation of H₂S in seawater." *Geophysical Research Letters* 16(12): 1363-1366.
- Veillette, J., J. Sarrazin, A. J. Gooday, J. Galeron, J. C. Ca prais, A. Vangriesheim, J. Etoubleau, J. R. Christian and S. K. Juniper (2007). "Ferromanganese nodule fauna in the Tropical North Pacific Ocean: Species richness, faunal cover and spatial distribution." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 54(11): 1912-1935.
- Veillette, J., S. K. Juniper, A. J. Gooday and J. Sarrazin (2007). "Influence of surface texture and microhabitat heterogeneity in structuring nodule faunal communities." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 54(11): 1936-1943.
- Verlaan, P. A. (1992). "Benthic recruitment and manganese crust formation on seamounts." *Marine Biology* 113(1): 171-174.
- Vismann, B. (1991). "Sulfide tolerance - physiological-mechanisms and ecological implications." *Ophelia* 34(1): 1-27.
- Von Cosel, R., B. Metivier and J. Hashimoto (1994). "Three new species of *Bathymodiolus* (Bivalvia: Mytilidae) from hydrothermal vents in the Lau basin and the North Fiji basin, Western Pacific, and the Snake pit area, Mid-Atlantic Ridge." *Veliger* 37: 374-374.
- Von Cosel, R., T. Comtet and E. Krylova (1999). "*Bathymodiolus* (Bivalvia : Mytilidae) from hydrothermal vents on the Azores Triple Junction and the Logatchev hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge." *Veliger* 42(3): 218-248.
- Voordeckers, J. W., M. H. Do, M. Hügler, V. Ko, S. M. Sievert and C. Vetrani (2008). "Culture dependent and independent analyses of 16S rRNA and ATP citrate lyase genes: a comparison of microbial communities from different black smoker chimneys on the Mid-Atlantic Ridge." *Extremophiles* 12(5): 627-640.
- Voordeckers, J. W., V. Starovoytov and C. Vetrani (2005). "*Caminibacter mediatlanticus* sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, nitrate-ammonifying bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent on the Mid-Atlantic Ridge." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 55(2): 773-779.
- Vrijenhoek, R. (1997). "Gene flow and genetic diversity in naturally fragmented metapopulations of deep-sea hydrothermal vent animals." *Journal of Heredity* 88(4): 285-293.
- Vrijenhoek, R. C. (2010). "Genetic diversity and connectivity of deep-sea hydrothermal vent metapopulations." *Molecular Ecology* 19(20): 4391-4411.

- Waite, T. J., T. S. Moore, J. J. Childress, H. Hsu-Kim, K. M. Mullaugh, D. B. Nuzzio, A. N. Paschal, J. Tsang, C. R. Fisher and G. W. Luther III (2008). "Variation in sulfur speciation with shellfish presence at a Lau Basin diffuse flow vent site." *Journal of Shellfish Research* 27(1): 163-168.
- Wang, C.-S., L. Liao, H.-X. Xu, X.-W. Xu, M. Wu and L.-Z. Zhu (2010). "Bacterial diversity in the sediment from polymetallic nodule fields of the Clarion-Clipperton Fracture Zone." *The Journal of Microbiology* 48(5): 573-585.
- Wang, F., H. Zhou, J. Meng, X. Peng, L. Jiang, P. Sun, C. Zhang, J. D. Van Nostrand, Y. Deng and Z. He (2009). "GeoChip-based analysis of metabolic diversity of microbial communities at the Juan de Fuca Ridge hydrothermal vent." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(12): 4840-4845.
- Wang, X. and W. E. Müller (2009). "Marine biominerals: perspectives and challenges for polymetallic nodules and crusts." *Trends in Biotechnology* 27(6): 375-383.
- Wang, X. and W. E. Müller (2009). "Marine biominerals: perspectives and challenges for polymetallic nodules and crusts." *Trends in biotechnology* 27(6): 375-383.
- Wang, X., H. C. Schröder, U. Schloßmacher and W. E. Müller (2009). "Organized bacterial assemblies in manganese nodules: evidence for a role of S-layers in metal deposition." *Geo-Marine Letters* 29(2): 85-91.
- Wang, X., U. Schloßmacher, M. Wiens, H. C. Schröder and W. E. Müller (2009). "Biogenic origin of polymetallic nodules from the Clarion-Clipperton zone in the Eastern Pacific Ocean: electron microscopic and EDX evidence." *Marine Biotechnology* 11(1): 99-108.
- Wang, X.-H., L. Gan and W. E. Müller (2009). "Contribution of biomineralization during growth of polymetallic nodules and ferromanganese crusts from the Pacific Ocean." *Frontiers of Materials Science in China* 3(2): 109-123.
- Wareham, V. E. and E. N. Edinger (2007). "Distribution of deep-sea corals in the Newfoundland and Labrador region, Northwest Atlantic Ocean." *Bulletin of Marine Science* 81(Supplement 1): 289-313.
- Watanabe, M., K. Okino and T. Kodera (2010). "Rifting to spreading in the southern Lau Basin: Variations within the transition zone." *Tectonophysics* 494(3-4): 226-234.
- Watremez, P. and C. Kervevan (1990). "Origine des variations de l'activité hydrothermale: premiers éléments de réponse d'un modèle numérique simple." *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 311(1): 153-158.
- Wery, N., F. Lesongeur, P. Pignet, V. Derennes, M.-A. Cambon-Bonavita, A. Godfroy and G. Barbier (2001). "*Marinitoga camini* gen. nov., sp. nov., a rod-shaped bacterium belonging to the order Thermotogales, isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 51(2): 495-504.
- Wery, N., J.-M. Moricet, V. Cuffe, J. Jean, P. Pignet, F. Lesongeur, M.-A. Cambon-Bonavita and G. Barbier (2001). "*Caloranaerobacter azorensis* gen. nov., sp. nov., an anaerobic thermophilic bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 51(5): 1789-1796.
- Wheat, C. G. and M. J. Mottl (2000). "Composition of pore and spring waters from Baby Bare: Global implications of geochemical fluxes from a ridge flank hydrothermal system." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(4): 629-642.

- Wheat, C. G., M. J. Mottl, A. T. Fisher, D. Kadko, E. E. Davis and E. Baker (2004). "Heat flow through a basaltic outcrop on a sedimented young ridge flank." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5(12).
- White, M., I. Bashmachnikov, J. Arístegui and A. Martins (2007). "Physical processes and seamount productivity." *Seamounts: Ecology, Fisheries, and Conservation* 12: 65-84.
- Widdel, F., T. Hansen, A. Balows, H. Truper, M. Dworkin, W. Harder and K. Schleifer (1992). "The dissimilatory sulfate- and sulfur-reducing bacteria." *The prokaryotes: a handbook on the biology of bacteria: ecophysiology, isolation, identification, applications*, vol. I.(Ed. 2): 582-624.
- Windberger, E., R. Huber, A. Trincone, H. Fricke and K. O. Stetter (1989). "Thermotoga thermarum sp. nov. and Thermotoga neapolitana occurring in African continental solfataric springs." *Archives of Microbiology* 151(6): 506-512.
- Winn, C. D., D. M. Karl and G. J. Massoth (1986). "Microorganisms in deep-sea hydrothermal plumes." *Nature* 320(6064): 744-746.
- Wirsen, C. O., S. M. Sievert, C. M. Cavanaugh, S. J. Molyneaux, A. Ahmad, L. Taylor, E. DeLong and C. D. Taylor (2002). "Characterization of an autotrophic sulfide-oxidizing marine *Arcobacter* sp. that produces filamentous sulfur." *Applied and environmental microbiology* 68(1): 316-325.
- Wirsen, C., T. Brinkhoff, J. Kuever, G. Muyzer, S. Molyneaux and H. Jannasch (1998). "Comparison of a new *Thiomicrospira* strain from the Mid-Atlantic Ridge with known hydrothermal vent isolates." *Applied and environmental microbiology* 64(10): 4057-4059.
- Witbaard, R., G. Duineveld, J. Van der Weele, E. Berghuis and J. Reyss (2000). "The benthic response to the seasonal deposition of phytopigments at the Porcupine Abyssal Plain in the North East Atlantic." *Journal of Sea Research* 43(1): 15-31.
- Witte, U., F. Wenzhöfer, S. Sommer, A. Boetius, P. Heinz, N. Aberle, M. Sand, A. Cremer, W.-R. Abraham and B. Jørgensen (2003). "In situ experimental evidence of the fate of a phytodetritus pulse at the abyssal sea floor." *Nature* 424(6950): 763-766.
- Woese, C. R. and G. E. Fox (1977). "Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: the primary kingdoms." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 74(11): 5088-5090.
- Woese, C. R., O. Kandler and M. L. Wheelis (1990). "Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87(12): 4576-4579.
- Won, Y., C. R. Young, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (2003). "Dispersal barriers and isolation among deep-sea mussel populations (*Mytilidae*: *Bathymodiulus*) from eastern Pacific hydrothermal vents." *Molecular Ecology* 12(1): 169-184.
- Wright, I., P. Stoffers, M. Hannington, C. De Ronde, P. Herzig, I. Smith and P. Browne (2002). "Towed-camera investigations of shallow-intermediate water-depth submarine stratovolcanoes of the southern Kermadec arc, New Zealand." *Marine Geology* 185(3): 207-218.
- Wu, Y.-H., L. Liao, C.-S. Wang, W.-L. Ma, F.-X. Meng, M. Wu and X.-W. Xu (2013). "A comparison of microbial communities in deep-sea polymetallic nodules and the surrounding sediments in the Pacific Ocean." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 79: 40-49.

- Xu, M., F. Wang, J. Meng and X. Xiao (2007). "Construction and preliminary analysis of a metagenomic library from a deep-sea sediment of east Pacific Nodule Province." *FEMS microbiology ecology* 62(3): 233-241.
- Xu, M., P. Wang, F. Wang and X. Xiao (2005). "Microbial diversity at a deep-sea station of the Pacific nodule province." *Biodiversity & Conservation* 14(14): 3363-3380.
- Yamaguchi, T., Newman, W.A. (1997). "The hydrothermal vent barnacle *Eochinelasmus* (Cirripedia: Balanomorpha) from the North Fiji, Lau and Manus Basins." *Zoosystema* 19: 623-649.
- Yamamoto, M. and K. Takai (2011). "Sulfur metabolisms in epsilon- and gamma-Proteobacteria in deep-sea hydrothermal fields." *Frontiers in microbiology* 2.
- Yang, J. S., B. Lu, D. F. Chen, Y. Q. Yu, F. Yang, H. Nagasawa, S. Tsuchida, Y. Fujiwara and W. J. Yang (2013). "When Did Decapods Invade Hydrothermal Vents? Clues from the Western Pacific and Indian Oceans." *Molecular Biology and Evolution* 30(2): 305-309.
- Young, C. M., R. He, R. B. Emlet, Y. Li, H. Qian, S. M. Arellano, A. Van Gaest, K. C. Bennett, M. Wolf and T. I. Smart (2012). "Dispersal of deep-sea larvae from the Intra-American Seas: simulations of trajectories using ocean models." *Integrative and comparative biology* 52(4): 483-496.
- Yücel, M. and G. W. Luther (2013). "Temporal trends in vent fluid iron and sulfide chemistry following the 2005/2006 eruption at East Pacific Rise, 9 ° 50 ' N." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 14(4): 759-765.
- Yücel, M., A. Gartman, C. S. Chan and G. W. Luther III (2011). "Hydrothermal vents as a kinetically stable source of iron-sulphide-bearing nanoparticles to the ocean." *Nature Geoscience* 4(6): 367-371.
- Yücel, M., G. W. Luther III and W. S. Moore (2010). "Earthquake-induced turbidite deposition as a previously unrecognized sink for hydrogen sulfide in the Black Sea sediments." *Marine Chemistry* 121(1-4): 176-186.
- Zal F. and Jollivet D. (2003). "Les colons des vallées sous-marines." *La Recherche Hors série n°11 – La Terre* 44-48.
- Zal, F., D. Desbruyeres and C. Jouin-Toulmond (1994). "Sexual dimorphism in *Paralvinella grasslei*, a polychaete annelid from deep-sea hydrothermal vents." *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie* 317(1): 42-48.
- Zal, F., E. Leize, F. H. Lallier, A. Toulmond, A. Van Dorsselaer and J. J. Childress (1998). "S-Sulfohemoglobin and disulfide exchange: the mechanisms of sulfide binding by *Riftia pachytila* hemoglobins." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95(15): 8997-9002.
- Zbinden, M., N. Le Bris, F. Gaill and P. Compère (2004). "Distribution of bacteria and associated minerals in the gill chamber of the vent shrimp *Rimicaris exoculata* and related biogeochemical processes." *Marine Ecology Progress Series* 284: 237-251.
- Zbinden, M., N. Le Bris, P. Compère, I. Martinez, F. Guyot and F. Gaill (2003). "Mineralogical gradients associated with alvinellids at deep-sea hydrothermal vents." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 50(2): 269-280.
- Zeikus, J. and R. Wolfe (1972). "*Methanobacterium thermoautotrophicus* should be *Methanobacterium thermoautotrophicum*." *International Journal of Systematic Bacteriology* 22(4): 395-395.

Zekely, J., C. L. Van Dover, H. L. Nemeschkal and M. Bright (2006). "Hydrothermal vent meiobenthos associated with mytilid mussel aggregations from the Mid-Atlantic Ridge and the East Pacific Rise." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 53(8): 1363-1378.

Zekely, J., S. Gollner, C. Van Dover, B. Govenar, N. Le Bris, H. Nemeschkal and M. Bright (2006). "Nematode communities associated with tubeworm and mussel aggregations on the East Pacific Rise." *Cahiers de biologie marine* 47(4): 477-482.

Zelnio, K. A., E. Rodriguez and M. Daly (2009). "Hexacorals (Anthozoa: Actiniaria, Zoanthidea) from hydrothermal vents in the south-western Pacific." *Marine Biology Research* 5(6): 547-571.

Zeng, X., X. Zhang, L. Jiang, K. Alain, M. Jebbar and Z. Shao (2013). "Palaeococcus pacificus sp. nov., an archaeon from deep-sea hydrothermal sediment." *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 63(Pt 6): 2155-2159.

Zeppilli, D., L. Bongiorni, A. Cattaneo, R. Danovaro and R. S. Santos (2013). "Meiofauna assemblages of the Condor Seamount (North-East Atlantic Ocean) and adjacent deep-sea sediments." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 98: 87-100.

Zhai, X., R. J. Greatbatch, C. Eden and T. Hibiya (2009). "On the Loss of Wind-Induced Near-Inertial Energy to Turbulent Mixing in the Upper Ocean." *Journal of Physical Oceanography* 39(11): 3040-3045.

Zillig W, H. I., Klenk H, Trent J, Wunderl S, Janekovic D, Imsel E, Haas (1987). "Pyrococcus woeisi, sp. nov., an ultra-thermophilic marine archaeobacterium representing a novel order, Thermococcales." *System. Appl. Microbiol.* 9: 62-70.

Zillig, W., I. Holz, D. Janekovic, W. Schäfer and W. Reiter (1983). "The Archaeobacterium *Thermococcus celer* Represents, a Novel Genus within the Thermophilic Branch of the Archaeobacteria." *Systematic and Applied Microbiology* 4(1): 88-94.

Zillig, W., S. Yeats, I. Holz, A. Böck, M. Rettenberger, F. Gropp and G. Simon (1986). "*Desulfurolobus ambivalens*, gen. nov., sp. nov., an autotrophic archaeobacterium facultatively oxidizing or reducing sulfur." *Systematic and Applied Microbiology* 8(3): 197-203.

Chapitre 5

Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques

Pilote scientifique :
Sylvain Lamare

Contributeurs :
Florian Besson
Coralie Coumert
Sylvain Lamare
Nadine Le Bris
Philippe Saget
Jean-Michel Salles

Table des matières du chapitre 5

Chapitre 5. Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques	593
5.1. Introduction	593
5.2. Impacts environnementaux potentiels	593
5.2.1. Impacts environnementaux de l'exploration	595
Les rigs de forage	595
Les méthodes acoustiques	597
Techniques photographiques	598
Prises d'échantillons	598
Exemple d'une étude sur les impacts environnementaux de la recherche sur les sites hydrothermaux : Résumé de la thèse de Raphaëlle Dancette	601
5.2.2. Impacts environnementaux de l'exploitation	604
5.2.2.1. Risques directs	611
Destruction des habitats	611
Destruction directe de la biodiversité du plancher océanique	615
Modification des propriétés géochimiques du sédiment et de l'eau de fond	616
5.2.2.2. Risques indirects	617
Formation de nuages de particules fines et grossières	617
Augmentation de la concentration de composés toxiques dans le milieu; modifications des conditions physico-chimiques des masses d'eau environnantes	619
Production de déchets et impacts sur la colonne d'eau	622
Impact sur le cycle du carbone	630
Pollution électromagnétique	631
Vibrations	631
Autres impacts possibles	633
Accidents possibles	633
Conclusion	634
5.2.3. Adaptabilité et résilience	636
5.2.3.1. Adaptabilité des espèces et des communautés	636
Métabolisme des métaux lourds et écotoxicologie chez les espèces profondes	636
5.2.3.2. Vulnérabilité de l'écosystème et capacités de restauration	640
Synthèse de la littérature scientifique sur les nodules	640
Prévisions sur la vulnérabilité des écosystèmes associés aux encroûtements cobaltifères et de leurs capacités de restauration	644

Prévisions sur la vulnérabilité des écosystèmes associés aux sulfures hydrothermaux et de leurs capacités de restauration	644
5.3. Introduction aux services écosystémiques et à leurs méthodes d'évaluation économique	647
5.4. Services écosystémiques rendus par les zones d'exploitation potentielles	652
5.4.1. Services support	655
5.4.1.1. Habitat	655
5.4.1.2. Cycle des nutriments	657
5.4.1.3. Influence des écosystèmes profonds sur les réseaux trophiques	662
5.4.1.4. Services support de nature abiotique	663
Transport d'informations et d'énergie par les câbles sous-marins	663
Rôle-clé des cascades d'eau dense sur les plateaux dans le maintien de la productivité des écosystèmes	664
Transport de matière	665
5.4.2. Services d'approvisionnement	666
5.4.2.1. Les pêcheries d'eau profonde	666
Exemple des pêcheries de la dorsale médio-atlantique	669
La pêche dans les ZEE	675
5.4.2.2. Autres ressources minérales ou énergétiques concurrentes	681
5.4.2.3. Composés chimiques à usages pharmaceutiques et industriels	683
5.4.2.4. Les coraux précieux	688
5.4.2.5. Décharge (service passé)	689
5.4.2.6. Capture et stockage artificiel de CO ₂	691
5.4.3. Services de régulation et de maintenance	692
5.4.3.1. Régulation de l'air et du climat	692
5.4.3.2. Régulation de la composition des océans	694
5.4.3.3. Absorption et détoxification des éléments toxiques	694
5.4.4. Services culturels et sociaux	697
5.4.4.1. Tourisme	697
5.4.4.2. Ecotourisme autour des cétacés et des requins	700
5.4.4.3. Le tourisme d'aventure en eaux profondes	710
5.4.4.4. Héritage historique et patrimoine de l'humanité	711
5.4.4.5. Paléoclimatologie	712
5.4.4.6. Recherche en biologie évolutive et en écologie des milieux extrêmes	713
5.4.4.7. Recherches sur l'origine de la vie et en astrophysique/astrobiologie	716

5.4.4.8. Les milieux marins profonds, source d'inspiration pour de s activités créatrices	717
5.4.4.9. Conclusion	718
5.5. Conséquences économiques possibles	718
Acronymes	723
Bibliographie	725

Liste des figures du chapitre 5

Figure 5-1	Implication des différents pays, organismes européens et internationaux et sociétés industrielles dans l'étude des impacts environnementaux potentiels liés à l'exploitation des nodules de manganèse, des sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères.	594
Figure 5-2	Trace de drague.	599
Figure 5-3	Un carottier à lame prélève du sédiment. Photo Victor6000 (15 * 15 cm).	600
Figure 5-4	Un fragment de cheminée hydrothermale éteinte contenant des oxydes de cuivre, prélevé pour datation du site Sintra (site hydrothermal Lucky Strike sur la dorsale médio-atlantique)	600
Figure 5-5	Activités ayant créé des impacts lors de la mission NeMO 2006, dans la ZPM Endeavour (images tirées de Dancette et Juniper, 2007).	601
Figure 5-6	Activités ayant engendré des impacts par le sous-marin habité Alvin dans la ZPM Endeavour à l'été 2004 (images tirées de Dancette et Juniper, 2007).	602
Figure 5-7	Impacts potentiellement générés par l'exploitation des nodules.	608
Figure 5-8	Schéma du processus minier envisagé par Nautilus à Solwara 1 et impacts potentiels (Collins et al, 2013).	609
Figure 5-9	Traces des impacts laissés par les jets d'eau et les patins du BIE Disturber dans la zone Clarion-Clipperton (source: Interoceanmetal, dans Oebius et al, 2001).	612
Figure 5-10	Effets de la redéposition des sédiments sur la mégafaune lors de l'expérience JET (Fukushima et al, 2000).	618
Figure 5-11	Abondance de la macrofaune des sites DISCOL (>500µm, entre 0 et 5cm de profondeur dans le sédiment) après la perturbation à différents temps d'observation.	641
Figure 5-12	Illustration du modèle en cascade dans le cadre du contexte naturel et socio-économique (Liquete et al, 2013).	648
Figure 5-13	Exemples de relations entre les services écosystémiques et le bien-être humain (Reid et al, 2005).	648
Figure 5-14	Cadre général d'analyse de la valeur économique totale (VET) (Reid et al, 2005).	649
Figure 5-15	Approches générales d'estimation de la valeur des services écosystémiques (Gomez-Baggethun and de Groot, 2010).	650
Figure 5-16	Proportion des différents types de documents utilisés pour documenter la description des services écosystémiques rendus par les écosystèmes et milieux potentiellement impactés par l'exploitation minière profonde.	653
Figure 5-17	Les différentes classes de services écosystémiques rendus par les milieux marins profonds (Armstrong et al, 2012).	654
Figure 5-18	Cycle du carbone (Armstrong et al, 2010).	660
Figure 5-19	Modélisation du réseau trophique au sein d'un écosystème de mont sous-marin (Morato, 2009).	662
Figure 5-20	Carte du réseau mondial de câbles sous-marins (Carter et al, 2009).	663
Figure 5-21	Schéma du passage d'une cascade d'eau dense dans le canyon du Cap Creus.	664
Figure 5-22	Croquis de quelques espèces profondes commerciales (FAO).	667
Figure 5-23	Sites de pêche profonde.	669

Figure 5-24	Prises annuelles des principales espèces de poissons des grands fonds dans les Açores, par les méthodes de pêche à la palangre et à la ligne (1980-2011) (ICES, 2012).	670
Figure 5-25	Monts sous-marins profonds protégés dans l'Océan Atlantique (FAO).	673
Figure 5-26	Monts sous-marins profonds protégés dans l'Océan Indien (FAO).	674
Figure 5-27	Aires de répartition des nodules polymétalliques de la zone de fracture Clarion-Clipperton à gauche et principales zones de pêche thonière dans le Pacifique (Jost, 2010).	675
Figure 5-28	Résumé des valeurs des espèces pêchées en Polynésie française en 2007 .	676
Figure 5-29	Répartition mondiale des hydrates de gaz marins (Ruppel, 2011).	682
Figure 5-30	Localisation de sites utilisés pour déposer des déchets radioactifs dans l'Océan Atlantique Nord-Est, entre 1949 et 1982 (Thiel, 2003).	690
Figure 5-31	Localisation des ressources minérales du Pacifique (AIFM).	698
Figure 5-32	Carte de repérage des grandes baleines et de leurs routes migratoires (National Geographic, 1976).	703
Figure 5-33	Pays dont l'économie bénéficie de l'observation des baleines (pays en noir) (O'Connor et al, 2009).	705
Figure 5-34	Localisation des sites d'observation des baleines (Whale Watching Web, 2013).	705
Figure 5-35	Sites d'observation des requins inclus dans l'étude de Cisneros-Montemayor et al, 2013.	708
Figure 5-36	<i>Bathypterois</i> sp. (30 cm), photographié par 2 013 m de profondeur dans le Bassin des Loyauté (Grandperrin et al, 1997).	714

Liste des tableaux du chapitre 5

Tableau 5-1	Tailles des outils de forage diamants « wireline » couramment utilisés en exploration minière (Berkman, 2011a).	597
Tableau 5-2	Zones probablement affectées par les différentes phases de l'exploitation des nodules polymétalliques (traduction de Sharma, 2011).	609
Tableau 5-3	Quantité de sédiments du plancher océanique perturbés par le dragage des nodules (Amos and Roels, 1977).	612
Tableau 5-4	Localisation et aires des zones d'exploration et des domaines d'exploitation des sulfures polymétalliques concédées à Nautilus Minerals dans le Pacifique (SRK Consulting, 2011).	614
Tableau 5-5	Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes à la surface (AIFM, workshop 2002).	623
Tableau 5-6	Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes des eaux intermédiaires (AIFM, workshop 2002).	627
Tableau 5-7	Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes benthiques (AIFM, workshop 2002).	628
Tableau 5-8	Conséquences environnementales des différentes phases de l'exploitation minière dans les grands fonds (Markussen, 1994).	634
Tableau 5-9	Résumé des impacts potentiels de l'exploitation minière des dépôts de sulfures massifs sur l'environnement biologique à Solwara 1, Papouasie Nouvelle-Guinée (Boschen et al, 2013).	635
Tableau 5-10	Comparaison des différentes méthodes de perturbation, résilience des zones perturbées et résilience des assemblages de nématodes dans trois études d'impact en milieu marin profond (par comparaison avec une référence, par exemple, un site adjacent non perturbé) (Miljutin et al, 2011).	643
Tableau 5-11	Synthèse des impacts environnementaux et résilience des écosystèmes.	645
Tableau 5-12	Cétacés répertoriés le long de la dorsale médio-atlantique (traduit de Doksaeter et al, 2008).	656
Tableau 5-13	Taille des réservoirs et temps de "turn-over" des éléments biologiquement actifs (Reeburgh, 1997).	659
Tableau 5-14	Résumé des données des pêcheries des monts sous-marins de la dorsale médio-atlantique (ICES, 2012).	670
Tableau 5-15	Exemples de produits dérivés d'espèces et de matériaux d'environnements marins profonds (d'après Armstrong et al, 2010; Arico and Salpin, 2005; Maxwell et al, 2005; Roche Applied Science, New England Biolabs, Office Européen des Brevets).	684
Tableau 5-16	Quantité moyenne de mercure contenu dans les sédiments et les fluides hydrothermaux (Dekov, 2007).	696
Tableau 5-17	Revenus et emplois générés par l'observation des baleines à l'échelle mondiale (O'Connor et al, 2009).	704
Tableau 5-18	Evolution temporelle du nombre de touristes venus observer les baleines dans le Pacifique (O'Connor et al, 2009).	706
Tableau 5-19	Localisations des sites d'observation des requins (par pays, dans l'ordre alphabétique) avec les données disponibles sur les dépenses faites par les touristes venus observer les requins par an par Cisneros-Montemayor et al, 2013.	709

Tableau 5-20 Bénéfices annuels estimés générés par l'observation des requins, par région; Dépenses en dollars américains, au taux de 2011; emplois à temps plein (Cisneros-Montemayor et al, 2013).	710
Tableau 5-21Thématiques des recherches menées sur les micro-organismes piézophiles (Abe et Horiskoshi, 2001).	714

Chapitre 5. Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques

Ce chapitre traite des impacts liés à l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

5.1. Introduction

Indéniablement, les processus miniers vont avoir des impacts sur l'environnement. **Ces impacts pourront être très localisés ou au contraire très étendus, d'une durée plus ou moins longue et seront plus ou moins spécifiques, selon la nature de la ressource exploitée, les spécificités des communautés biologiques associées à cette ressource, les caractéristiques de l'environnement, la vulnérabilité et les capacités d'adaptation des écosystèmes face aux processus miniers.** Si certains impacts ont été confirmés et précisés grâce à des simulations en laboratoire ou à des tests *in situ* à petite échelle, nombreux sont ceux qui restent à l'état d'hypothèses, construites à partir des connaissances actuelles sur les technologies d'exploration et (surtout) d'exploitation, ainsi que sur la biodiversité, les écosystèmes et les milieux associés aux ressources (Cf. chapitres 3 et 4 de ce rapport).

Les impacts sur l'environnement font l'objet de la première partie de ce chapitre.

Ces impacts environnementaux entraînent indirectement une autre série de conséquences. Les milieux marins profonds, leur biodiversité, leurs écosystèmes sont utilisés directement par nos sociétés humaines ou nous rendent plus ou moins directement, sans aujourd'hui savoir les mesurer précisément, de multiples services. Les services écosystémiques font d'ailleurs grand débat à l'heure actuelle. Nous proposons, en deuxième partie de chapitre, une introduction aux méthodes d'évaluation économique de ces services, en général, avant d'aborder, dans une troisième partie, la description des services rendus par les écosystèmes et milieux associés directement ou indirectement aux ressources minérales marines profondes.

Ce chapitre se termine par une conclusion récapitulative sur les impacts et de leurs conséquences économiques prévisibles.

5.2. Impacts environnementaux potentiels

L'analyse bibliographique suivante porte exclusivement sur les références sélectionnées pour étayer ce chapitre. La littérature sur les impacts environnementaux repose majoritairement sur des articles scientifiques et des comptes-rendus de conférence (pour 75% des références). Les rapports scientifiques et techniques représentent également une part non négligeable des références utilisées (environ 25% de la littérature disponible).

Les livres et chapitres de livres scientifiques sont le quatrième type de documents identifié.

Sur la base de ce corpus documentaire, l'implication relative des différents pays, organismes gouvernementaux et internationaux et industriels dans l'étude des impacts environnementaux potentiels est présentée par la figure 5-1 ci-après.

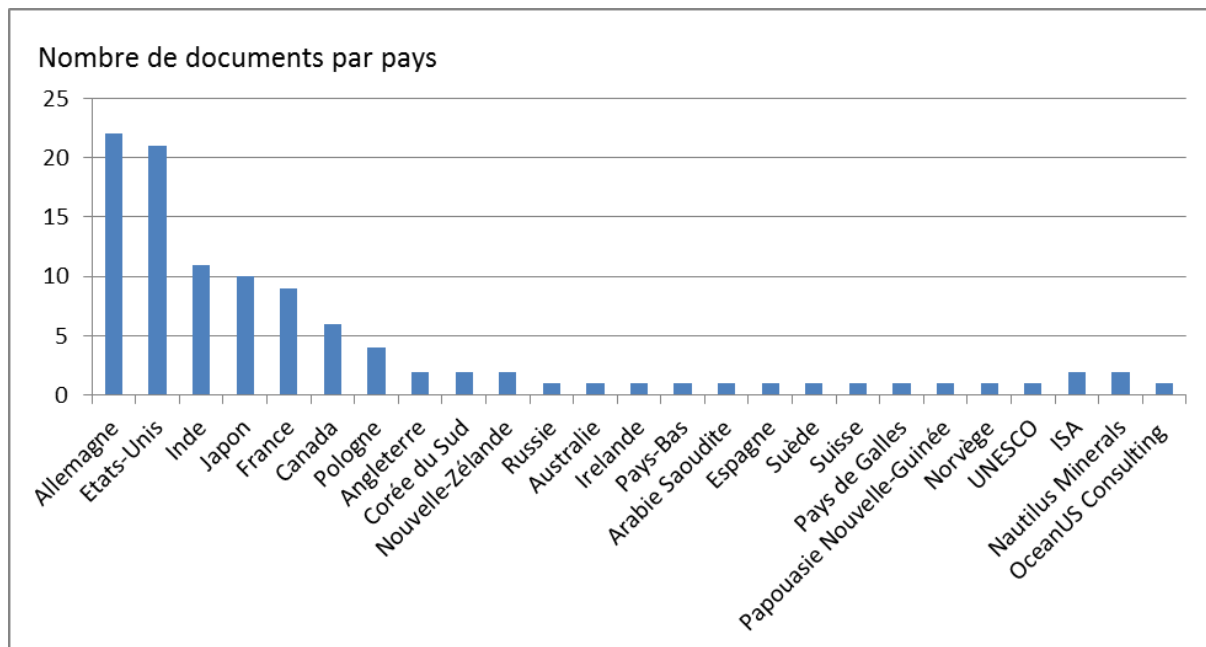


Figure 5-1 Implication des différents pays, organismes européens et internationaux et sociétés industrielles dans l'étude des impacts environnementaux potentiels liés à l'exploitation des nodules de manganèse, des sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères.

La prédominance de l'Allemagne, des Etats-Unis, de l'Inde et du Japon dans cette production scientifique s'explique par le développement par ces pays de programmes d'études des impacts miniers sous-marins depuis les années 70. Ces programmes seront explicités ultérieurement dans le chapitre.

Cette expertise est avant tout une expertise scientifique. Les informations d'origine industrielle reprises dans ce chapitre ne portent pas sur les impacts eux-mêmes. Elles sont uniquement factuelles : il s'agit de décrire les dimensions des zones d'exploration accordées à certains industriels ou de mentionner que les industries ont mené des tests d'exploitation minière (Anthony Jones, océanographe, de la société américaine OceanUS Consulting). Notons, cependant, que les résultats de ces tests sont confidentiels et que l'accès à ces résultats reste donc très limité.

L'Autorité Internationale des Fonds Marins a identifié 4 risques potentiels majeurs liés à l'exploitation minière des nodules en eaux profondes :

- 1) La perturbation des sédiments à la surface, des nodules polymétalliques et de la faune associée sur des zones de quelques dizaines à quelques centaines de km². Les sédiments restants étant comprimés et cassés sur le passage du véhicule minier.
- 2) La création d'un panache massif de particules sédimentaires près du sol, dû au prélèvement des nodules. Les particules sédimentaires de ce panache se redéposeront sur le plancher océanique alentour, couvrant l'interface eau-sédiment et la faune sous une couche de sédiment, d'une épaisseur variant de moins d'un millimètre à plusieurs centimètres. Un nuage diffus persistera dans la couche limite benthique sur des durées de quelques semaines à plusieurs mois. Ce nuage diffus serait susceptible d'être transporté par les courants sur des centaines de kilomètres.

- 3) En surface, le rejet de l'eau de fond entraînée avec les nodules, des sédiments et des fragments de nodules serait susceptible d'augmenter la concentration en nutriments et métaux lourds dans l'eau, tout en entraînant une réduction de la lumière. Ces altérations pourraient affecter les taux de production primaire phytoplanctonique, la dynamique des réseaux trophiques et la survie des larves de poissons dans les eaux de surface océaniques. La dispersion des sédiments et des fragments de nodules dans la zone de minimum d'oxygène, immédiatement sous cette couche photique de surface, pourrait également favoriser le relargage de métaux lourds sous forme dissoute. (Les Zones de Minimum d'Oxygène se situent entre 200 et 1000 m, leur étendue verticale et horizontale variant en fonction du temps et de l'emplacement géographique.)
- 4) Une réinjection en profondeur de l'eau prélevée avec les minéraux extraits étant envisagée, les rejets issus du traitement en surface des minéraux seraient rejetés entre 200 et 1200 m de profondeur et au-delà, ou bien sous la zone de minimum d'oxygène. Là encore, un panache de sédiments se formerait, modifiant les concentrations de particules en suspension, et pourrait impacter le fonctionnement des réseaux trophiques à des profondeurs moyennes et influencer sur les profils sédimentaires du plancher océanique sous-jacent.

Ces quatre risques sont aussi valables pour les encroûtements cobaltifères et les sulfures polymétalliques.

Les zones potentiellement affectées par les procédés d'extraction miniers s'étendent du plancher océanique (perturbation des sédiments, nuage de sédiments créé par le mouvement et par l'activité des engins de dragage pendant la collecte des nodules, et modifications physiques profondes des différents habitats), à la colonne d'eau (en raison des rejets de débris, particules et d'eau, résultant de la collecte, du broyage, du pompage ou du dragage des dépôts métallifères), jusqu'à la surface (en raison du traitement et du transport en mer), mais aussi sur terre (compte-tenu du processus d'extraction du métal et du stockage des résidus) (Sharma, 2011).

5.2.1. Impacts environnementaux de l'exploration

L'**exploration**, destinée à localiser les gisements de nodules, les encroûtements cobaltifères et les amas sulfurés susceptibles d'être exploités, peut avoir des impacts négatifs sur les environnements considérés.

Dans le cas des nodules, plus particulièrement, cette démarche implique non seulement de délimiter les zones où les nodules sont présents, mais aussi de vérifier qu'elles conviennent à une future exploitation. Pour cela, un certain nombre de critères doivent être définis en relation avec les techniques envisagées pour ramasser les nodules et en extraire les substances commercialisables. C'est une **approche cyclique : les premiers travaux doivent réunir suffisamment d'informations pour élaborer les stratégies de ramassage, les techniques associées et les méthodes de traitement appropriées; puis, sur la base des performances attendues de ces techniques, on recherchera les zones répondant aux critères ainsi établis.**

Les rigs de forage

La **méthode la plus adaptée au forage de sites hydrothermaux** consiste à employer des rigs de forage robotisés opérés depuis la surface (pour la partie technique, se référer à la partie

3.2.5.3 du chapitre 3). Conçus pour réaliser des tests géotechniques superficiels pour l'industrie pétrolière, ces rigs robotisés ont des caractéristiques très différentes des plateformes réalisant des forages pétroliers profonds classiques ou des navires de forages scientifiques (JOIDES Resolution, Chikyu...).

Les rigs de forage robotisés sont globalement de dimensions bien inférieures :

- Déployés sur le fond, ils ne mesurent que quelques mètres à une dizaine de mètres d'envergure. Ils ne sont en contact avec le sol que par les pieds et la base du rig de forage, de taille modeste, respectivement de 50x25 cm et de 150x150 cm environ.
- La profondeur de forage atteint théoriquement 100 m avec les rigs robotisés. En pratique, seuls les 20 premiers mètres sont forés au travers des formations superficielles.
- Les diamètres des carottes forées (environ 70 mm) sont inférieurs aux standards utilisés par l'industrie pétrolière ou lors des campagnes scientifiques ODP (PQ3 minimum). Ils correspondent davantage aux standards utilisés en exploration minière terrestre (principalement BQ, NQ, HQ,...; Tableau 5-1 ci-après; Berkman, 2011a). De plus, les « casings » (tubages) posés à mesure de la descente du train de tige ne sont pas cimentés, mais uniquement constitués de tubes d'acier.
- L'eau de mer utilisée comme fluide de forage par les rigs robotisés est considérée comme inerte par rapport aux boues utilisées par les pétroliers (boues de bentonite, de diesel, synthétiques (etc.) pouvant être enrichies en barytine, hématite, polymères, émulsifiants, gélifiants...).

Avant de poser le rig de forage, les fonds sont inspectés par ROV afin de déterminer une zone plane, constituée majoritairement de roches indurées, et très peu colonisée par la faune et la flore.

Lors d'une opération de forage sur le fond, le rejet de l'eau de mer utilisée comme fluide de forage peut amener la création d'un panache de boue limité, dispersé par les courants.

Après forage, seule une dépression de quelques dizaines de centimètres de diamètre resterait visible au niveau de la tête de puits.

Les seuls impacts environnementaux documentés dans la littérature que les forages ont sur les sites hydrothermaux concernent les forages ODP réalisés sur le site hydrothermal TAG lors du Leg 158 (Humphris et al, 1995).

Edmonds et coll. (1996) ont montré que le forage ODP sur TAG n'a pas eu d'effet notable sur l'activité et sur la composition chimique et isotopique des fluides hydrothermaux primaires, restées stables sur une décennie. L'étude de Charlou et coll. (1996) montre que le forage ODP a cependant pu accélérer la libération de gaz (CH₄, CO₂) en ouvrant de nouveaux chemins de migration et a ainsi favorisé les mélanges en subsurface avec l'eau de mer environnante. **Cette modification de la distribution des sources de fluide diffuses serait susceptible d'avoir un impact important sur l'habitat de la faune, avec recolonisation de nouvelles sources tandis que l'extinction d'autres sources conduirait à l'extinction des populations locales associées à ces sources.**

Notons qu'en phase d'exploitation, la nécessité de connaître, d'affiner et de contrôler l'extension du gisement et sa teneur en minerai reste capitale afin d'assurer la productivité (Berkman, 2011b). Cela induit la réalisation de nombreux forages, qui seront identiques dans la méthode et la mise en œuvre aux forages d'exploration.

Tableau 5-1 Tailles des outils de forage diamants « wireline » couramment utilisés en exploration minière (Berkman, 2011a).

Taille de l'outil	Diamètre carotté (mm)	Diamètre du puits (mm)	Volume du puits (L/100 m)
BQ	36.5	60.0	282
NQ	47.6	75.8	450
HQ	63.5	96.1	725
PQ	85.0	122.6	1181
BQ3	33.5	59.9	282
NQ3	45.1	75.7	450
HQ3	61.1	96.1	725
PQ3	83.1	122.6	1181

Les méthodes acoustiques

La connaissance de la topographie du fond est essentielle pour les futures opérations de ramassage, les engins de collecte ne pouvant opérer que sur des pentes inférieures à 10 % et sans obstacles supérieurs à quelques décimètres. Pour obtenir des cartes suffisamment précises, on utilise des méthodes acoustiques : sondeurs et sonars. Les sondeurs de sédiments opèrent dans les fréquences de la dizaine de kilohertz, avec un niveau acoustique de 200-215 dB re 1µPa, les sondeurs multifaisceaux grands fonds entre 12 et 30 kHz et les sondeurs monofaisceaux grands fonds à 12 kHz, avec des niveaux acoustiques de l'ordre de 225 à 240 dB re 1 µPa@1m. Les sonars, quant à eux, opèrent dans la centaine de kilohertz (Lurton and Antoine, 2007). **Ces sons et ultrasons sont décrits comme censés ne provoquer que des effets mineurs et passagers sur les organismes marins.** Les impulsions sonores sont de très courte durée (1 à 2 millisecondes) et se répètent toutes les 2 à 20 secondes. Elles sont focalisées dans un cône relativement étroit. De plus, le dispositif avançant assez rapidement (15 à 20 km/h), la perturbation sonore reste, selon les auteurs, passagère.

L'impact des méthodes acoustiques a été étudié sur les mammifères marins, mais c'est un phénomène encore mal connu. S'il n'a pas été observé d'impacts frappants, tels que l'augmentation des phénomènes d'échouage de mammifères marins liés à l'utilisation des méthodes acoustiques de recherche (sismique et sonars), l'état des recherches ne permet cependant pas de prouver l'absence certaine d'impacts sur la faune. Certaines procédures de précaution et de mitigation¹⁶ des émissions ont ainsi été mises au point par certains organismes de recherche, comme l'Ifremer (Lurton, 2013).

Certains contributeurs témoignent d'observations faites sur le terrain, acquises avec des collègues au cours de plongées réalisées avec le Nautille. **Ils ont pu observer des bancs de poissons dont le comportement ne changeait pas, alors qu'ils étaient dans le champ d'action d'un sonar en fonctionnement. Ils ont également pu constater que, lors des plongées du Nautille, des poissons des grands fonds étaient attirés par les bruits du sous-marin et s'approchaient de l'engin à quelques centimètres sans montrer aucune frayeur ou réaction aux impulsions sonores. Par contre, il n'a pu être prouvé que d'autres espèces n'aient pas, à l'inverse, été effrayées et se soient enfuies hors du champ de vision des explorateurs.**

¹⁶ « La mitigation est spécifique à la prévention de risques majeurs naturels. C'est l'action qui conduit à réduire l'intensité de certains aléas (inondations, coulées de boue, avalanches...) et la vulnérabilité des enjeux pour faire en sorte que le coût des dommages liés à la survenue de phénomènes climatologiques ou géologiques soit supportable par notre société. Ceci amène l'Etat et les collectivités locales à engager des actions qui vont y contribuer et à impliquer le particulier qui doit agir sur ses biens propres afin d'en réduire leur vulnérabilité. » http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/mitigation.php4

Les dispositifs à ultrasons utilisés pour étudier la structure des couches sédimentaires sur lesquelles reposent les nodules ou pour assurer le positionnement des navires et d'engins de reconnaissance (poissons tractés ou autonomes, sous-marins habités) ont des effets similaires, selon certains auteurs.

Techniques photographiques

La détermination de la couverture de nodules en continuité et en quantité peut également s'obtenir par des moyens acoustiques multifréquences. Cette technique requiert cependant un étalonnage précis par des observations directes du fond (photographie ou vidéo) et des prélèvements. **La photographie et la vidéo n'engendrent des perturbations que par les moyens d'éclairage mis en œuvre: flashes ou projecteurs. Les organismes benthiques étant dépourvus de capteurs de lumière, ils sont probablement insensibles à cet éclairage, mais cela n'est pas prouvé scientifiquement.** L'extinction puis l'allumage des projecteurs à bord du Nautille n'ont pas semblé provoquer de réactions de la part des poissons inspecteurs.

Toutefois, il **n'est pas improbable que d'autres espèces aient fui la lumière.** Ainsi, par exemple, Widder et coll. (2005) ont étudié le comportement du charbonnier, *Anoplopoma fimbria*, (poisson vivant jusqu'à 2740 m dans le Pacifique Nord) dans des conditions d'éclairage différentes. Ils ont ainsi observé un plus grand nombre d'animaux de cette espèce avec un éclairage infra-rouge ou obtenu au moyen de diodes qu'avec de la lumière blanche. Le temps d'exposition semble influencer également le comportement de ces poissons (Widder et al, 2005).

Analyses minéralogiques, chimiques, météorologiques et courantologiques

Les analyses minéralogiques et chimiques faites à bord des navires ou leur conditionnement pour des analyses à terre recourent à des méthodes physiques non polluantes (microscopes, spectromètres). **Les observations et mesures météorologiques et courantologiques** ne diffèrent en rien de celles couramment utilisées pour la recherche scientifique et **ne présenteraient a priori aucun impact.**

Prises d'échantillons

La prise d'échantillons est indispensable, tant pour évaluer l'abondance des nodules par unité de surface que pour déterminer leur composition chimique et minéralogique, notamment. Elle utilise principalement de petites bennes preneuses, à flancs solides ou formés de filets, entamant le sédiment sur quelques centimètres de profondeur et sur une surface de 0,2 à 0,5 m². Elles recueillent ainsi quelques kilogrammes de nodules. Les prélèvements sont généralement distants de quelques centaines de mètres et groupés en séries de 5 à 10. Entre deux séries, la distance est de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres. **Les perturbations du fond sont donc très limitées.**

Deux générations d'appareils sont couramment employées : des systèmes mis en œuvre au bout d'un câble à partir du navire ou des systèmes autonomes (préleveurs libres ou boomerangs). Si ces derniers ont été intensivement utilisés, ils ont le désavantage de nécessiter un lest, par exemple un tube de PVC rempli de ciment, qui permet la descente du préleveur et qui est abandonné sur le fond après prélèvement. **La présence de ces lests sur le fond, même très disséminés, peut constituer un problème pour les futurs systèmes de ramassage.**

Des prélèvements plus importants peuvent être nécessaires pour réaliser à terre des essais de dispositif de ramassage ou de procédés de traitement métallurgique. On a alors classiquement recours à des dragages.

La drague, une cage parallélépipédique grillagée ou une sorte de petit chalut de 1 à 2 mètres de largeur, est traînée sur le fond à l'aide d'un câble sur quelques centaines de mètres avant de se remplir. On a pu constater, du fait de son enfoncement progressif dans le sédiment, qu'elle progressait en général par saltation. Les traces de dragage, observées par photographie ou par le Nautil, montrent ainsi un sillon peu profond (quelques centimètres) de la largeur de la drague, sans nodules, et deux bourrelets de un à deux décimètres de sédiment repoussé de part et d'autre. Chaque trait de drague ramène de 0 à quelques dizaines de kilogrammes de nodules et demande 4 à 8 heures. Une campagne de dragage réalise entre 30 et 50 traits. L'impact sur le fond reste là encore relativement limité.

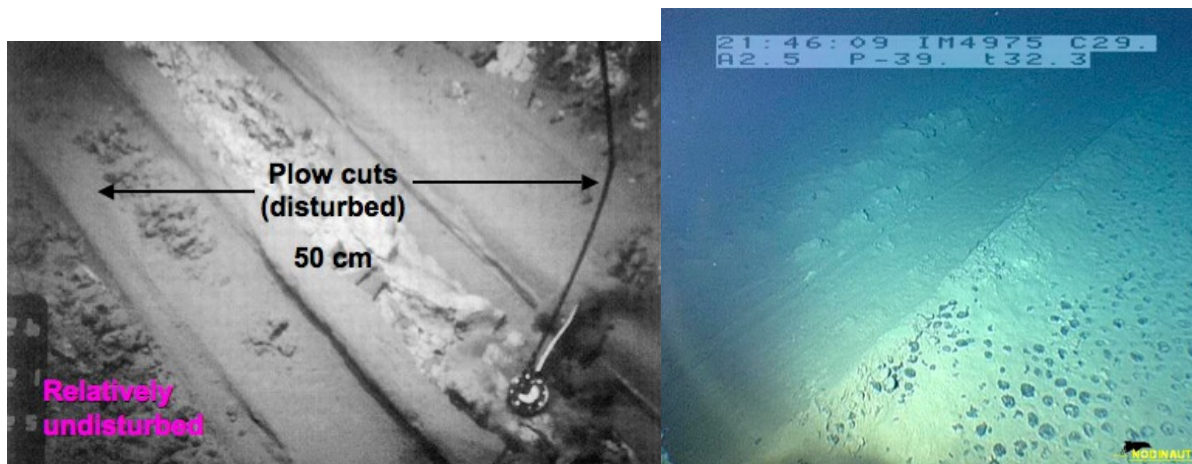


Figure 5-2 Trace de drague.

(Source: site du Pew Workshop – *Design of Marine Protected Areas for Seamounts and the Abyssal Nodule Province in Pacific High Seas*, 2007)

D'autres prélèvements sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques des sédiments qui forment le substrat des nodules. Ces sédiments sont extrêmement mous et conditionnent le choix des supports des futurs engins de collecte (skis ou chenilles), dont dépendra l'efficacité du système de ramassage. On procède à l'aide de carottiers qui découpent dans le sédiment un prisme (carottier boîte), une tranche (carottier à lames) ou un cylindre (carottier tube). La profondeur de pénétration ne dépasse pas quelques mètres pour les carottiers cylindriques de petit diamètre (10 cm) et quelques décimètres pour les carottiers boîtes. Ces derniers prélèvent généralement un cube de 0,5 m de côté. La densité des prélèvements reste faible en raison du temps nécessaire à leur réalisation (4 à 6 h) : moins d'un carottage par 100 kilomètres carrés.

Les carottiers sont aussi utilisés pour étudier les sulfures et les encroûtements.

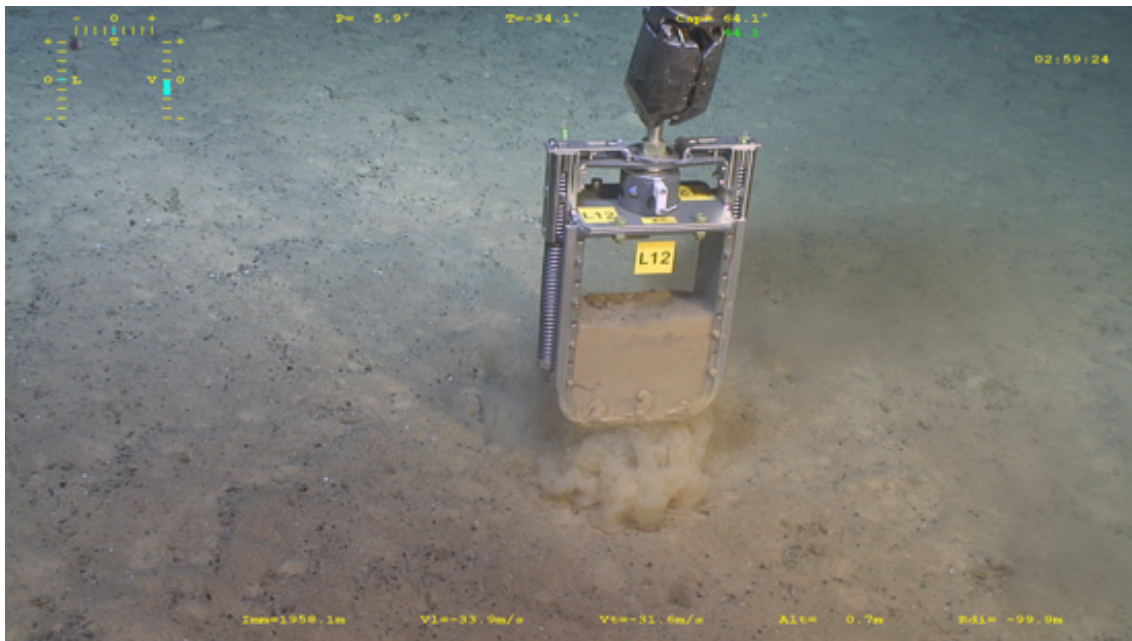


Figure 5-3 Un carottier à lame prélève du sédiment. Photo Victor6000 (15 *15 cm).

Dans le cas des sulfures hydrothermaux, par exemple, au lieu de nodules, ce sont plutôt des morceaux de cheminée qui sont prélevés. Cf. Figure 5-4



Figure 5-4 Un fragment de cheminée hydrothermale éteinte contenant des oxydes de cuivre, prélevé pour datation du site Sintra (site hydrothermal Lucky Strike sur la dorsale médio-atlantique)
Photo Victor6000 (Source : Journal de bord de la campagne MomarSat, 2011)
Le diamètre de la pince est d'environ 15cm.

Toutes ces techniques d'échantillonnage concernent donc des échantillons **relativement petits**. Cependant, dans le cas des sulfures hydrothermaux, **la friabilité de la roche peut conduire à une dégradation un peu plus importante**, lorsqu'elle oblige les scientifiques à recommencer le prélèvement un certain nombre de fois. La faune peut également être ramenée grâce à des aspirateurs à faune (Journal de Bord MomarSat, journée du 8 j uillet 2011).

Exemple d'une étude sur les impacts environnementaux de la recherche sur les sites hydrothermaux : Résumé de la thèse de Raphaëlle Dancette

En 2008, une étude examine les impacts dus à la recherche (Dancette, 2008) en comparant les champs hydrothermaux Endeavour, zone protégée, et Mothra, où les activités de recherche sont intenses (dorsale Juan de Fuca). Seules quelques cheminées sont étudiées pour chaque champ (2 pour Mothra, 5 pour Endeavour, lors de la mission NEMO 2006). L'auteur précise même que pour l'analyse biologique, seules des portions des cheminées font l'objet de prélèvements. Cette étude a cherché à estimer les impacts dus à la recherche lors de la mission NEMO 2006. Les auteurs remarquent « qu'environ 55% des activités scientifiques ont causé des dommages (d'intensité, d'étendue et de durée variables) à Mothra alors que ce ratio descend à 33% environ à Main Endeavour. » en précisant qu'à Main Endeavour, il y a eu moins d'activité d'échantillonnage.

La destruction de cheminées lors de l'échantillonnage géologique ou du flux hydrothermal produit les impacts les plus importants. Les échantillonnages biologiques causent moins d'impacts car le matériel est plus facile à manier et limite la destruction involontaire de l'habitat. Certains prélèvements nécessitent que le ROV (le ROPOS, 2110-2630 kg selon la profondeur) se pose au sol, ce qui endommage également la surface sous le ROV.

Cette étude résume la propension des différents types de recherche à impacter l'environnement hydrothermal pour les champs Mothra et Main Endeavour Field (MEF).

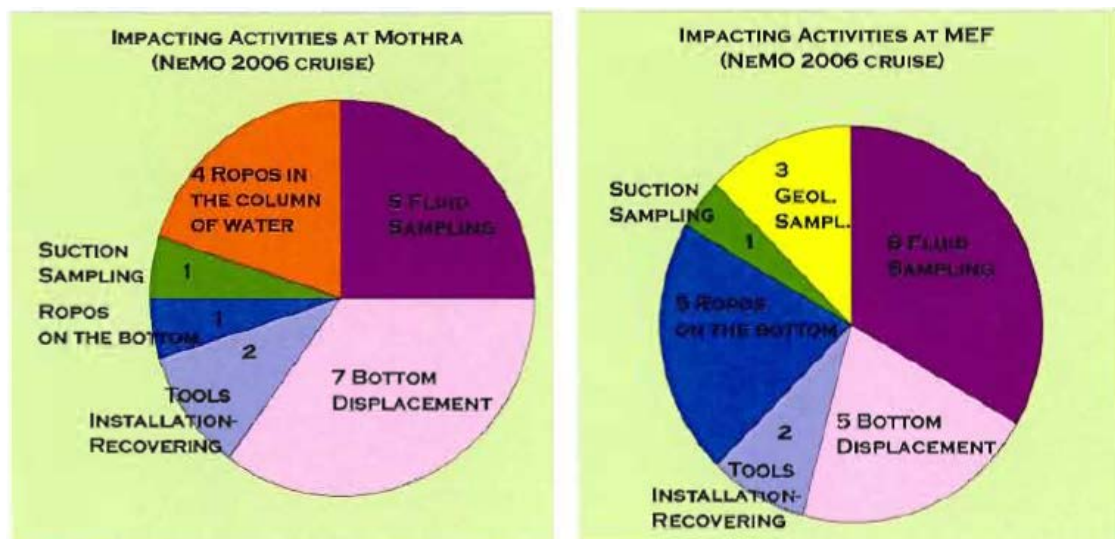


Figure 5-5 Activités ayant créé des impacts lors de la mission NeMO 2006, dans la ZPM Endeavour (images tirées de Dancette et Juniper, 2007).

D'après ces observations, les assemblages biologiques les plus impactés sont ceux vivant aux sommets des cheminées, là où a eu le lieu le plus grand nombre d'échantillonnages (échantillonnages de flux et géologiques). L'étude avance l'hypothèse que, si la croissance des cheminées est rapide, les vers *P.sulfincola* pourraient coloniser jusqu'à 1cm/jour et plus, permettant potentiellement le renouvellement des organismes aux sommets des cheminées après les missions.

L'étude s'intéresse ensuite à la comparaison avec les impacts identifiés lors de la mission Atlantis-Alvin de 2004, sur les mêmes champs. Une des différences majeures concerne l'utilisation d'un submersible habité. Les observations faites lors de cette mission permettent d'établir que 47% des activités à Mothra et 52% des activités à Main Endeavour Field ont eu des impacts visibles. Il n'y a eu de bris de cheminée qu'une seule fois, lors des différentes

plongées, mais l'étude met en avant l'existence « d'impacts de degré 2 » : toucher d'une cheminée, avec beaucoup de faune arrachée d'un même coup (plus que ce que peut contenir la bio-box), lors de l'échantillonnage géologique et de l'installation et la récupération d'outils. L'échantillonnage biologique, l'installation et la récupération d'outils et l'immobilisation de l'Alvin dans la colonne d'eau seraient les trois activités ayant causé le plus d'impacts lors de la mission Atlantis-Alvin.

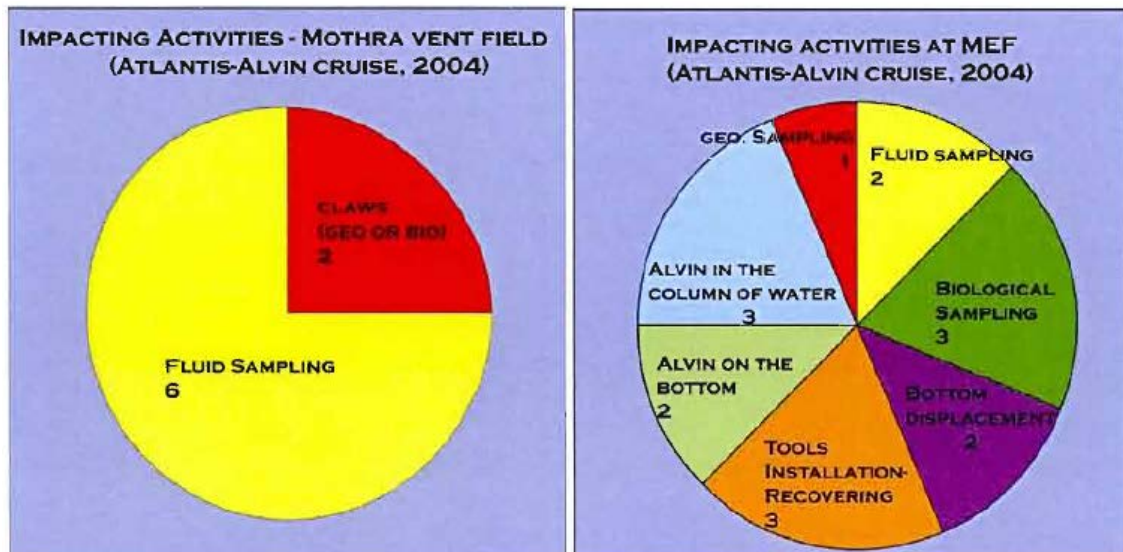


Figure 5-6 Activités ayant engendré des impacts par le sous-marin habité Alvin dans la ZPM Endeavour à l'été 2004 (images tirées de Dancette et Juniper, 2007).

à gauche : au champ Mothra, résultats de la plongée 4015

à droite : au champ Main Endeavour, résultats de la plongée 4018

A Mothra, l'atterrissage de l'Alvin sur le sol aurait causé un impact majeur à chaque plongée. A Main Endeavour Field, l'assemblage le plus touché serait celui associé au flux hydrothermal, puisque c'est lui qui faisait principalement l'objet des recherches.

La comparaison entre les deux missions a permis d'établir que :

- Les échantillonnages biologiques et géologiques laisseraient toujours des traces sur l'habitat
- L'échantillonnage de flux laisserait également des traces pour trois cas sur quatre
- Les déplacements en hauteur (plus de 5 m) n'engendreraient jamais d'impacts (du moins dans le cas de ces deux missions, mais est-ce toujours le cas ?)
- Les déplacements à faible altitude génèreraient en moyenne des impacts pour un cas sur quatre
- L'atterrissage du ROV n'engendrerait pas forcément d'impact, cela dépendant de l'emplacement choisi et de la faune y vivant.

Bien que ces comparaisons ne reposent que sur une seule plongée par site, par type de sous-marin, les auteurs se refusent à extrapoler les impacts causés par les deux modèles de sous-marins. Les objectifs des plongées influent sur la fréquence des types d'activité. Il faudrait contrôler aussi le nombre de fois où chaque activité est pratiquée, afin d'analyser si certaines activités génèrent d'avantage d'impacts en particulier.

L'utilisation de sous-marins génère un type d'impact supplémentaire : des déchets sous forme de grandes quantités de métal.

Pour les ROV habités, il s'agit des poids de plongée, laissés sur place. L'Alvin, par exemple, peut se délester de plus de 375 kg en poids de plongée avant de remonter.

Pour le ROPOS, il semblerait que ce soit une partie de l'équipement scientifique : ancres, autres outils. Un technicien a admis, dans le questionnaire réalisé dans le cadre de cette étude, avoir laissé ainsi 10 000 livres (environ 4536 kg) d'acier, juste pour la mission NEMO 2006 (7 plongées en tout). A partir de ce cas, et à partir des données du Système de Gestion d'Endeavour, on peut estimer que cela représente environ 40 000 livres (soit environ 18 143kg) de métal déposé sur le fond par an pour une même zone (à moins d'y organiser des missions de nettoyage).

D'autres déchets peuvent être oubliés, comme les quelques km de corde plastique vue sur le site du volcan Axial. Il arrive aussi que des instruments soient perdus ou endommagés lors de la remontée.

Cette étude s'est également intéressée à la perception des différents impacts par les membres des missions (équipe du sous-marin, professeurs, étudiants, techniciens). Après avoir interrogé les membres de la mission NEMO 2006 sur l'impact engendré par 5 activités de recherche-type, les auteurs soulignent à quel point cette perception peut être subjective. Pour résumer, l'équipe du ROPOS considère que les différentes activités de recherche, leurs effets indirects et les manipulations connexes ont un impact général important sur le milieu. Pour leur part, les étudiants et scientifiques semblent considérer que les différentes activités ont des effets parfois importants (échantillonnage, installation et récupération d'outils) mais le plus souvent mineurs (éclairage, bruit, transits). Les transits constitueraient l'activité ayant engendré le plus de bris de cheminée sur Mothra et de traces sur les deux champs hydrothermaux avec l'échantillonnage.

Aussi, une meilleure formation en biologie et une meilleure connaissance des écosystèmes (ici hydrothermaux) rendraient les navigateurs plus autonomes et plus efficaces. Enfin, tous les membres de la mission devraient être informés sur le statut (protégé ou non) des zones traversées et échantillonnées lors de la mission. Le fait de se savoir dans une zone protégée pourrait rendre les gens plus attentifs.

Cette étude identifie encore d'autres impacts environnementaux, liés non pas aux activités de recherche elles-mêmes, mais au comportement des gens. Lors de la mission NEMO 2006, divers déchets (cartons d'emballage de nourriture, aliments, verre) ont été jetés par-dessus-bord. L'incinération, semble-t-il, est la principale méthode d'élimination des déchets mais elle produit de l'acide sulfureux et des NOx, qui pollue l'air (pluies acides, smog) et du CO₂. La loi canadienne interdit le rejet du plastique seulement à plus de 3 miles des côtes.

A l'international, 136 pays (dont le Canada et la France), ont ratifié le protocole MarPol. Cette convention, relative à la prévention de la pollution par les ordures a été révisée en juillet 2011, avec une mise en application de la version révisée le 1^{er} janvier 2013. L'annexe V « Prévention de la pollution par les ordures des navires » interdit « tout rejet à l'exception de quelques déchets alimentaires, résidus de cargaison et autres produits de nettoyages non nocifs pour l'environnement » (Organisation Maritime Internationale, 2011 <http://www.delegfrance-omi.org/IMG/pdf/BilanOmi2011.pdf>). Qu'en est-il des autres pays ?

Ces techniques, destinées à réunir suffisamment d'informations pour élaborer les stratégies ultérieures de ramassage, les techniques et technologies associées ainsi que les méthodes connexes de traitement ne diffèrent pas fondamentalement de celles couramment employées pour la recherche scientifique marine. Elles sont considérées comme ayant des effets nocifs très limités sur l'environnement marin.

Cependant, la nécessité de connaître, d'affiner et de contrôler l'extension du gisement et sa teneur en minerai reste capitale afin d'affiner la stratégie future d'exploitation, et la réalisation de nombreuses phases d'exploration sur une emprise spatiale plus importante pourrait présenter un impact significatif.

5.2.2. Impacts environnementaux de l'exploitation

Pour les nodules, ressources minérales profondes pourtant les plus étudiées, les méthodes d'exploitation sont encore loin d'être définitivement établies. Celles pour l'exploitation des sulfures et les encroûtements cobaltifères sont encore en cours de développement.

D'une manière générale, l'exploitation comporte trois stades : la récupération du minerai, son transport d'abord jusqu'au bateau, en surface, puis vers un port de débarquement et enfin son traitement métallurgique dans une usine à terre. La littérature scientifique fait état, pour les nodules, qu'une partie du traitement peut être réalisée sur les bateaux, étape consistant en la fabrication d'une pulpe concentrée. La troisième étape, le traitement à terre, dépasse le domaine du rapport d'expertise. Elle ne sera pas traitée.

Pour les sulfures, Nautilus Minerals, par exemple, utiliserait un système de collecteurs rigides reliés aux minéraliers pour le transport et la remontée des matériaux extraits. Ces collecteurs ne seraient utilisables que dans la mer de Bismarck, mer fermée dont les eaux sont particulièrement calmes (Julien Denègre, comm. pers. 2013). Neptune Minerals quant à lui opérant dans les eaux de la Nouvelle-Zélande, où les conditions de mer sont plus violentes, utiliserait alors un système de liaison flexible (Julien Denègre, comm. pers. 2013). D'autres industriels cherchent aujourd'hui à développer des systèmes alternatifs de remontée (Julien Denègre, comm. pers. 2013), mais en raison de la confidentialité de ces développements et de l'absence de précédents, **la prévision des impacts environnementaux de l'exploitation des sulfures reste très difficile.** Par la suite, nous nous baserons essentiellement sur la technologie exposée par Nautilus Minerals.

Pour les encroûtements cobaltifères, comme cela a été montré dans le chapitre 3, des méthodes très diverses ont été proposées : collecteurs-broyeurs, semblables à ceux utilisés pour les nodules, lixiviation *in situ*, détachement des encroûtements du substrat par effet acoustique. **Ces méthodes sont encore en cours de développement.**

Les spécialistes du marin profond s'accordent cependant à dire qu'un certain nombre d'impacts peuvent être prédits. Le sol sera le compartiment le plus affecté, parce que les métaux vont être arrachés aux sédiments auxquels ils sont intégrés, détruisant l'habitat qu'ils forment. De plus, cet arrachage va conduire à la formation d'un nuage de particules d'une part, et les machines vont compresser le sol sur leur passage d'autre part (Sharma, 2011). (Cet article de Rahul Sharma se rapporte aux nodules, cependant ces types d'impacts sont potentiellement généralisables aux sulfures et encroûtements, en raison des similarités des engins de collectes et de terrassement). **Beaucoup d'incertitudes demeurent cependant**

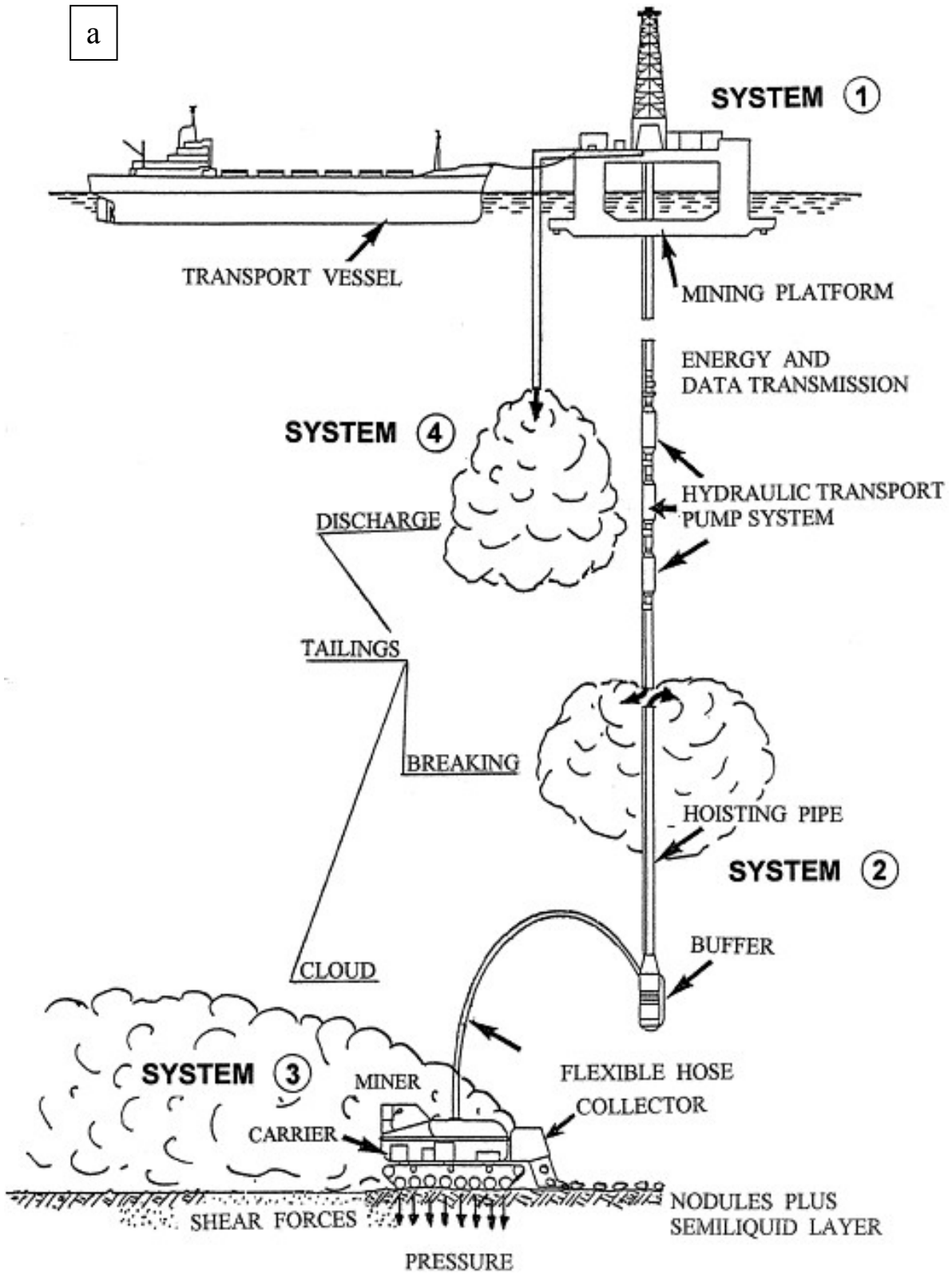
quant à l'ampleur de ces impacts, notamment en ce qui concerne les moyens de transports et de traitement des déchets miniers.

Pour les nodules, certains impacts peuvent cependant être précisés, ainsi que leurs effets potentiels sur les différents compartiments marins comme le montrent les exemples suivants. **Plusieurs groupes d'industriels et de scientifiques ont réalisé des tests d'exploitation minière ou de perturbation des couches sédimentaires du plancher océanique. Ces tests, menés dans les années 70 à 90 (Jankowski and Zielke, 1997; Jones, 2000; Radziejewska, 2001), portent exclusivement sur les nodules polymétalliques.** Ces études ont influencé le développement de systèmes miniers individuels et de sous-systèmes pour la collecte, le criblage, la remontée des nodules et leur transport jusqu'à la surface. Certains de ces tests ont été complétés par des expériences, dans le Pacifique et l'Océan Indien, ayant pour but de prévoir les impacts environnementaux potentiels de l'exploitation minière en eaux profondes.

1. les premiers tests datent du début des années 70 : une étude américaine sur le plateau de Blake dans l'Atlantique Nord par les américains en 1970, une deuxième en 1972 sur la « ride » des Bermudes, décrite par Amos et coll. en 1973 (Amos et al, 1973) et l'étude nippo-américano-française « Continuous Line Bucket Mining Test Study » dans le Pacifique en 1972, évoquée par Thiel en 1991 (Thiel et al, 1991), d'après Jankowski et Zielke (1997).
2. le projet américain « Deep Ocean Mining Environmental Study » (DOMES), dans la zone Clarion-Clipperton (Pacifique Nord) de 1975 à 1980, conduite par la NOAA (Etats-Unis) (Atmospheric Administration, office of Ocean minerals, 1981). Cette étude s'est intéressée aux impacts environnementaux des tests d'exploitation pilotes effectués par l'Ocean Mining Inc. (OMI) et l'Ocean Mining Associates (OMA). Ils ont mesuré la concentration des particules dans les rejets et évalué les impacts biologiques des nuages de particules benthiques et sur les eaux de surface (Chung, 2002).
3. Des essais miniers pré-pilotes sur le site A de la zone d'étude du DOMES en 1978.
4. Une autre série d'essais, toujours en 1978, sur le site C, présentée par Ozturgut (Ozturgut et al, 1980).
5. Le programme MESEDA dans la fosse Atlantis de la mer Rouge, riche en sédiments métallifères, de 1977 à 1979 (Amann, 1985; Thiel et al, 1986).
6. Une étude sur les nodules de phosphorites sur la Ride Chatham, conduite en 1978 par l'Allemagne et la Nouvelle-Zélande (Kudraß, 1984).
7. L'expédition américaine ECHO-1 en 1983, sur le site C identifié dans le projet DOMES (Bischoff, 1979).
8. Une étude de la mortalité aigüe de la faune benthique sur le site C du projet DOMES en 1987 (Smith et al, 1988).
9. L'expédition américaine QUAGMIRE II sur le site C du projet DOMES en 1990 (Wilson, 1990).
10. Le programme allemand DISCOL dans le bassin du Pérou (Pacifique) de 1989 à 1996. Les scientifiques ont observé le milieu avant la perturbation du sol (faite avec un soc de charrue), immédiatement après, 6 mois après, 3 ans après et 7 ans après, afin de surveiller l'impact et le processus de recolonisation (Thiel and Schriever, 1989 et 1990; Foell, Thiel et Schriever, 1990; Schriever et al, 1997; Chung, 2002)
11. Le programme coréen KODOS (Korean Deep Ocean Study) dans la zone Clarion-Clipperton, depuis 1989 (Jung et al, 1998)
12. La NOAA - BIE (Benthic Impact Experiment), conduite en 1993 et 1994 dans la zone Clarion-Clipperton. Le sol a été perturbé à l'aide d'un système de

- resuspension des sédiments en milieu marin profond (DSSRS, Deep Sea Sediment Re-suspension System), avec une nouvelle série d'observations faite 9 mois plus tard (Brockett and Richards, 1994; Trueblood, 1993; Chung, 2002)
13. Le JET (Japan Deep Sea Impact Experiment) dans un site situé à l'ouest du site de la NOAA - BIE (zone Clarion-Clipperton), en 1994 (Barnett and Yamauchi, 1995; Fukushima, 1995; Kajitani, 1997). Un DSSRS a également été utilisé dans cette expérience et les observations post-perturbation ont été réalisées 2 ans plus tard (Chung, 2002).
 14. Le programme indien INdian Deepsea EXperiment (INDEX) de l'Institut National d'Océanographie de Goa, dans le bassin de l'Océan Indien Central, depuis 1995 (travaux de Sharma, Ingole, Nath, Bharathi...). Ils ont utilisé un DSSRS et ont étudié le mélange vertical des sédiments, la distribution latérale des particules, les effets sur les micro-organismes, le méio- et le macrobenthos, à l'intérieur comme à l'extérieur du sillon, ainsi que la recolonisation et la restauration à long terme de l'environnement benthique (Chung, 2002).
 15. Les tests IOM - BIE (InterOceanMetal Benthic Impact Experiment) en 1995 dans l'est de la zone Clarion-Clipperton par le consortium InterOceanMetal (Kotlinski, 1995; Kotlinski and Tkatchenko, 1997). Ils ont été réalisés aussi avec un DSSRS par l'InterOceanMetal Joint Organization (Chung, 2002)
 16. Le programme allemand Effects of Technical Interventions into the Ecosystem of the Deep Sea in the Southeast Pacific Ocean (ATESEPP), à 4150 m dans le bassin du Pérou, entre 1996 et 1998 (Schriever, 2000). Ce programme était une extension de DISCOL. Il a apporté des informations supplémentaires sur le transport des sédiments près et loin du site d'expérimentation, ainsi que sur les propriétés mécaniques et géochimiques du sol.
 17. L'étude d'impact japonaise sur les monts sous-marins Direct Impact Experiment on Seamount (DIETS), faisant partie du programme « Environmental Impact Research on Marine Ecosystem for Deep-sea Mining », de 1998 à 2002 (Ohkubo et al, 2003; Brunn, 2011).
 18. Et l'expérience de dispersion de sédiments (SEDEX), conduite dans le bassin Indien central entre 0 et 50 m (Bharathi et al, 2005).

Ces études ont été complétées récemment, en particulier par le travail d'Alexis Khripounoff et coll. en 2006, ceux de Miljutin et coll. en 2011 et ceux de Sharma, en 2011 également.



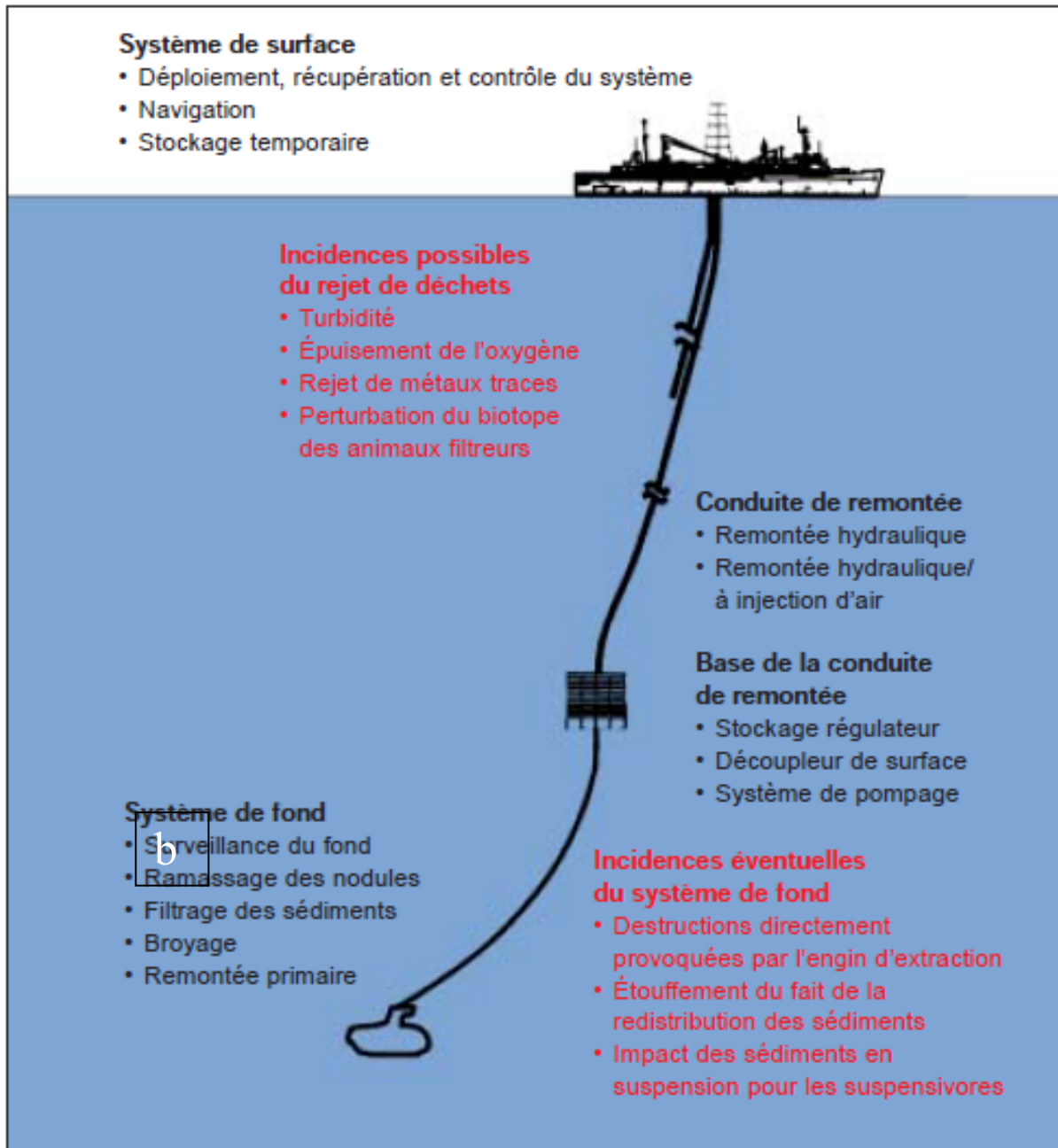


Figure 5-7 Impacts potentiellement générés par l'exploitation des nodules.

5-7 a Types de panaches potentiellement générés par l'exploitation des nodules (Oebius, 2001)

5-7b Types d'impacts (en rouge) potentiellement générés par l'exploitation des nodules (AIFM, 2002)

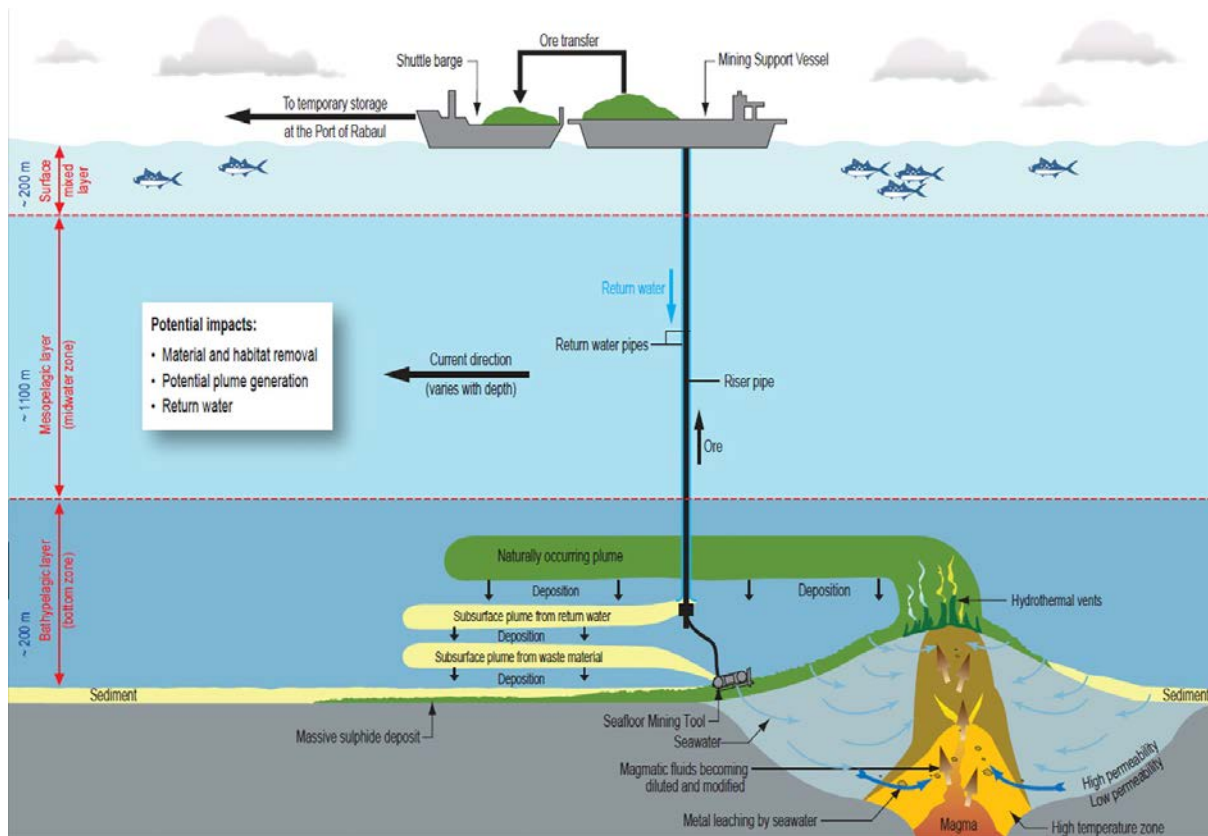


Figure 5-8 Schéma du processus minier envisagé par Nautilus à Solwara 1 et impacts potentiels (Collins et al, 2013).

Ces types de pollutions/impacts peuvent être aux reliés aux différents compartiments marins, comme le montre le tableau 5-2.

Tableau 5-2 Zones probablement affectées par les différentes phases de l'exploitation des nodules polymétalliques (traduction de Sharma, 2011).

Activité	Plancher océanique	Colonne d'eau	Surface	A terre
Collecte	#			
Séparation	#			
Remontée	#	#		
Lavage	#	#	#	
Traitement en mer	#	#	#	
Transport	#	#	#	#
Extraction	?	?	?	#
Rejet des résidus	?	?	?	#

indique les impacts probables

? indique les impacts inconnus

Les résultats de ces différentes études ont montré que le système minier, opérant dans des conditions physiques, chimiques, biologiques et géologiques mal connues, influe significativement sur l'ampleur des impacts environnementaux (Chung, 2002). Les systèmes miniers de base, utilisés lors des études rendues publiques, étaient des dispositifs hydrauliques (collecteurs remorqués ou autonomes) ou à injection d'air de remontée des nodules et des systèmes de dragage à chaîne continue de godets disposés en boucles (brochure de l'AIFM sur la protection des fonds marins).

La nature de ces dispositifs miniers influe beaucoup sur les impacts générés et explique en partie les différences entre estimations quantitatives et conclusions sur leur importance. Enfin, les différences d'échelles (temporelle et spatiale) et l'évolution de la technologie rendent délicate l'extrapolation d'un certain nombre des résultats obtenus par les tests (Chung, 2002).

D'une manière générale, la majorité de ces études conclue à la nécessité d'un suivi des impacts plus poussé et spécifique de la zone de test et des techniques/technologies mises en œuvre.

Dans la suite de ce paragraphe, les termes « risques directs » et « risques indirects » désignent le degré de causalité de l'impact environnemental par rapport à l'étape de récupération du minerai (arrivée sur le site, récupération du minerai, départ du site).

Ces études ont adopté des stratégies similaires, directement inspirées des études d'impact effectuées à terre :

1. Un examen préliminaire visant à évaluer la situation initiale : observation et mesure d'un certain nombre de paramètres, ceux que l'on sait mesurer et dont on suppose qu'ils sont significatifs d'un environnement normal;
2. Création d'une perturbation dans un espace limité mettant en œuvre des moyens supposés représentatifs des perturbations que pourrait provoquer l'exploitation future;
3. Enfin, l'état des lieux juste après la perturbation, puis visites périodiques du site pour étudier la résilience du système.

Notons aussi que les outils de mesure sont toujours en constant développement. A l'heure actuelle, il est possible de mesurer de manière automatisée le pH, le CO₂, l'oxygène et certains éléments : fer (FeII/FeIII), soufre, sulfures... mais ces dispositifs dépendent de technologies très récentes, en particulier quand il s'agit d'opérer à de très grandes profondeurs (par exemple, le CHEmical MINIaturized analyzer, capable de faire des mesures à 6000 m de profondeur et qui n'est développé que depuis 2004).

Les périodes d'étude sont également restreintes à certaines périodes de l'année, suffisamment clémentes pour permettre l'utilisation des submersibles.

Ces technologies restent coûteuses, longues et difficiles à mettre en œuvre. Ainsi, on ne peut écarter la possibilité de sous-estimation de certains impacts (par exemple, la quantité de métaux lourds rejetés avec les sédiments après tri et lavage du minerai qui nécessite de nombreux échantillonnages et analyses pour un suivi temporel et spatial).

L'analyse des impacts et des risques et leur extrapolation restent aussi très difficiles, en raison de la grande variabilité des études réalisées. A titre d'exemple, les perturbations réalisées lors des études du projet DOMES simulaient le labourage du fond par un futur collecteur, en utilisant comme prototypes des engins de collecte définis à l'époque par OMI et OMA : des dragues suceuses.

Lors de la mission DISCOL, les Allemands utilisèrent pour leurs études une charrue multi-socs, avec laquelle ils labourèrent une zone d'environ 10 km² par des passes radiales.

Dans le cadre du BIE, du JET, de l'IOM BIE et de l'INDEX, le "Disturber" (Deep Sea Sediment Re-suspension System, DSSRS) a aussi été utilisé, constitué d'un bâti traîné sur le fond, et équipé d'une pompe à sédiments envoyant un nuage de sédiments dans la colonne d'eau environ 5 m au-dessus du fond.

La diversité des techniques utilisées, sur un nombre si restreint de campagnes d'essai ne permet pas de conclure sur les effets réels de chacune des stratégies de collecte.

5.2.2.1. Risques directs

Lors des études d'impacts listées précédemment, c'est principalement la perturbation des sédiments lors du dragage de nodules, qui a été testée, mesurée et a fait l'objet de quantification et de modélisation. L'objectif de cette partie est de faire état des risques possibles engendrés par une activité minière sous-marine.

Destruction des habitats

Les nodules eux-mêmes, comme les sulfures minéraux et les encroûtements cobaltifères forment des habitats particuliers : un substrat dur, colonisé par un certain nombre d'organismes. Par définition ces habitats de substrats durs sont détruits par l'activité d'extraction minière.

Dans les sillons, les couches supérieures sont détruites, aussi bien dans le cas des nodules que des encroûtements et des sulfures hydrothermaux (Ohkubo et al, 2003).



Figure 5-9 Traces des impacts laissés par les jets d'eau et les patins du BIE Disturber dans la zone Clarion-Clipperton (source: Interoceanmetal, dans Oebius et al, 2001).

Dans les années 70, Amos et Roels (1977) avaient calculé les volumes de sédiments perturbés en fonction des différents types de machines de dragage. Selon cette étude, une année d'exploitation pour une productivité de près de 4900 tonnes de nodules récupérés par jour devait aboutir au déplacement de 14 à 3 1,9 millions de m³ de sédiments et de plusieurs dizaines de milliards de m³ d'eau en fonction de l'efficacité de l'étape de récupération. La colonne d'eau serait ainsi affectée au moins sur 10 m au-dessus du fond par des particules solides en suspension. Seules des mesures sur les 10 premiers mètres au-dessus du plancher océanique ont pu être réalisées, mais on ne peut exclure que les particules se soient dispersées sur une plus grande hauteur d'eau.

Tableau 5-3 Quantité de sédiments du plancher océanique perturbés par le dragage des nodules (Amos and Roels, 1977).

Type of dredge	Separation of track lines (m)	Mining efficiency (%)	Nodules mined per day (metric tons)	Volume of sediment + nodules removed (m ³ x 10 ⁷)	Per 300-day year Volume of sediment alone (m ³ x 10 ⁷)	Volume of water affected (m ³ x 10 ⁹)	Suspended solids in bottom 10 m of water (ppm)
Towed	0	100	4920	1.48	1.40	1.48	9460
	50	30	4920	1.48	1.40	4.91	2850
	100	15	4920	1.48	1.40	9.81	1430
	500	3	4920	1.48	1.40	48.50	290
Self-propelled ^d	0	100	4600	3.26	3.19	1.73	18440
	50	35	4600	3.26	3.19	4.91	6500
	100	18	4600	3.26	3.19	9.81	3250
	600	3.5	4600	3.26	3.19	48.50	660

Depuis 1977, d'autres projections ont été faites. Cependant, soit du fait des conditions et époques des tests, soit en raison des différences entre les technologies utilisées ou de l'environnement dans lequel les expériences ont été faites, les évaluations peuvent être très différentes d'un article à l'autre.

Ainsi, d'après certains travaux menés dans les années 90, le total de la superficie, travaillée par une opération industrielle ramassant 1,5 million de tonnes par an durant 20 ans, devrait être de l'ordre de 4500 km² (Lenoble, 1996) et les estimations du volume de sédiment déplacé par la tête de drague industrielle pourraient varier entre 100 et 1500 tonnes par heure, suivant l'épaisseur de sédiment découpé (Tsurusaki, 1997; Lenoble, 1992).

Une autre étude (Sharma, 2011) se base sur d'autres estimations. L'Autorité Internationale des Fonds Marins a établi des secteurs réservés de l'ordre de 75 000 km² (72 746 km² pour le secteur réservé ISBA/11/C/10, par exemple). D'après l'auteur, sur ces 75 000 km², la proportion de surface impropre à l'activité minière en raison de facteurs topologiques défavorables est estimée à 20%. En outre, les zones où les nodules ne sont pas assez nombreux, ou de teneur insuffisante en métaux pour être rentables, sont estimées chacune à environ 15%. Il ne reste alors que 37 500 km² de terrain permettant une exploitation rentable. Ici, la durée d'une opération minière (D) est aussi estimée à 20 ans. L'abondance en nodules (An) doit alors être de 5 kg/m², le taux de récupération annuel de nodule (Ar) étant espéré à 3 millions de tonnes par an (soit deux fois plus que l'estimation de Lenoble) et l'efficacité du système minier (E) à 25%. Ces données permettent alors de calculer la taille d'un site minier (As) : 12 800 km², selon la formule $A_s = (A_r) (D) / (A_n) (E) (M)$, M étant la taille de terrain permettant une exploitation rentable.

En jours ouvrés, l'activité minière aurait lieu 300 jours/an. L'étude montre que l'aire réellement raclée serait de 600 km²/an, soit 2 km²/jour. (Il est bien sûr possible que le taux de récupération annuel de nodules soit moitié moins important, ou l'abondance de nodule plus grande, jusqu'à 15 kg/m²) (Sharma, 2011).

Dans les champs de nodules, le ratio moyen de nodules par rapport à la quantité de sédiment est de 1 : 9, ce qui implique que, lorsqu'on prélève les nodules, les sédiments constituant 90% voire la totalité du matériel vont être perturbés. Sharma utilise la formule suivante pour calculer le volume de sédiments remobilisés par l'opération de dragage des nodules, en posant l'hypothèse que le collecteur pénètre au minimum à 10 cm dans le sol. Cet auteur propose alors le calcul suivant :

Pour une zone de 600 km² soit 6.10⁸ m² par an, la formule à employer est :

$$V_s = A_d \times D_p \times C_s / 100$$

Où V_s est le volume total de sédiment perturbé,

A_d , l'aire de la zone perturbée,

D_p , la profondeur de pénétration (10cm),

et C_s la couverture sédimentaire (90%).

Cela donne un volume total de sédiment perturbé de 180 000 m³/jour, soit 207 000 tonnes par jour, en considérant une densité du sédiment égale à 1,15 g/cm³ (densité humide mesurée à partir d'échantillons du bassin Indien Central par Khadge et Valsangkar, 2008). Cette masse de sédiment étant composée de 80% d'eau, il en résulterait 41 400 tonnes par jour de particules solides remises en suspension par les opérations de raclage, concassage et transport, et en partie rejetées avec les déchets de « nettoyage » des nodules.

Dans l'hypothèse où le collecteur pénètre les 10 premiers cm de sédiments, presque toute la faune abyssale vivant sur le sol et dans les premiers centimètres de sédiments serait irrémédiablement éliminée par une destruction totale de l'habitat (Amos and Roels, 1977).

Le prélèvement des sédiments ne serait pas la seule cause de destruction de l'habitat des espèces marines benthiques : l'utilisation d'engins de ramassage pesant environ 300 tonnes et de dimensions de l'ordre de 15x15x5m sera indéniablement de nature à impacter des zones plus larges que la zone d'exploitation elle-même dans les conditions d'exploitation (largage dans des zones périphériques par exemple, avant utilisation). Leur poids pourra écraser les sédiments sur toute la distance qu'ils parcourent, détruisant à la fois l'habitat et les organismes sessiles sur leur passage. Leur passage laissera un mélange de sédiments moulus et d'agrégats de sédiments redéposés (effet synergique avec la retombée des particules sédimentaires mises en suspension par le passage des machines), formant une couche très molle à forte teneur en eau. Les organismes benthiques rencontreront alors une forte variabilité de substrats, probablement plus grande qu'à l'origine (Thiel, 2001). Ces impacts auront également pour effet des modifications importantes de la porosité et de la tortuosité des sédiments qui sont des propriétés essentielles pour l'échange de composés chimiques avec l'eau, tel l'oxygène.

Dans le cas des sulfures, les machines d'excavation, également très massives (environ 250 tonnes et de dimensions de l'ordre de 15x20m (Julien Denègre, comm.pers. 2013) seront susceptibles d'impacts importants. Dans le cas des projets développés par Nautilus Minerals, les surfaces susceptibles d'être impactées par une destruction directe des habitats seraient de l'ordre de 1 247 à 131 878 km² (comme le suggèrent les estimations de SRK Consulting 2011 pour les permis de Nautilus Minerals dans l'Ouest Pacifique présentées au tableau 5-4).

Tableau 5-4 Localisation et aires des zones d'exploration et des domaines d'exploitation des sulfures polymétalliques concédées à Nautilus Minerals dans le Pacifique (SRK Consulting, 2011).

Location	No.	Total area	Granted	Granted area (km ²)	Applications	Application area (km ²)
PNG - Woodlark Area	16	21,281	13	13,609	3	7,672
PNG - New Ireland Arc	6	15,345	0	0	6	15,345
Solomon Islands	92	50,102	92	50,102	0	0
Tonga	46	209,441	16	77,563	30	131,878
Fiji	17	63,087	14	58,243	3	4,844
New Zealand	2	56,283	0	0	2	56,283
Vanuatu	55	4,877	41	3,630	14	1,247
ISA - CCZ nodules	1	74,713	0	0	1	74,713
Total	235	495,129	176	203,147	59	291,982

Destruction directe de la biodiversité du plancher océanique

Lorsque des nodules sont prélevés, ils le sont avec leur épifaune et leur endofaune, puis concassés, amenant à la destruction complète de ces organismes (Thiel, 2001). **Les animaux prélevés avec les nodules ne survivront probablement pas aux contraintes mécaniques et à l'action combinée de l'abrasion et de l'augmentation de la température dans le conduit de récupération. Ceux ayant survécu se verraient éjectés n'importe où avec les sédiments, dans le panache sédimentaire (Jumars, 1981; Thiel, 2001).**

Parmi les organismes de petite taille (micro-organismes et méiofaune), certains pourraient survivre et être rejetés avec l'eau et les sédiments mais **il est peu probable que l'épifaune des nodules restants, enterrée sous les particules resédimentées, puisse ensuite subsister (Markussen, 1994).**

Certaines études avancent aussi la conclusion qu'un grand nombre d'animaux seront tués ou blessés directement par le passage des machines (Markussen, 1994), les plus vulnérables étant bien évidemment les espèces sessiles : échinodermes (crinoïdes, échinides, ophiurides, astérides), cnidaires fixés, spongiaires, mollusques fixés, brachiopodes et urochordés.

Comme cela a été dit dans le chapitre 4, les champs de nodules dans la zone Clarion-Clipperton sont particulièrement riches en cnidaires, échinodermes, spongiaires et cordés.

Dans le bassin du Pérou, la faune trouvée sur les nodules est composée principalement de bryozoaires et de brachiopodes. Les autres taxa associés aux nodules sont des xénophyophores, des porifères, des polychètes et des nématodes. La mégafaune est dominée, au niveau taxonomique, par les crustacés, les porifères, les ophiurides et les holothuries. Les éponges sont typiques de la communauté des substrats durs, elles font partie des animaux les plus vulnérables face au système de collecte des nodules (Bluhm, 1993).

Des poissons de l'espèce *Ipnops* sp. ont été observés et sont susceptibles d'être impactés. Ces poissons benthiques restent en effet immobiles des heures durant même s'ils sont capables de fuir rapidement. Des zoarcidés, des synphobranchides, des orphiides, des macrourides, des ascidies, des cnidaires et des crinoïdes ont aussi été répertoriés dans ces environnements (Anderson and Bluhm, 1997).

D'après Thiel (2001), seuls seraient susceptibles de survivre les espèces vagiles dont les poissons, certaines holothuries mobiles et crevettes, ainsi que (peut-être) certaines espèces de nématodes particulièrement résistants.

Les animaux qui s'enfouissent dans le sédiment devraient avoir également un peu plus de chance de survivre au passage d'un collecteur, mais ces espèces seront confrontées alors à d'autres perturbations indirectes. Par exemple, le plancton ou les autres particules dont ils se nourrissent risquent d'être entraînés par les courants avec le panache de particules, bouleversant profondément la communauté (Markussen, 1994).

Pour tous les habitats benthiques, la densité d'organismes varie avec la profondeur dans les sédiments. Ces gradients verticaux ont été précisés pour les micro-organismes par Raghukumar et coll. en 2001 dans le bassin Indien Central. D'après leurs données, le nombre total de bactéries dans les 10 premiers cm de sédiments diminue tandis que la distribution spatiale ne change pas (Raghukumar et al, 2001).

Dans une autre expérience, réalisée dans le Pacifique Ouest, Shirayama et coll. (2001) ont réussi à documenter la distribution verticale de la méiofaune.

Cette distribution est importante à prendre en compte, afin d'évaluer les impacts sur la distribution verticale des organismes supérieurs.

Toutes les expériences menées sur les nodules concluent ainsi à une diminution immédiate et significative de la biodiversité dans le sillon de dragage (Thiel, 2001; Borowski, 2001, Ahnert and Schriever, 2001; Ingole et al, 1999; Ingole et al, 2001, Oebius et al, 2001; Brunn, 2011).

Dans le bassin du Pérou, par exemple, Borowski et coll. ont rapporté, dans le cadre du projet DISCOL, une diminution de 39% de la macrofaune dans les zones perturbées par rapport aux zones non perturbées. Sur les trois principales familles, ils ont compté 48,6% de polychètes en moins, 28% de tanaidacea, 18,5% d'isopodes et 9,3% de bivalves en moins (Borowski, 2001). Dans le bassin de l'Océan Indien Central, Ingole et coll. (1999, 2001) ont mené plusieurs expériences. Dans l'une d'elle, ils ont constaté que la faune avait diminué de 68% dans le sillon du collecteur (Ingole et al, 1999). Dans la seconde, ils ont échantillonné les sédiments à 5 300-5 350 m de profondeur et simulé une perturbation grâce à un dispositif perturbateur. Ils ont ainsi pu noter une réduction de 63% du nombre d'animaux comptés dans les 2 premiers cm de sédiments après perturbation avec une forte agrégation de la macrofaune entre 5 et 10 cm de profondeur (Ingole et al, 2001).

De même, dans l'expérience rapportée par Brunn dans le cadre du projet DIETS, sur un site au sud-est de l'île Minamitori (dite aussi Ile Marcus), à 2200 m de profondeur, les nématodes, dominant le méiobenthos local, ont connu une diminution drastique juste après la perturbation (Brunn, 2011).

Seule l'expérience menée par Teresa Radziejewska, dans une étude d'impact benthique de 2 ans, réalisée dans les années 90 sur un site abyssal dans le Pacifique Nord-Est, rapporte que, dans ses conditions d'expérience, la diminution immédiate de l'abondance du méiobenthos ne peut pas être considérée comme statistiquement significative, de même que les changements de sa composition. Cette étude statistique repose sur l'échantillonnage de 35 stations : 14 à l'extérieur du sillon, 2 proches des bords du sillon, 5 sur les bords du sillon et 14 dans le sillon). Cet auteur fait l'hypothèse que cette absence de réponse, statistiquement significative, est probablement liée au degré modéré de la perturbation dans cette étude, par comparaison avec d'autres études d'impact benthique.

Cependant, 22 mois plus tard, Teresa Radziejewska enregistre des changements statistiquement significatifs, à la fois dans l'abondance de la méiofaune et dans les profils de distribution verticale (Radziejewska, 2002).

Modification des propriétés géochimiques du sédiment et de l'eau de fond

La modification de la texture du sédiment (compacté ou resédimenté) aura pour effet des modifications importantes de la porosité et de la tortuosité des sédiments qui sont des propriétés essentielles pour l'échange de composés chimiques avec l'eau tel l'oxygène.

Ainsi, une synthèse de la littérature scientifique sur les résultats de différentes équipes ayant travaillé dans le bassin du Pérou (Thiel, 2001) indique que les deux premiers centimètres de sédiments contiennent de l'oxygène, avec un gradient décroissant depuis la surface (des mesures réalisées lors du programme allemand DISCOL indiquent une concentration de 2 ml/L d'oxygène en surface, alors qu'entre 5 et 10 cm, les couches sédimentaires sont suboxiques). **Lors du raclage des nodules, les sédiments seront retournés sur des profondeurs allant jusqu'à 10 cm, entraînant donc un mélange des couches oxiques et suboxiques. Cela provoquera une modification des gradients d'oxygène et de pH (acidification, les eaux interstitielles étant moins alcalines que l'eau de mer) et, selon ces auteurs, un enrichissement en métaux lourds : plomb, tellure, cadmium, arsenic** (Thiel, 2001).

D'après Thiel (2001), les métaux lourds sont présents, dans les sédiments avec des concentrations allant jusqu'à 0,1%. Dans les couches oxiques, ces composés se lient préférentiellement aux oxydes de manganèse ou de fer sous formes particulaires. L'eau interstitielle oxique présente par contre de faibles concentrations de manganèse et de métaux lourds, avec des concentrations de l'ordre du μ g/L (Thiel, 2001). Dans les couches suboxiques, les concentrations de manganèse dissous sont de l'ordre du mg/L car celui-ci est transformé par certaines bactéries qui utilisent les oxydes de manganèse comme oxydant pour acquérir de l'énergie, et les métaux associés aux oxydes sont alors remobilisés (nickel, cobalt, zinc, cuivre, plomb, cadmium, tellure), atteignant de fortes concentrations. **Le mélange de ces différentes couches (ou « horizons » chimiques) induira une modification de la répartition de la proportion d'éléments métalliques et entraînera une perturbation des cycles biogéochimiques dans le sédiment dont la dynamique de retour à un état stationnaire reste aujourd'hui encore indéterminée** (Thiel, 2001).

Thiel souligne en particulier l'impact de ces processus sur la disponibilité de l'oxygène : dans la zone de test allemande, dans le bassin du Pérou, il a été observé que la transformation des oxydes de fer en Fe(II) sous des formes dissoutes très réactives pouvait limiter la diffusion de l'oxygène dans le sédiment.

Parthiban et coll. (2000) relèvent cependant une réduction significative de la concentration pour la plupart des éléments métalliques dans les sédiments impactés qui suggérerait le déplacement des sédiments riches en métaux et leur resédimentation dans d'autres zones par la migration du panache sédimentaire créé par les collecteurs de nodules. Ces changements de concentrations suggèrent également une transformation du type de minéral argileux, due à un changement de la chimie de surface des argiles par la perturbation du sédiment (Parthiban et al, 2000).

5.2.2.2. *Risques indirects*

D'autres impacts doivent aussi être pris en compte, bien qu'ils ne soient pas liés directement à l'extraction du minerai. Mais, étant liés à la production de déchets issus du transport, du nettoyage et du traitement du minerai et à la présence des vaisseaux-soutiens des minéraliers, leur(s) impact(s) ne doit(en)t pas être négligé(s).

Formation de nuages de particules fines et grossières

Le système de propulsion du collecteur, tout comme le ramassage lui-même, soulève des particules qui vont, en retombant, recouvrir partiellement ou complètement la faune dans le sillon et sur les côtés, augmentant ainsi le taux de mortalité (Markussen, 1994; Chung, 2002). C'est également le cas du ramassage des nodules. **Ces particules peuvent colmater les organes filtrants des suspensivores (bivalves, éponges...) et diluer les ressources alimentaires des détritivores** (Chung, 2002).

De plus, certains engins de dragage de nodules décollent les nodules grâce à la puissance de jets d'eau ou d'air et sont équipés d'un concasseur pour réduire la granulométrie et séparer sur place les fines du sédiment (moins de 20 μ m) (Thiel, 2001). Aucun expert ne s'accorde avec ses homologues pour quantifier les quantités de fines produites. Aussi, en fonction de la technologie utilisée, la proportion et la quantité de particules fines varient grandement. **Les particules fines sont capables de former un nuage de particules s'étendant sur de grandes distances. Ainsi, moins la proportion de particules fines sera importante, plus vite les sédiments resédimentent dans la zone d'extraction et moins l'impact environnemental sera important** (Thiel, 2001).

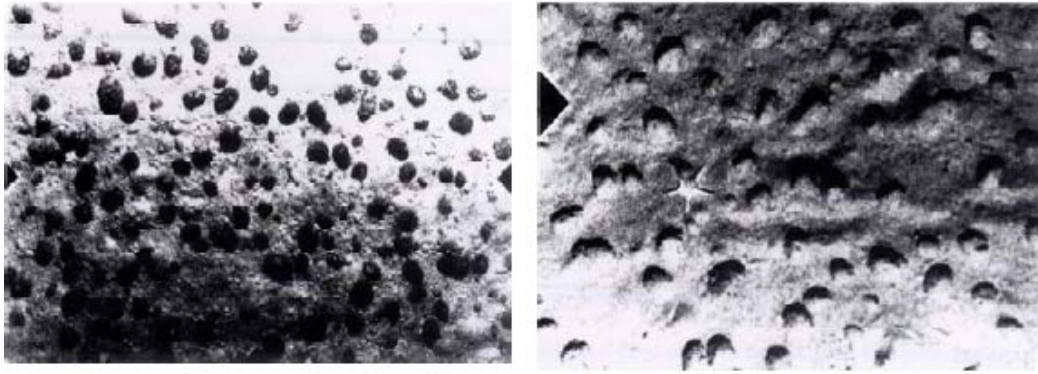


Figure 5-10 Effets de la redéposition des sédiments sur la mégafaune lors de l'expérience JET (Fukushima et al, 2000). L'image de gauche est une photo d'une zone où il y a peu de resédimentation de particules. La photo de droite est celle d'une zone où les particules sédimentaires se sont redéposées.

La dimension et le comportement du nuage de particules sédimentaires dépendent ensuite de la courantologie locale et du terrain (Oebius et al, 2001). En effet, d'après les expériences menées par ces équipes allemandes, le sillage¹⁷ est localement limité par une structure fortement turbulente. La structure turbulente du sillon maintient les particules fines en suspension, tandis que les particules les plus grosses et les plus lourdes quittent le sillon. Ces mêmes auteurs ont également calculé, que pour une machine de 8 m de long, le nuage de particules s'étendrait sur plus de 50 m (Oebius et al, 2001). Des mesures effectuées lors du projet DIETS sur les monts sous-marins au sud-est de l'île Marcus, à 2 200m de profondeur, ont pu montrer que les sédiments en suspension avaient resédimenté, sur une distance de 200 m au nord et à plus de 240 m au sud de la zone de remorquage dense, sur une épaisseur allant jusqu'à 0,18 mm (Brunn, 2011).

Parce que ces particules sont de formes irrégulières, de natures variées, de densités différentes, il est très difficile de modéliser leur comportement en suspension, leur vitesse de déplacement, la manière dont elles vont s'agréger et la manière dont elles vont resédimer.

Dans un article de 1995, Bluhm, Schriever et Thiel concluent déjà, dans le cadre de l'expérience DISCOL, qu'en raison des nuages de particules, les impacts de l'exploitation minière ne s'arrêtent probablement pas au seul site d'exploitation (Bluhm, Schriever and Thiel, 1995).

D'autres tests, réalisés dans l'Océan Indien pour évaluer l'existence d'impacts liés à la perturbation des sédiments ont montré que **la resuspension des sédiments conduisait à une augmentation et à un déplacement latéral des particules en suspension, à un mélange vertical des sédiments et à des changements dans les conditions sédimentologiques, biochimiques et géochimiques** (Sharma et al, 2005) **et que ces modifications de nombreux paramètres ainsi que de l'environnement adjacent pouvaient entraîner une réduction de la biomasse.**

Des informations supplémentaires sont apportées, entre autres par Parthiban (2000) qui a mesuré les flux de particules jusqu'à 7 m au-dessus du plancher océanique, toujours dans le cadre du projet INDEX. Cet auteur a étudié l'augmentation et la variabilité de ces flux pendant toute la durée de la perturbation et a conclu à l'influence des caractéristiques physico-chimiques des particules et de la courantologie locale sur le comportement des flux de particules et leur vitesse de resédimentation, confirmant ainsi, pour le bassin Indien Central, les données obtenues dans le bassin du Pérou.

¹⁷ Trace laissée dans le sédiment

Les particules en suspension se redéposeraient plus vite, par rapport au taux de sédimentation naturel des particules minérales et biogéniques transportées sur l'épaisseur de la colonne d'eau (Ohkubo et al, 2003). Cette resédimentation trop rapide aurait un impact négatif sur une faune ne présentant pas de capacités d'adaptation suffisantes ou de capacité de fuite. A titre d'exemple, dans la zone Clarion-Clipperton, le taux de sédimentation est de 1 cm par millénaire (AIFM, workshop 2002).

Valsangkar (2005) fournit aussi des données complémentaires à l'expérience de Parthiban : les particules restent en suspension sur une hauteur de 5 m au moins au-dessus du sol et elles diffusent en dehors de la zone perturbée, entre 2 et 20 km de distance du site perturbé selon les directions des courants. Valsangkar précise également dans son article qu'il n'a pas détecté, dans le bassin Indien Central, de forts courants (Valsangkar, 2005), contrairement à certains sites hydrothermaux des dorsales océaniques, ni de tempêtes benthiques.

L'étendue de l'impact dépendrait aussi, outre la taille du nuage et la granulométrie des particules, de la valeur nutritive du matériel remis en suspension (Jumars, 1981; Sharma, 2005).

Dans le cas des sulfures hydrothermaux, les avis apparaissent partagés et l'absence d'expérimentations réelles sur les impacts potentiels ne permet de formuler que des hypothèses. Une réduction des impacts liés aux panaches de sédiments par rapport aux exploitations des nodules est probable, du fait de la faible couverture sédimentaire sur le jeune plancher océanique où se produisent les circulations hydrothermales. Une couverture sédimentaire des dépôts de sulfures n'est pas exclue dans des régions où la production phytoplanctonique de surface est forte comme dans certaines mers semi-fermées (par exemple le bassin de Guaymas) mais les amas de sulfures ciblés par les activités minières sont ceux qui affleurent sur le plancher océanique. Il ne devrait donc pas y avoir d'excavation ni de déblaiement massifs des sédiments (Scott, 2001), réduisant de fait la resuspension de particules dont le volume pourrait être moins important (John et al, 2005 (Nautilus Minerals repris par Gena, 2013). Cependant, le procédé d'extraction du minerai passe par des opérations de terrassement (d'après Nautilus) et de fragmentation des roches sulfurées, ce qui risque fortement d'engendrer une quantité de particules dont l'importance reste à déterminer.

Les régions ciblées par l'exploitation ne sont pas les plus actives sur le plan volcanique puisque l'accumulation de sulfures minéraux suppose une activité hydrothermale stable, en contexte non-magmatique. Dans ce cas, il peut exister à proximité des sites actifs des accumulations de sédiments hydrothermaux. Ces sédiments hydrothermaux sont constitués de particules issues des panaches de cheminées hydrothermales ou de minéraux altérés d'anciennes cheminées actives (Müller et al, 2010). **Ils sont donc par nature plus riches en métaux lourds que les sédiments des plaines à nodules.**

De plus, les sulfures polymétalliques des sites de dépôts, cibles potentielles d'une exploitation minière, peuvent être proches de zones hydrothermales actives. De fait, certaines communautés hydrothermales endémiques pourraient être affectées par une augmentation des concentrations de particules en suspension liée au forage.

L'impact pourrait tout à fait être de même importance que celui envisagé dans le cas des nodules, concernant les sulfures polymétalliques. **Les organismes survivants à ces perturbations seraient également sujets à un changement radical des conditions d'habitat avec les substrats durs, remplacés par des particules molles provenant du panache issu de l'exploitation minière (Halfar and Fujita, 2007).**

Augmentation de la concentration de composés toxiques dans le milieu; modifications des

conditions physico-chimiques des masses d'eau environnantes

Quelle que soit la ressource exploitée, les technologies mises en œuvre risquent de favoriser un relargage plus ou moins important de métaux, dont certains métaux lourds, que ce soit dans l'eau au niveau du plancher océanique, dans la masse d'eau à la profondeur de l'émissaire de rejet de l'eau d'extraction, et potentiellement par voie accidentelle en cas de fuite ou de rupture de conduite. Dans le chapitre 3, l'analyse des technologies d'exploration et d'exploitation montre que :

- **Pour les nodules**, l'engin de dragage a une fonction de conditionnement immédiate par broyage, avant la remontée dans le flexible. Ce broyage pourra inévitablement engendrer la production de fines particules métalliques, provenant de l'abrasion des nodules. **Or dans les nodules (suivant leur composition, dans des proportions variables) se trouvent du plomb, de l'arsenic, du cuivre, de l'argent...**
- **Pour les encroûtements**, le **procédé de broyage** est également envisagé au niveau de l'engin de récupération du minerai. Parmi les autres possibilités technologiques envisageables, est notamment envisagée la **lixiviation *in situ***. **Or c'est un procédé qui fait intervenir classiquement des acides forts, très toxiques.** Si nous n'avons pu trouver d'informations plus précises, il apparaît cependant que des méthodes de biolixiviation sont également en cours de développement. Ainsi une intervention de Konishi, Saitoh et Ogi à l'International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering en 2009 présente un procédé de **biolixiviation** développé à partir de bactéries Fe(III)-réductrices, pour traiter les encroûtements et les nodules (Konishi et al, 2009). Cependant, même **dans ce cas de traitement plus respectueux de l'environnement, il demeure impossible de savoir exactement ce qui pourra être relargué lors de ce processus. De plus, introduire des espèces microbiennes non-indigènes ou transformer l'équilibre existant au sein de la communauté microbienne locale pourra avoir des conséquences importantes.** Les connaissances scientifiques actuelles restent insuffisantes pour permettre de les appréhender et de les prévoir.
- **Concernant les sulfures**, en se basant sur la technologie développée par Nautilus Minerals, les engins miniers se distinguent en tailleurs et en collecteurs. **Les sédiments hydrothermaux sont riches en métaux lourds (mercure, cadmium...) et en soufre. Les tailleurs, en aplanissant le terrain, en construisant des terrasses et en cassant les roches risquent de mettre en suspension une certaine quantité de particules sédimentaires contenant les éléments toxiques sus-cités.**

Koschinsky et coll. (2003) ont ainsi calculé les quantités de divers métaux relargués par jour dans le cas d'une **exploitation des nodules** du bassin du Pérou. D'après leurs calculs, les flux de métaux lourds ne devraient pas affecter les cycles globaux des métaux à l'échelle du compartiment océanique. Par contre, **le relargage des métaux est concentré sur une très petite zone.** Les animaux vivant dans ou sur les couches supérieures suboxiques du sédiment risquent donc de se retrouver dans des conditions pouvant mener à l'accumulation de certains métaux. **La concentration en oxygène de l'eau et le pH, notamment, jouent des rôles majeurs dans l'étendue de l'impact lié aux métaux** (pas uniquement les métaux lourds : même le manganèse, à forte concentration, devient neurotoxique), **suivant la forme principale réduite** (Koschinsky et al, 2003), **complexée** (Benjamin and Felmy, 1981)... **sous laquelle ils vont se retrouver.** Par exemple, pour des métaux comme le chrome ou l'arsenic (Nygren and Nilsson, 1993), plus la forme est réduite, plus l'ion est toxique. Pour le vanadium, c'est sa forme la plus oxydée (pentoxyde de vanadium) qui est la plus toxique

(Chaurand, 2006). Les dérivés alkylés du mercure (Martin-Lecuyer and Donard, 1997) ou du plomb (Garnier, 2005) sont fortement toxiques. Le cadmium est très toxique sous toutes ses formes (fiche toxicologique INRS <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/doc/fichetox.html?refINRS=FT%2060>).

Le risque est plus grand dans le cas des sulfures polymétalliques. En effet, ceux-ci sont chimiquement instables en présence d'oxygène, et leur dispersion sous forme de particules fines favorisera leur oxydation et la libération des métaux comme décrit dans un environnement hydrothermal naturel. Leur oxydation (chimique ou par l'intermédiaire de micro-organismes, cf. Chapitre 4) libèrera probablement les métaux constitutifs de ces sulfures (fer, cuivre, zinc) et ceux qui leur sont associés, représentant une source de toxicité supplémentaire. Ce phénomène a d'ailleurs été observé dans l'environnement naturel de la faune hydrothermale à proximité immédiate des sources (Sarradin et al, 2009), dans les eaux interstitielles des sédiments (Dunk et al, 2006) ou pour les panaches des cheminées hydrothermales (Sander and Koschinsky, 2011)

La question sera donc d'établir la distribution et la réactivité des particules émises par l'activité minière, compte-tenu des conditions naturelles. Si les molécules organiques capables de complexer les métaux ralentissent cette oxydation, ils peuvent aussi les stabiliser en suspension sous forme de colloïdes, favorisant leur transport avec les masses d'eaux (Bennett et al, 2008; Toner et al, 2009; Sander et al, 2007).

Comme en milieu aquatique terrestre, **la dissolution des sulfures et leur oxydation peut conduire à la consommation de l'oxygène de l'eau et une diminution du pH. Si les concepts et mécanismes géochimiques et biogéochimiques qui gouvernent ces processus sont connus, la quantification de ces effets en milieu marin nécessite d'en quantifier la dynamique au regard de l'oxygène apporté par mélange avec la masse d'eau.**

Rappelons que les outils de mesure pour réaliser ces études scientifiques permettant de mesurer de manière automatisée le pH, le CO₂, l'oxygène et certains éléments : fer (FeII/FeIII), soufre, sulfures... sont encore au stade de prototypes car il s'agit d'opérer à de très grandes profondeurs (par exemple, les analyseurs chimiques de fer et de sulfures, capables de faire des mesures à 6000 m de profondeur (Vuillemin et al, 2009) ou les sondes électrochimiques autonomes (Luther et al, 2008; Contreira et al, 2013)).

Les seuils de tolérance aux métaux des différents organismes d'environnements hydrothermaux actifs sont souvent supérieurs à ceux de leurs homologues côtiers. Cependant, les espèces périphériques des sites actifs ou les substrats non hydrothermaux associés aux encroûtements cobaltifères ou aux nodules sont nettement moins bien connues. **Deux conséquences possibles de l'exposition des organismes sont à considérer :**

- **l'extinction locale des espèces incapables de tolérer l'augmentation des concentrations d'éléments toxiques,**
- **ou l'accumulation de métaux lourds dans leurs tissus, avec un transfert potentiel dans le réseau trophique.**

Production de déchets et impacts sur la colonne d'eau

L'impact des processus miniers sur la colonne d'eau varie en fonction de plusieurs paramètres : le design du système minier utilisé, la composition et le volume de résidus, et la profondeur du déversement.

Plus que les impacts sur le site même de l'extraction du minerai à plusieurs milliers de mètres de profondeur, c'est le rejet des déchets qui risque d'avoir le plus de répercussions sur l'environnement (Thiel, 2003).

A titre d'exemple, les collectes de nodules nous ont appris que les procédés miniers généraient principalement trois types de « déchets » : des sédiments, de l'eau et des débris de minerai. En effet, les engins de dragage concassent les nodules sur place et font remonter à la surface les nodules mélangés aux sédiments et à de l'eau (Markussen, 1994). Il est raisonnable de penser que les systèmes miniers d'exploitation des encroûtements et des sulfures pourront avoir des impacts identiques, en raison de la similarité du mode d'exploitation, impliquant des systèmes de récupération semblables à ceux utilisés pour la récupération des nodules.

Si les études d'impacts précédemment citées ont duré moins longtemps que ce qui a été estimé pour les projets miniers, et ont concerné des zones bien plus petites avec beaucoup moins de déchets rejetés dans l'environnement (Sharma, 2011), les données récoltées ont cependant permis aux scientifiques de tenter d'extrapoler les quantités de déchets produits par de futures exploitations à taille réelle.

Cependant, concernant les volumes de sédiments remis en suspension, les experts ne sont pas tous du même avis. Ainsi Lenoble évalue à 25 000 m³/jour la quantité d'eau et 20 à 400 t/jour la quantité de sédiments emmenés à bord avec les nodules et devant être rejetés (Lenoble, 1992), alors que les experts de l'atelier de travail de l'AIFM en 2002 évaluent à environ 40 000 t/jour la quantité d'eau et 1 000 t/jour la quantité de sédiments ramenés avec les nodules jusqu'aux bateaux, dans le cadre d'une exploitation avec une production de 3 millions de tonnes de nodules par an (AIFM, workshop 2002).

De plus, si les nodules sont traités en mer, il existera une quantité importante de débris de nodules à éliminer. **Les principaux métaux intéressant les industries minières étant le cobalt, le cuivre et le nickel, qui ne représentent qu'une petite portion du nodule, les déchets pourraient alors représenter 80% du minerai remonté, soit 8 000 tonnes par jour,** avec les paramètres cités précédemment (AIFM, workshop 2002).

Enfin, en nécessitant environ 4 tonnes d'eau par tonne de nodules, soit 40 000 tonnes d'eau par jour pour une exploitation qui aurait une production annuelle de 3 millions de tonnes de nodules (AIFM, workshop 2002), le nettoyage et la compaction des nodules ainsi réalisés à bord des bateaux, produiront inévitablement de grands volumes d'eau sale supplémentaires qui devront être rejetés (ou traités avant rejet) sur le site d'exploitation.

Nautilus Minerals donne certaines précisions quant aux quantités de sédiments à rejeter dans le cas de l'exploitation des sulfures hydrothermaux. Dans le bassin de Manus, cette compagnie estime à 1 30 000 tonnes de sédiments meubles et à 115 000 tonnes de débris rocheux la quantité de débris déplacés dans les sites d'exploitations et/ou entreposés sur des sites adjacents (John et al, 2010, repris par Gena, 2013).

Ces déchets sont très certainement susceptibles d'impacter la colonne d'eau de différentes manières, selon la profondeur à laquelle ils seront déchargés, car elle est constituée de zones aux propriétés et aux rôles très différents. Les eaux de surface sont en effet considérées comme la zone de production primaire clé, qui supporte l'ensemble des

écosystèmes océaniques. Dans les eaux intermédiaires se déroulent d'autres interactions chimiques et biologiques. Les eaux abyssales, quant à elles, ont une chimie différente et la couche limite benthique est très dynamique (AIFM, workshop 2002).

Rejet en surface

Le déchargement des déchets peut avoir à la fois des impacts positifs sur certaines fonctions et négatifs sur d'autres, et les trois types de déchets (eau, sédiments et débris de minerai) vont avoir des influences plus ou moins importantes sur l'environnement.

Le **tableau 5-5** liste les principaux paramètres des eaux de surface influençables par les différents types de déchets. Il met surtout en évidence, non l'impact global sur ces paramètres, mais plutôt le degré d'influence de chaque type de déchet (nodule, eau, sédiment) sur chaque paramètre, lorsque cette estimation est possible.

Tableau 5-5 Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes à la surface (AIFM, workshop 2002).

Parameters	Components of the Discharge		
	Nodules	Water	Sediment
Particle flux	++	++	+++
Release of metals	++	++	++
Absorption of metals	++	++	++
DOM ¹			
Biogeochem changes	+	+	++
Temperature	-		
Turbidity	+	+	++
Light transmission			+++
Vertical transport	+	++	++
Lateral transport			+
Residence time			+
Nutrients	-	+	++
pH ²	-		
Bacterial activity			+
CO ₂	-		
Oxygen consumption			
Photosynthesis			
Dominance of diatoms	-		+

¹ Dissolved organic matter

² A term used to describe the hydrogen-ion activity of a system

Il manque à ce tableau une évaluation globale de l'impact. Par exemple, la consommation d'oxygène. S'il est difficile de relier cette consommation à un type de déchet (nodules, eau de fond ou sédiment), elle entraînera vraisemblablement un phénomène de réduction de l'oxygène disponible qui aura potentiellement des conséquences importantes pour le reste de l'écosystème.

Cette analyse des impacts n'est pas non plus complètement exhaustive. Par exemple, les migrations verticales du zooplancton et du necton seront également perturbées par le déchargement des déchets (Thiel, 2001).

Il est fort probable que ces types d'impacts se retrouvent également dans le cas des encroûtements cobaltifères, si la méthode du collecteur est adoptée.

L'influence de l'eau et des sédiments sur la nutrition et les paramètres physico-chimiques s'expliquent de la manière suivante. **L'eau de fond a des propriétés physico-chimiques très différentes de celles des eaux de la zone photique et il est question ici de volumes d'eau très importants déchargés localement.**

Les particules sédimentaires et métalliques peuvent perturber négativement la transmission de la lumière dans l'eau, et donc affecter la photosynthèse. Les données à ce sujet sont parfois contradictoires. Ainsi, un rapport de la FAO de 1984 (Matsumoto, 1984) rapporte que, suite à des essais menés pendant l'automne 1978 dans le Pacifique Nord oriental tropical, les scientifiques ont observé dans un premier temps une réduction de la productivité primaire due à l'atténuation de la lumière, puis ils ont constaté que la plupart des particules sédimentaires tombaient en quelques heures vers des eaux plus profondes (Chan et Anderson, 1981). Ils ont alors estimé que cet effet avait été temporaire et sans incidence sur la photosynthèse du phytoplancton et que les sédiments riches en nutriments pouvaient même apporter un léger apport en nitrates dans les premières minutes, pour décroître d'un facteur 10 au bout d'une heure. D'après les auteurs de cette étude, un apport si faible ne devrait pas créer de changement significatif dans la chaîne alimentaire, quand bien même il y aurait une douzaine de bateaux miniers sur place. Ils n'ont pas considéré non plus comme significatif les apports en métaux lourds (Matsumoto, 1984). Ozterich (1981) aboutit aux mêmes conclusions pour les tests menés dans la zone Clarion-Clipperton (projet DOMES) : l'apport en nutriments ne devrait pas générer une augmentation mesurable de l'abondance du phytoplancton et l'augmentation en métaux lourds ne devrait pas être suffisante pour diminuer sa croissance. Cependant, depuis les années 80, la technologie d'exploitation a évolué et les caractéristiques (quantité, composition) des déchets sont probablement différentes selon les types de machines utilisées. Les appareils de mesure, surtout, ayant également beaucoup évolué, la réalisation de cette même expérience réalisée avec les moyens scientifiques actuels donnerait probablement des résultats différents. Il faudrait revalider ces expériences. Cela nous oblige à garder, par prudence, une réserve vis-à-vis de ces résultats.

Par contre, pour Oebius, l'effet sur la productivité primaire ne devrait pas être si négligeable. D'après ses recherches bibliographiques, les particules fines (taille inférieure ou égale à 10µm, provenant du concassage des nodules et de leur abrasion pendant le transport) sont estimées à 1-2% de la masse des nodules. Cela représenterait 1,54 kg de matière rejeté par seconde pendant la durée de l'opération (Oebius et al, 2001).

L'importance de cette perturbation dépendra de la quantité de particules et débris rejetés dans l'eau, de leur degré de mélange, des taux de précipitation habituels dans la zone photique et des caractéristiques d'adaptation à la lumière du phytoplancton (AIFM, workshop 2002).

Plus récemment, l'expérience de Bharathi (Bharathi et al, 2005), dans le cadre de l'expérience de dispersion du sédiment (SEDEX), menée par l'Inde dans le bassin Indien Central, explicite les impacts du déchargement de déchets miniers sur la productivité primaire des eaux de surface. Dans cette expérience, l'eau et les sédiments, emmenés avec le minerai, ont été rejetés entre la surface et 50 m de profondeur. Les scientifiques ont relevé une augmentation du nombre de bactéries et des producteurs primaires ainsi que la migration du zooplancton. Ils en ont conclu que **les sédiments avaient eu un effet stimulant sur la diversité primaire et la production secondaire dans les eaux de surface.** Ces résultats sont confirmés par les travaux de Hyun, réalisés à partir d'échantillons d'eau et de boue dans le Pacifique Nord-Est équatorial, qui explique ces résultats en mettant en avant que les eaux de surface sur les 10 premiers mètres sont plutôt pauvres en nutriments, contrairement aux eaux profondes (Hyun,

2006). **Par contre, l'information temporelle reste manquante, ces publications n'indiquant pas la durée de ces effets.**

Ces modifications de la productivité primaire par apport brusque d'une grande quantité de nutriments, notamment du fer, font fortement penser aux expériences de fertilisation artificielle des eaux de surface. Bien que cela ne soit pas abordé par les études précédemment citées, **la fertilisation des eaux de surface pourrait avoir d'autres impacts, comme la formation de zones de minimum d'oxygène dans les zones plus profondes.** Le phénomène de fertilisation de l'océan par apport de fer est particulièrement étudié en tant que méthode de géo-ingénierie pour favoriser l'absorption par les océans du di oxyde de carbone de l'atmosphère (Joos et al, 1991; Watson et al, 2008), tout en favorisant la production primaire. Classiquement, il s'agit de fertilisation par addition de fer, plus rarement de phosphates ou, plus rarement encore, d'urée (Wallace et al, 2010). Des expérimentations à petite échelle et à court terme de fertilisation par addition de fer dans des régions déjà riches en nutriments ont pu montrer une augmentation importante des biomasses phytoplanctonique et bactérienne, ainsi qu'une diminution du CO₂ dans les eaux de surface (Wallace et al, 2010). Il y a cependant moins d'informations sur les zones plus pauvres ou sur les effets à long terme. Deux tests de fertilisation par addition de phosphates ont été réalisés à petite échelle en Méditerranée et au large du Nord-Ouest de l'Afrique. Les chercheurs ont constaté une augmentation rapide de la production bactérienne et de la biomasse du zooplancton, ainsi qu'une augmentation modérée des taux de fixation de l'azote. Toutefois, différentes expériences ont aussi mis en évidence des réponses biologiques et chimiques non prévues (cas de deux expériences de fertilisation par addition de fer sur le même site du Pacifique Nord-Ouest, (Wallace et al, 2010)) ou en Méditerranée, telles que la diminution des niveaux de chlorophylle après addition de phosphates en Méditerranée ou des différences importantes des communautés et de leurs biomasses respectives. De plus, les expérimentations (réalisées notamment dans l'Océan Austral) et les modèles développés remettent en cause l'efficacité de la technique et identifient des impacts conséquents : réduction de la productivité océanique à long terme, altération du réseau trophique, acidification de l'océan (Denman, 2008; Buesseler et al, 2008; Oschlies et al, 2010), développement d'algues productrices de toxines (Trick et al, 2010; Wallace et al, 2010), diminution de l'oxygène (Wallace et al, 2010)... **Il semble donc très difficile de prévoir les impacts environnementaux que pourrait avoir une fertilisation accidentelle autour des minéraliers. Cela dépendra très fortement de la durée de cette pollution, des caractéristiques initiales des eaux et du biome de surface.**

Le relargage d'éléments métalliques en lui-même a des effets plus difficilement identifiables, car ils dépendent des propriétés spécifiques de chaque métal. S'il est possible que le fer (quand il est limitant) favorise la production primaire, la limite de sa concentration maximale reste indéterminée.

Les sédiments et l'eau de fond contiennent également des métaux lourds : mercure, cadmium, arsenic... **Ces métaux lourds sont susceptibles d'entrer dans la chaîne alimentaire et d'être ensuite bio-amplifiés¹⁸, avec pour conséquence un impact très négatif sur l'environnement, l'alimentation et la santé humaine éventuellement (AIFM, workshop 2002).**

¹⁸ « Bio-amplifier : Augmentation à chaque niveau trophique [de la chaîne alimentaire] des concentrations des substances chimiques concentrées dans des tissus (par exemple, les concentrations relatives à la substance sont plus élevées dans les organismes que dans leur source d'alimentation). » <http://www.greenfacts.org/fr/glossaire/abc/bioamplification.htm>

Cet effet négatif pourrait cependant être limité, grâce à la présence d'oxydes de fer et de manganèse (AIFM, workshop 2002). Ils pourraient potentiellement empêcher l'intégration de métaux lourds dans le réseau trophique en favorisant leur immobilisation. **A contrario, l'augmentation de leur concentration dans les sédiments aurait un impact plus important sur les écosystèmes benthiques non adaptés.**

Les **modifications de pH et d'oxygène** n'ont pas été reportées dans le tableau 5-5. Elles existent pourtant. Selon les endroits, l'eau de fond est riche en oxygène dissous. Ces variations de pH et d'oxygène risquent fortement d'entraîner des changements dans la spéciation des métaux (Oebius et al, 2001).

Enfin, dans le tableau 5-5, l'influence sur la température n'apparaît pas. **L'eau de fond est pourtant beaucoup plus froide que les eaux de surface.** La température normale de l'eau de fond se situe entre 1 et 4°C. Dans certains cas, les processus de déshydratation des nodules et de pompage peuvent faire remonter sa température à 7-10°C, mais cela reste très inférieur à la température des eaux de surface. **Le rejet de l'eau de fond en surface pourrait créer un choc thermique. C'est afin d'éviter ce choc thermique que des recommandations ont été faites pour que les eaux sales soient rejetées à au moins 1 000m de profondeur** (Markussen, 1994).

Les eaux intermédiaires

Des recommandations ont été faites au cours de la dernière décennie pour que les déchets soient rejetés entre quelques centaines de mètres et un peu plus de 1000m de profondeur. Il semble toutefois que certains industriels hésitent à suivre ces recommandations. Des résultats, présentés par un industriel au séminaire Underwater Minings Institute 2013, lors d'une expérience de simulation des impacts environnementaux dans le cadre de l'exploitation à grande profondeur, ont permis d'envisager 3 scénarii : rejet des débris à 200 m de profondeur, à 200 m au-dessus du plancher océanique et horizontalement au niveau du fond marin. Le scénario de rejet des débris à 200 m de profondeur a été présenté comme leur scénario de référence. Les données sur la durée et l'étendue de la dispersion des particules fine et leur taux de sédimentation auraient été jugées comme très intéressantes mais les conditions de courantologie et les paramètres physico-chimiques intégrés à leur modèle de simulation ne peuvent pas être validés.

Selon les endroits, les eaux, entre 200 et 1 200 m de profondeur, sont particulièrement pauvres en oxygène (c'est le cas dans le Pacifique, mais pas dans l'Atlantique, par exemple). Il y a donc moins de risques que les ions métalliques puissent former des particules plus toxiques que leur forme libre et l'absorption des métaux dans les organismes apparaît limitée.

Tableau 5-6 Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes des eaux intermédiaires (AIFM, workshop 2002).

Parameters	Components of the Discharge		
	Nodules	Water	Sediment
Particle flux			++
Release of metals			+
Adsorption of metals	-	-	-
DOM ¹	-		+
Biogeochem changes			+
Temperature	-		
Turbidity			+
Light transmission	-	-	-
Vertical transport		+	
Lateral transport			
Residence time			
Nutrients			
pH ²			
Bacterial activity			
CO ₂			
Oxygen consumption			
Photosynthesis			
Dominance of diatoms			

¹ Dissolved organic matter

² A term used to describe the hydrogen-ion activity of a system

A 200 m de profondeur, la lumière pénètre encore mais elle n'est généralement pas suffisante pour permettre la photosynthèse.

Par contre, diverses espèces de poissons (thonidés, etc....) et de céphalopodes (calmar *Dosidicus gigas*, par exemple) évoluent dans la zone mésopélagique. Ces animaux seront sensibles aux nuages de particules sédimentaires. Ceux qui se nourrissent de zooplancton par exemple, risquent de voir leurs ressources alimentaires diluées. Ils pourront être gênés par les changements brusques des conditions chimiques de leur environnement et pourraient être affectés par l'exposition soudaine à des taux de métaux lourds inhabituels.

Une constatation s'impose : les impacts de rejets des déchets sous la zone photique sont peu documentés dans la littérature scientifique et nécessitent un effort d'acquisition de connaissances.

Le bas de la colonne d'eau

Tableau 5-7 Impacts des rejets liés à l'exploitation des nodules sur les écosystèmes benthiques (AIFM, workshop 2002).

Parameters	Components of the Discharge		
	Nodules	Water	Sediment
Particle flux			++
Release of metals			+
Adsorption of metals	-	-	-
DOM ¹	-		+
Biogeochem changes			+
Temperature	-		
Turbidity			+
Light transmission	-	-	-
Vertical transport		+	
Lateral transport			
Residence time			
Nutrients			
pH ²			
Bacterial activity			
CO ₂			
Oxygen consumption			
Photosynthesis			
Dominance of diatoms			

¹ Dissolved organic matter

² A term used to describe the hydrogen-ion activity of a system

Dans le cas du rejet des déchets au niveau du plancher océanique, plusieurs impacts à long terme sont à craindre car les déversements pourraient affecter l'ensemble de la colonne d'eau. **Concernant les animaux non benthiques mais évoluant juste au-dessus du sol, la destruction des espèces benthiques (bactéries, méiofaune comme mégafaune) réduira fortement les réserves potentielles de nourriture** (Thiel, 2001).

Parce que le déversement des déchets est susceptible de causer une mortalité du zooplancton dans les eaux du milieu et du bas de la colonne d'eau, il existe une probabilité non nulle pour que les poissons méso- et bathypélagiques soient impactés, en raison des effets sur leurs proies potentielles, et que les mammifères marins le soient également (Chung, 2002).

Nous avons évoqué précédemment pour les eaux de surface le risque d'un **choc thermique** entre les eaux de fond froides et les eaux de surface ayant une température plus élevée. Le même questionnement se pose également ici : nous avons vu que les eaux de fond, normalement à 1-4°C, pourraient voir leur température s'élever jusqu'à 7-10°C pendant la remontée du minerai. Dans ce cas, si elles sont renvoyées au fond de l'océan, auront-elles suffisamment refroidi ou seront-elles encore trop chaudes pour les espèces profondes ? **Les coraux, par exemple, sont en effet particulièrement sensibles aux variations de température. S'ils peuvent généralement s'adapter avec le temps, l'expérience montre qu'ils supportent mal les « brusques » changements de température.**

Le risque que le réseau trophique soit contaminé par les métaux lourds s'accroît également (Chung, 2002).

L'AIFM se réfère à l'exploitation des nodules polymétalliques, mais **ce risque pourrait être encore plus conséquent dans le cas des sulfures polymétalliques et des boues métallifères, dont l'environnement est déjà naturellement riche en métaux lourds.**

Suite à l'augmentation de la productivité, les cycles de l'oxygène et du carbone seront également modifiés (AIFM, workshop 2002).

Le rejet d'eau sale dans l'écosystème doit impérativement être éliminé, et une des solutions pourrait être appliquée en équipant le navire collecteur de bacs de décantation.

Si des rejets dans les eaux intermédiaires ont été recommandés dans le cas des nodules, les recommandations pour les sulfures proposeraient plutôt que les déchets soient rejetés directement près du sol grâce à des pipelines, afin d'éviter les répercussions sur la colonne d'eau (Scott, 2001; Brunn, 2011).

Si Scott ne prévoit pas de conséquences particulières à ce que les sédiments soient redéposés directement au fond, la question se pose néanmoins de savoir si cela ne va pas plutôt aggraver la mortalité à court terme de la faune benthique sur le site. Pareillement, si certains auteurs affirment que la quantité d'éléments toxiques tels que le mercure, l'arsenic, l'antimoine, le sélénium, etc., relargués dans la colonne d'eau, reste négligeable pour la faune, par rapport aux quantités de métaux lourds recrachés par les cheminées hydrothermales voisines (Scott, 2001), il serait tout de même nécessaire de pouvoir mener des expériences validant ou infirmant définitivement cette hypothèse.

Autres impacts possibles sur la colonne d'eau

Notons bien que ce point dépasse le domaine de l'expertise, considérant qu'il n'y a pas que l'eau profonde à prendre en compte. Comme le rappellent certains industriels, l'eau potable sur les bateaux-support de production peut être produite grâce à des stations de dessalement par osmose inverse, d'une capacité de 35 kL/jour, ce qui conduit à la production de 82 kL/jour de saumure. Cette saumure est ensuite rejetée à la mer. La salinité de cette saumure représente le double de celle de l'eau de mer, mais certains pensent que cela n'aura pas d'impact matériel. **Cette hypothèse nécessiterait une confirmation expérimentale. Par contre, les prétraitements requis pour les stations de dessalement, tels que la chlorination, la bromination, la déchloration, la coagulation et la filtration pourraient conduire à des flux de déchets qui nécessitent inévitablement un traitement avant d'être jetés** (John et al 2010, repris par Gena, 2013).

Certains auteurs, comme Markussen (1994), signalent également que les procédés de traitement "offshore" du minerai, produisent de l'eau polluée, des résidus, etc., posant les mêmes questions d'impact environnemental en surface que pour les mines terrestres. En effet, l'extraction du métal à partir des nodules comprend un certain nombre de procédés d'hydrométallurgie et de pyrométallurgie, au cours desquels sont utilisés des produits chimiques. La pyrométallurgie produit également beaucoup de gaz relativement toxiques : dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, soufre d'hydrogène, monoxyde de carbone, qui auront potentiellement des effets sur la qualité de l'air. Se pose également le problème des déchets produits par les autres opérations de métallurgie : scories, résidus, eau polluée...

Par contre, il ne semble pas y avoir de tels processus prévus, *a priori*, pour les sulfures.

Une autre interrogation reste ouverte et concerne les effets des câbles et systèmes de forage sur la circulation des espèces tout le long de la colonne d'eau. Si aucune étude

quantitative ne semble s'être consacrée à ce problème, l'étude des impacts locaux reste cependant d'intérêt.

Demeure enfin le point, non testé, relatif au fait que l'utilisation d'engins et du matériel connexe sont susceptibles d'introduire sur les zones d'exploitation des espèces non indigènes. Sur toute la largeur des zones d'exploitation, est-il possible que l'usage de ces systèmes puisse entraîner la colonisation de nouvelles localisations par des espèces invasives (qu'il s'agisse de virus, bactéries ou d'autres organismes multicellulaires opportunistes) ?

Impact sur le cycle du carbone

Une étude de Nath et coll., parue en mai 2012, apporte des informations sur les effets de l'exploitation des nodules sur les flux de carbone. Contrairement à la **réduction de la quantité de carbone organique observée dans les sédiments du Pacifique après la perturbation, la quantité de carbone organique a augmenté dans les sédiments de l'océan Indien, après la perturbation.** Cependant, la proportion de carbone organique labile, qui a une valeur nutritive pour la faune, elle, a bien subi une réduction, suite à la perturbation du sédiment. De plus, bien que l'aire de la zone perturbée soit réduite, l'augmentation du carbone organique semble avoir entraîné une réduction des conditions d'oxygénation de l'eau de fond. Considérant le volume total de sédiment déplacé, environ un quart de tonne de carbone organique en moyenne a dû être remis en suspension chaque jour. **La perturbation répétée pendant une activité minière commerciale (au moins plusieurs années) augmenterait considérablement le "turn-over" du carbone des sédiments et risquerait de créer une grande demande en oxygène et autres oxydants dans la colonne d'eau. Les flux d'enfouissement du carbone organique et les taux d'accumulation seraient plus grands après la perturbation du sédiment. Cet enfouissement du carbone organique pendant les périodes où l'eau de fond est faiblement oxygénée, augmenterait le taux de régénération du phosphore et pourrait entraîner un effet positif sur la productivité marine si ce phosphore est transporté en surface.** Cependant les échanges entre eaux de surface et eaux de fond sont généralement limités, sauf dans les cas particuliers d'« upwelling » côtiers ou de monts sous-marins.

L'étude de Nath et coll. ne s'intéresse qu'à la relation entre les cycles du carbone et du phosphore, dans le cadre d'une exploitation des nodules. Toutefois, elle attire également l'attention sur le fait que, dans le cas d'une exploitation des sulfures hydrothermaux, **des effets nocifs sur les espèces profondes sont également prédictibles, notamment par la remobilisation des sulfures, et des métaux lourds qui leur sont associés.**

Une réduction drastique du macrobenthos a pu être notée après la perturbation. Les individus impactés pourraient contribuer à une augmentation temporaire des espèces nécrophages donnant un avantage particulier à certains groupes d'animaux dont la prolifération pourrait ensuite conduire à des déséquilibres provisoires de l'écosystème benthique.

Pollution électromagnétique

Les recherches menées sur les énergies renouvelables marines nous indiquent un point de vigilance supplémentaire. Dans ces structures, l'électricité produite est acheminée par des réseaux de câbles et ces câbles émettent des champs électromagnétiques basse-fréquence (EMF). Rappelons que les auteurs du chapitre 3 sur les technologies précisent que les engins de dragage sont alimentés par électricité et qu'il y a des pompes centrifuges à différents endroits du « riser » pour permettre la remontée du minerai, par exemple.

Le couplage de ces champs magnétiques aux mouvements de l'eau et des organismes crée alors des champs électriques localisés dans l'environnement. Nous savons que, dans le cas des communautés côtières, certains animaux sont capables de ressentir les champs électromagnétiques et/ou électriques (notamment, les espèces migrant à large échelle ou qui utilisent les gisements géomagnétiques naturels pour s'orienter) (Boehlert and Gill, 2010). **Les chondrichthyens (requins, raies, chimères), les mammifères marins, les chéloniens, les poissons migrateurs ou encore les crustacés sont capables de percevoir les champs électriques, ce qui leur permet soit de chasser, soit de localiser leurs congénères** (Gill, 2005 citant Wiltchko et Wiltchko, 1995 ainsi que les travaux de Kalmijn en 1971 et 1978; Cain et al, 2005 citant les travaux de Kalmijn en 1971 et 1978 ainsi que les travaux de Lohman de 1991 à 2004; Boehlert and Gill, 2010). Les requins et les raies benthiques réagissent aux EMFs émis par les câbles sous-marins et ceux des parcs éoliens marins (Boehlert and Gill, 2010). **Gill a émis l'hypothèse que ces espèces avaient probablement des comportements d'attraction ou d'évitement.** En effet, certaines études ont montré que les Elasmobranches étaient attirés par des champs de courant continu entre 0,005 et 1 μ V/cm (car cela correspond aux champs émis par leurs proies), mais qu'ils évitaient des champs de courant continu supérieurs ou égaux à 10 μ V/cm (Gill, 2005). **Quant aux espèces migratrices, leur migration pourrait être altérée, temporairement ou à plus long terme** (Gill, 2005).

Un rapport de synthèse sur les effets des champs de courant continu sur les Elasmobranches et les autres espèces marines est paru en 2011 (Normandeau, Tricas et Gill, 2011).

Ainsi, les câbles nécessaires dans la mise en place des structures minières pourraient constituer une pollution électromagnétique, et peut-être aussi entraîner une augmentation locale de la température comme certaines hypothèses le suggèrent, malgré l'absence de validation par des expériences *in situ*.

Là encore, l'état des connaissances est insuffisant pour proposer une estimation de l'intensité et de l'extension de cette pollution ainsi que ses conséquences sur le comportement des animaux.

Vibrations

Dans l'eau, le son se propage 4 à 5 fois plus vite que dans l'air. La vitesse est en moyenne de 1 500 m/s. Dans l'océan, le son se propage sur des dizaines voire des centaines de kilomètres (Maggiani, 2005).

La vitesse de propagation du son augmente :

- avec la salinité,
- lorsque que des courants créent des canaux de propagation des sons,
- avec la chaleur dans les eaux peu profondes.

Dans le cas, des eaux profondes, elle varie aussi en fonction de la pression.

En milieu marin profond, les machines sont des sources de bruit et de vibrations (pompes, propulseurs, déplacement, raclement des encroûtements cobaltifères, fragmentation de la roche dans le cas d'une exploitation des sulfures...). Si les champs

de nodules se caractérisent par des densités de population (méga-faune) relativement réduites (poissons, céphalopodes, crustacés parmi les espèces susceptibles d'être affectées), les dorsales et les monts sous-marins sont beaucoup plus fréquentés. S'y trouvent, entre autres, des espèces emblématiques telles que les baleines, les dauphins ou les requins.

Les cétacés se basent sur l'acoustique pour communiquer, chasser, pour leurs parades de reproduction)... Ils sont donc particulièrement vulnérables face à la pollution sonore.

Dans la littérature scientifique, ainsi que dans la littérature grise, nous n'avons pas trouvé quelles pouvaient être les fréquences des différentes vibrations produites par les engins miniers sous-marins. Aussi avons-nous choisi de décrire les impacts possibles, au cas où les fréquences des vibrations des engins miniers recouperaient les fréquences utilisées par les cétacés.

Généralement, les dauphins communiquent à des fréquences supérieures à 100 Hz. Les clics d'écholocalisation sont émis dans une gamme de fréquence de 10 à 100 kHz, ce qui correspond à leur optimum auditif. Les sifflements, eux, sont émis dans une gamme de fréquence de 4 à 16 kHz. Ils n'entendent pas les fréquences inférieures à 500 Hz (Lurton and Antoine, 2007).

Les baleines, par contre, communiquent à des fréquences entre 12 Hz et 8 kHz.

Des mesures précises, faites chez les baleines du canyon Gully ont démontré que les baleines à bec communes, vivant entre 500 et 1500 m de profondeur dans ce canyon, pouvaient communiquer sur une distance de 300 m, par des cliquetis d'une fréquence maximale de 22 kHz (avec une moyenne de 11 kHz) (Hooker and Whitehead, 2002).

On a pu constater, pour des fréquences audibles par ces espèces, (baleine franche, baleine grise, rorqual à bosse), des comportements d'évitement à plusieurs kilomètres de distance, lorsque le niveau de bruit perçu allait de 160 à 170 décibels (Lurton and Antoine, 2007).

Lurton et Antoine signalent que les mammifères marins ont une gamme d'audition fonctionnelle qui va de 10 Hz à 200 kHz, avec les seuils les plus sensibles autour de 40 dB re 1 μ Pa (Lurton and Antoine, 2007).

Parmi ces espèces, les baleines à bec, celles qui descendent le plus profondément, sont les plus sensibles au son (Lurton and Antoine, 2007; Aguilar Soto et al, 2006). **La pollution sonore perturbe leur communication mais il semblerait qu'elle puisse également avoir d'autres effets plus graves. Si aucune preuve irréfutable n'est apportée, certaines hypothèses impliquent que l'énergie des ondes sonores provoque par résonance un brusque dégazage dans les tissus, ou que le bruit, paniquant les animaux, les rendent victimes d'accidents de décompression (Lurton and Antoine, 2007).**

L'émission de vibrations peut également avoir des effets sur la méga-faune. En effet, grâce aux récepteurs de la ligne latérale (cas des dauphins, requins, poissons) ou des filaments vélaires (cas des céphalopodes), les animaux marins perçoivent les vibrations créées par les autres animaux à plusieurs mètres de distance. Cette capacité sert à détecter des proies potentielles ou, à l'inverse, des prédateurs en approche. **Il est probable que les vibrations émises par les machines induisent un comportement de fuite temporaire de la méga-faune.**

S'il n'y a pas eu d'études faites précisément sur l'impact que peut avoir le bruit généré par les différents engins miniers sous-marins, on sait cependant qu'**à la surface, les générateurs d'électricité des bateaux et les systèmes de positionnement dynamique des propulseurs sont aussi des sources de bruit.** Or la pollution sonore générée par les bateaux se situe sur la gamme de 0,1 à 10kHz. Elle s'ajoute donc au fond sonore naturel de l'océan. **Ce bruit pourrait alors provoquer chez certains animaux des pertes de sensibilité auditive partielles ou permanentes et avoir des effets sur son comportement : stress, isolement d'un individu par rapport au groupe, masquage du son, entraînant des problèmes de communication ou d'usage du système d'écholocation** (Maggiani, 2005), **endommagement des organes internes** (Maggiani, 2005; Talpalar and Grossman, 2005)... Les hélices des bateaux tendent également à générer des fréquences qui perturbent les petits cétacés (Maggiani, 2005). **La présence des bateaux-support des minéraliers peut donc être, en elle-même, considérée comme une autre source de vibrations, venues de la surface mais qui peuvent atteindre et perturber les espèces évoluant en eau plus profonde.**

Certaines études soupçonnent également que le bruit généré par le trafic maritime peut affecter les capacités de communication à grandes distances des baleines, mais cela n'a pas été formellement démontré (Lurton and Antoine, 2007).

Si les mammifères marins ont été les plus étudiés, certains articles de la littérature grise mentionnent l'attention portée à d'autres espèces marines. En Papouasie Nouvelle-Guinée, la tortue-luth, espèce protégée, pouvant plonger à plus de 1230 m (fiche ADW consultée en 2013 http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Dermochelys_coriacea/) pourrait être relativement sensible aux sources de vibrations (Nautilus Minerals Niugini Limited, 2008).

Autres impacts possibles

L'accroissement du trafic maritime augmente les risques de collision entre navires et grands cétacés, notamment sur les trajectoires de migration. Or un certain nombre des régions possédant des ressources minérales (îles Canaries, Nouvelle-Calédonie, dorsale médio-atlantique...) sont des zones fréquentées par les cétacés.

Accidents possibles

On retrouve les accidents communs à tous les transports maritimes.

- **Fuites accidentelles,**
- **Déversements de carburant pendant les transferts du site aux bateaux de soutien,**
- **Déversements de minerai pendant les transferts aux barges et aux vraquiers/minéraliers,**
- **Dysfonctionnements d'équipement non prévus pouvant aboutir à des pertes de matériel dans le « riser » de remontée et dans le système de pompage.**
- **Oxydation du métal entrant dans la construction des différents véhicules sous-marins et du système de pompage...**
- **Collisions, échouage, avaries aboutissant à des naufrages.**

Il n'existe pas d'étude ou d'expérience scientifique traitant en particulier des accidents possibles mais les différents groupes de réflexion travaillant à identifier les dangers liés à l'exploitation minière sous-marine s'accordent à en tenir compte.

Le choix d'un transfert par conduite minimise les effets dans la colonne d'eau, sauf en cas de rupture accidentelle. Dans un tel cas, seul le contenu immédiat de la conduite serait déversé, ce qui peut représenter tout de même 1 000 m³ d'un mélange d'eau et de nodules, soit près de 200 tonnes de nodules.

Du fait de la nature du matériau, les problèmes rencontrés resteraient de moindre ampleur que ceux connus relatifs au transport des hydrocarbures ou de produits chimiques toxiques.

L'entretien des navires et des équipements, ainsi que l'entraînement des équipages, notamment apparaissent indispensables.

Ces accidents possibles sont également autant de sources de pollution potentielles, risquant d'impacter la colonne d'eau ou la faune benthique. Notons que dans le cas particulier d'un naufrage, les carcasses pourraient constituer de nouveaux habitats, comme cela a déjà été constaté avec des bateaux naufragés ou des carcasses de grands cétacés.

Conclusion

Markussen (1994) résume la plupart des impacts liés à l'exploitation minière des nodules dans le tableau 5-8 ci-dessous.

Tableau 5-8 Conséquences environnementales des différentes phases de l'exploitation minière dans les grands fonds (Markussen, 1994).

Impact	Impacted area	Duration	Near-field or far-field	Recovery	Significance
Physical impact to seabed material	Seabed	Long-term	Near-field	Slow	High
Mechanical damage at track edges	Seabed	Long-term	Near-field	Slow	Moderate
SPM from propulsion system	Water column	Short-term	Near-field	Slow	Moderate
SPM from mineral inlet	Water column	Short-term	Near-field	Slow	Moderate
Accumulated plume effect	Water column	Long-term	Near-field	Slow	High
Re-sedimentation	Seabed	Long-term	Near-and far-field	Slow	High
Nutrition hindrance	Seabed	Long-term	Near-field	Slow	Low
Pump motors	Water column	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Thrusters	Water column	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Expelling fish and marine mammals	Water column	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Temperature decrease	Surface layer	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Light reduction	Surface layer	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Increase in particulate matter	Surface layer	Short-term	Near-field	Rapid	Moderate
Light intensity and quality reduction	Surface layer	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Increase in trace-metal concentration	Surface layer	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Exhaust	Surface layer, air	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Noise	Air	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Interference with commercial fishery	Water column	Short-term	Near-field	Rapid	Low
Collision	Surface	Short-term	Near-field	Rapid	Very low
Loss of mining ship	Seabed	Long-term	Near-field	Slow	Very low
Loss of subsea system	Seabed	Long-term	Near-field	Slow	Very low

Notes: Duration: *Short-term*: disturbance on a short-time scale, in the order of weeks; *Long-term*: disturbance over a longer period of time, in the order of years. Recovery: *Rapid*: impacted environment will recover within months; *Slow*: environment will recover more slowly, with recovery to normal state taking years. Significance: *Low*: not considered to cause any severe disturbance to the environment; *Moderate*: considered to cause a noticeable effect on the environment, but no major problem to the community in the environment in question; *High*: considered to cause severe harm to the environment, further studies needed prior to full-scale commercial mining.

Source: Berge, Stig, Jan Magne Markussen, and Gudmund Vigenst (1991). *Environmental Consequences of Deep Seabed Mining—Problem Areas and Regulations* (The Fjord/Nansen Institute, Oslo).

De la même manière, le tableau 5-9 suivant résume les impacts environnementaux prévisibles concernant l'exploitation des sulfures polymétalliques.

Tableau 5-9 Résumé des impacts potentiels de l'exploitation minière des dépôts de sulfures massifs sur l'environnement biologique à Solwara 1, Papouasie Nouvelle-Guinée (Boschen et al, 2013).

Environment	Impact	Scale
Benthic	Change in seafloor surface structure from habitat removal	Site, short duration – prolonged
	Smothering of organisms by sediment plume generation from seafloor mining tool activity	Site, short duration
	Change in species diversity from organism loss	Site, short duration – prolonged
	Smothering of organisms from loss of material from riser transfer pipe	Site, short duration
	Loss of adjacent communities by changed hydrothermal activity	Site, short duration – prolonged
	Smothering effects of plumes discharged at depth from dewatering	Local, short duration
	Reduced water quality from hydraulic leak	Site, short duration
Bathypelagic	Toxic effects on benthic organisms from loss of material from riser transfer pipe	Site, short duration
	Toxic effects of plumes discharged at depth from dewatering	Local, short duration – prolonged
	Loss of organisms attracted to suction area by SMT lights	Site, short duration
Bathypelagic, mesopelagic, epipelagic	Reduction of bioluminescence by plume generation	Local, short duration
	Toxic effects on pelagic biota, including bioaccumulation from release of metals into water column	Local – regional, short duration
Epipelagic	Disturbance of cetaceans by noise from mining and vessel equipment	Local – regional, short duration
	Nutrient increase and increased productivity from discharge of macerated waste and treated sewage	Site, short duration
	Toxic effects from spillage of ore or hazardous material from the mining surface vessel	Site, short duration
	Death of indigenous fauna resulting from exotic species introduction via ballast water and hulls	Regional, prolonged

Classification des environnements : benthique (plancher océanique); bathypélagique (colonne d'eau >1 000 m); mésopélagique (colonne d'eau 200-1000 m); épipélagique (colonne d'eau <200 m).

Echelle spatiale : site (<1 km de la localisation du projet minier); locale (1-10 km); régionale (>10 km). Echelle temporelle : courte durée (<1 an, généralement pour la durée du projet); prolongée (>1 an après la fin du projet).

Les données collectées sont toujours spécifiques aux sites de collecte (Sharma en 2011). Aussi, il apparaît indispensable de refaire à chaque fois, et pour chaque site d'exploitation, les analyses des paramètres environnementaux et la caractérisation de la faune locale, bien que cela soit coûteux financièrement, et consommateur en temps.

On estime nécessaire des périodes de 5 à 10 ans minimum pour évaluer l'influence des conditions atmosphériques (vents, pluies, cyclones) sur les conditions d'exploitation pendant les différentes saisons, et à au moins 1 à 2 ans le temps nécessaire pour connaître les conditions hydrographiques (vagues, courants, température, pression), cartographier les caractéristiques du plancher océanique, échantillonner les nodules, étudier les caractéristiques des sédiments et photographier les affleurements rocheux et les conditions environnementales associées (Sharma, 2011).

Cette réflexion, menée sur l'étude des impacts liés à l'exploitation des nodules est valable pour toutes les exploitations de ressources minérales.

5.2.3. Adaptabilité et résilience

La faune abyssale est caractérisée par une grande diversité, une faible densité, une petite taille, un métabolisme bas, une grande longévité, de longues périodes de maturation, un faible potentiel de reproduction et de petits taux de colonisation. Sa capacité d'adaptation est donc limitée.

La faune des sites hydrothermaux et des monts sous-marins se caractérise généralement par un très fort endémisme et de fortes densités de population, exception faite des sites inactifs. La résilience des écosystèmes des monts sous-marins est également limitée. **Dans le cas des sites hydrothermaux, ce sont les sites inactifs principalement et certains sites actifs particuliers (bassin de Manus) qui sont associés aux amas de sulfures polymétalliques exploitables. Leurs capacités de restauration vont dépendre du lieu, de sa topographie, de sa profondeur, de l'activité hydrothermale, de l'échelle, des types d'espèces...** Il est difficile d'extrapoler des scénarios de restauration généraux.

5.2.3.1. Adaptabilité des espèces et des communautés

La zone Clarion-Clipperton est une des régions à ressources minérales les plus étudiées. Les différentes observations scientifiques laissent à penser que la macrofaune est particulièrement vulnérable en cas d'enfouissement sous les sédiments. **Dans cette zone particulièrement stable, les taux de sédimentation sont très lents, ainsi que les phénomènes de bioturbation. La macrofaune est composée d'animaux petits et fragiles.** Les polychètes, par exemple, sont une espèce typique; certains ont 3 mm de long, vivent dans les sédiments et se nourrissent à la surface du sol grâce à de longs appendices. Ce mode de nutrition contribue à leur fragilité, de par leur incapacité à s'enfouir dans les sédiments. **Les détritivores, d'une manière générale, se nourrissent grâce à des tentacules, souvent couverts de mucus et ciliés pour collecter les petites particules et les amener à leur bouche. Ils se nourrissent de la fine couche de matière organique fraîchement tombée. Or, durant la phase de redéposition des particules sédimentaires, cette couche de matière organique est diluée, voire enterrée et les détritivores sont dans l'incapacité de se nourrir.** (AIFM, workshop 2002).

Métabolisme des métaux lourds et écotoxicologie chez les espèces profondes

Il y a eu relativement peu d'études en toxicologie menées sur les organismes marins profonds concernant les métaux lourds et autres éléments toxiques (moins de 200 articles référencés dans Web of Science).

D'après Koschinsky et coll. (2003), la faune des champs de nodules est bien adaptée à des taux élevés de métaux lourds et la seule resuspension de particules riches en métaux lourds ne devrait pas causer des effets toxiques trop sévères. Par contre, une augmentation des concentrations en métaux dissous par libération de l'eau interstitielle et la mobilisation éventuelle de fractions de métaux lourds liés à des particules facilement solubles représentent un danger plus grand. Il y avait en 2003 et il y a toujours trop peu de données sur le stockage et le métabolisme de détoxification des métaux lourds chez les espèces benthiques profondes pour pouvoir prévoir les conséquences écologiques de l'augmentation de la concentration en métaux lourds.

Plus de données sont disponibles sur la faune des sites hydrothermaux actifs. Divers mécanismes d'adaptation aux métaux lourds ont notamment été découverts chez des espèces-

clés (moules, crevettes, crabes) : symbiose avec des bactéries thiotrophes et méthanotrophes dans les branchies ou sur le corps, métallothionéines (protéines ayant une forte affinité pour les cations métalliques) (Martins et al, 2011), enzymes anti-oxydantes (Marie et al, 2006; Company et al, 2007), immobilisation et précipitation des métaux sous forme insoluble (Rousse et al, 1998). L'influence de la température sur l'accumulation des éléments toxiques dans les organismes a également été étudiée par quelques équipes (Martins et al 2011; Crespo-Medina et al, 2009).

Smith et Flegal (1989) ont mesuré 40 éléments (argent, aluminium, arsenic, or, baryum, brome, cadmium, calcium, cerium, chlore, cobalt, chrome, dysprosium, europium, fer, hafnium, mercure, iode, potassium, lanthane, lutécium, magnésium, manganèse, molybdène, sodium, nickel, praséodyme, rubidium, antimoine, scandium, sélénium, samarium, strontium, tantale, terbium, uranium, vanadium, ytterbium, zinc, zirconium) dans les tissus et les corps entiers de six moules *Bathymodiolus thermophilus* et de quatorze escargots *Neomphalus fretteae*, collectés au niveau de sources hydrothermales du rift des Galápagos en 1977. Les auteurs ont relevés que les concentrations de ces métaux chez les espèces hydrothermales étaient similaires ou légèrement supérieures aux concentrations mesurées chez des espèces intertidales, indiquant un control strict du mécanisme de bioaccumulation.

En 2005, B ebianno et coll. apportent des informations sur les concentrations en fer, manganèse, cuivre, zinc, cadmium et argent dans les différents organes de *Bathymodiolus azoricus* (prélevées sur des sites hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique).

Kádár et coll., en 2006, se sont intéressés à la répartition de l'aluminium, du cadmium, du cobalt, du manganèse et du mercure dans différents organes de moules *Bathymodiolus azoricus*, prélevées à Menez Gwen, Lucky Strike et Rainbow, ainsi que la répartition du fer, du cuivre, du zinc et du mercure chez *Rimicaris exoculata* et *Mirocaris fortunata* (Rainbow, Lucky Strike).

Cosson, dans son bilan des connaissances sur la bioaccumulation des éléments minéraux chez *Riftia pachyptila* (1996) donne des valeurs de concentrations en argent, arsenic, cadmium, chrome, cuivre, fer, mercure, manganèse, plomb, sélénium et zinc, mesurées dans les tissus de *Riftia pachyptila*, *Calypotgena magnifica*, *Bathymodiolus thermophilus* et *Neomphalus fretteae*. En 2008, il donne également les valeurs des concentrations en argent, cadmium, cuivre, fer, manganèse et zinc dans différents organes et tissus de *Bathymodiolus azoricus*.

Charmasson et coll. (2009) ont mesuré le taux de radionucléides (uranium, polonium 210 et plomb 210) chez *Rimicaris exoculata*, *Bathymodiolus azoricus*, *Riftia pachyptila*, *Alvinella pompejana*, *Paralvinella grasslei* (individus prélevés sur les sites hydrothermaux de la dorsale médio-atlantique et de la dorsale Est-Pacifique) et *Orchomenella* sp. (plaine abyssale).

Company et coll. (2007) rapportent une expérience intéressante : après avoir déplacé des *Bathymodiolus azoricus* du site hydrothermal Rainbow, riche en espèces chimiques, dans le champ hydrothermal Lucky Strike, un peu moins toxique et moins profond (1700 m au lieu de 2300 m), ils les y ont laissés deux semaines. Les modioles ont survécu, prouvant, d'après ces auteurs, la robustesse de leur constitution. Apparemment, il ne semble pas y avoir eu d'expérience dans l'autre sens : transplanter des animaux dans un milieu un peu plus toxique, mais plus riche en espèces chimiques que leur milieu initial. Une telle expérience aurait pu donner des indices sur la réaction des espèces à une exposition subite plus importante de métaux lourds, comme ce qui pourrait se produire suite à une exploitation minière dans leur environnement.

Néanmoins, ce type de transplantation entre sites distants est critiquable d'un point de vue écologique : il interfère avec la dynamique et la génétique naturelle des populations.

Parmi les études traitant de la toxicologie, celles sur le devenir des métaux lourds dans la chaîne alimentaire sont très peu nombreuses et seuls quelques papiers ont été publiés, eux-mêmes peu repris par la communauté scientifique. Nous les présentons donc avec la réserve qui convient.

Kádár et coll. (2007) présentent dans un tableau synthétique les concentrations en fer, cuivre, zinc et mercure mesurées par diverses équipes dans les tissus de différentes espèces (endosymbiotes, porifères, cnidaires, crustacés, bivalves, polychètes) rencontrées à Menez Gwen, Lucky Strike, le mont Saldanha et Rainbow. Ce tableau indique aussi la classe trophique des différentes espèces. Les crustacés présentent les taux de fer dans l'organisme les plus importants, suivis par les éponges, les ascidies, les bivalves et leurs parasites, les annélides, les échinodermes, les gorgones et les bactéries endosymbiotiques. Le cuivre et le zinc suivent globalement la même tendance. Le taux de mercure, par contre, augmente des gorgones vers les échinodermes, les éponges, les bactéries, les crabes et les crevettes. Les bivalves présentent la plus forte concentration en mercure.

Martins et coll. (2006) ont mesuré les concentrations totales de mercure et de méthyle mercure dans les tissus musculaires et hépatiques de 8 espèces de poissons des sites hydrothermaux Menez Gwen, Lucky Strike et Rainbow. Ces espèces sont les chimères *Hydrolagus pallidus* et *Hydrolagus affinis*, *Synaphobranchus kaupii*, l'apogon noir *Epigonus telescopus* (commercialisé), le moro commun *Mora moro* (intérêt commercial mineur) *Antimora rostrata*, *Deania claceus* et le sagre rude *Etmopterus princeps* (pêché pour sa chair et l'huile tirée de son foie). Ils ont trouvé des concentrations en mercure plus hautes que celles précédemment publiées pour les poissons des grands fonds. D'après les auteurs, ces espèces ont été exposées à de plus hauts niveaux du mercure, dus non seulement à la disponibilité biologique des formes toxiques et stables de mercure dans l'eau, mais également à la prédation sur des organismes exposés à ce métal. Company et coll. (2010) ont également mesuré et comparé les concentrations en métaux (argent, cadmium, chrome, cuivre, fer, manganèse et nickel) dans les branchies, les muscles et le foie chez *Deania hystricosa* (intérêt commercial mineur), le sagre rude, *Hydrolagus pallidus*, *Antimora rostrata*, le moro commun et *Synaphobranchus* spp, à Rainbow, Menez Gwen et Lucky Strike

L'article de Julshamn et coll. sur la concentration du mercure et d'autres éléments toxiques chez l'hoplosthète orange (poisson à forte valeur commerciale) est intéressante (Julshamn et al, 2011) car il donne les taux d'arsenic, de cadmium, de mercure et de plomb naturellement présents chez cette espèce.

Les hoplosthètes oranges sont des carnivores. Ils se nourrissent d'espèces benthopélagiques et mésopélagiques. Leur longévité dépasse les 100 ans. Ils sont donc particulièrement susceptibles d'accumuler de fortes doses de polluants et de présenter au final un risque pour les consommateurs. Pour cette raison, les auteurs ont choisi d'étudier l'effet de l'âge sur la concentration de l'arsenic, du cadmium, du mercure et du plomb dans les tissus musculaires de 25 hoplosthètes oranges, prélevés au niveau du mont sous-marin Faraday (dorsale médio-atlantique).

Newman et coll. (2011), de leur côté, ont mesuré la concentration en mercure dans le muscle axial chez trois espèces de chondrichthyens capturés aux Açores, dans la zone de fracture Charlie Gibbs et sur le mont sous-marin Bear : le sagre rude (*Etmopterus princeps*) présent entre 300 et 2200 m de profondeur (FishBase, fiche du Laboratoire de recherche sur les requins du Canada), le pailona commun (*Centroscyrnus coelolepis*), présent entre 150 et 3700 m (FishBase) et la chimère des profondeurs (*Hydrolagus affinis*), présente entre 300 et 3000 m (FishBase). (Le pailona commun est pêché pour sa chair et l'huile de son foie).

Ces études présentent l'intérêt d'établir un "bilan de santé" initial d'espèces consommées par l'homme. Ces données seront nécessaires pour pouvoir étudier les impacts d'une exploitation minière sur la santé de ces espèces.

Les études proposant des seuils de tolérance à divers éléments toxiques sont encore moins nombreuses. Ainsi, nous n'avons pu identifier que les articles de Teodora Bagarinao (1992), d'Atkins et coll. (2002) et de Company et coll. (2005).

Nous avons cependant choisi de les présenter, mais avec une certaine réserve, considérant l'absence de confirmation par d'autres travaux et/ou en présence de résultats prêtant au questionnement.

Bagarinao donne les concentrations inhibitrices médianes (CI50) de sulfures pour *Bythograea thermydon* : 0,002 μM et *Riftia pachytila* : 14 μM .

Atkins et coll. (2002) ont testé les limites de trois espèces de protistes flagellés (*Caecitellus parvulus*, *Cafeteria* sp. et *Rhynchomonas nasuta*), isolés à partir de sites hydrothermaux à 9°N dans le Pacifique Est. Plus généralement, ces flagellés, notamment *Cafeteria* sp., sont connus pour leur capacité de vie/survie en anaérobiose. Comme les sulfures s'attaquent aux enzymes du métabolisme aérobie (cytochromes de la chaîne respiratoire), cette capacité de survie en anaérobiose leur permet sans doute d'éviter la toxicité des sulfures. Les *Cafeteria* sp. proviennent de l'eau autour d'une cheminée hydrothermale, les *Caecitellus parvulus* ont été prélevés au niveau d'un lit de moules et les *Rhynchomonas nasuta* au niveau d'une colonie de Serpulidés. Les tests toxicologiques sont menés par culture en laboratoire. Les auteurs, après analyse de la littérature, rapportent que les concentrations normales en sulfures dans le fluide hydrothermal pur sont environ de 18-20mM. Cette valeur est au centre de la gamme des concentrations en sulfure testées dans leur expérience. Les concentrations de l'habitat des espèces sont sans doute largement inférieures, de quelques mM si l'on est proche des cheminées, à quelques μM à proximité des Serpulidés. (François Lallier, comm.pers., 2013).

Ils ont ainsi trouvé que les *Cafeteria* sp. supportaient très bien une exposition à 30 mM de sulfures pendant 24h (les concentrations normales en sulfures étant de 18-20 mM dans leur environnement, sauf en cas d'éruption où ces concentrations peuvent monter jusqu'à plus de 65 mM). Par contre, sur une semaine, le taux de viabilité était de 0,1% pour une exposition à 5 mM, de 0,01% pour une exposition à 10 mM, plus de 0,001% pour une exposition à 20 mM et 0% pour une exposition à 30 mM.

Rhynchomonas nasuta s'est révélé plus sensible aux sulfures, avec un taux de viabilité variant entre 10 et 100% pour une exposition de 24h à des concentrations de 0,1mM et 5mM, 1% de viabilité après 6h d'exposition à une concentration en sulfures de 10mM (0,01% au bout de 24h) et 0,01% de viabilité après 6h d'exposition à une concentration en sulfures de 20mM (0% de viabilité au bout de 24h).

Caecitellus parvulus a été identifiée comme l'espèce la plus vulnérable face aux sulfures : 1% de viabilité après 24h d'exposition à des concentrations de 2mM de sulfures et 0% de viabilité au bout de 24h à 5mM de sulfures.

Il semble que jusqu'à des concentrations de 10 mM, les trois espèces ne soient pas affectées par le fer, le cuivre, le zinc et le manganèse dissous. Les auteurs ont constaté que ce seuil franchi, le taux de viabilité des différentes espèces tombait à 0% après une exposition de 24h à de concentrations en fer total de 10 mM, sauf pour *Caecitellus parvulus*, qui, à leur étonnement, présentait un taux de viabilité de 10%.

Notons que la méthodologie adoptée par les auteurs de cette étude présente une ambiguïté : Un taux de viabilité de 0,1% correspond à une mortalité de 99,9%. Cette méthode d'analyse des résultats est particulièrement utilisée par les microbiologistes, une culture de bactéries

étant susceptible de « repartir », même si très peu de cellules survivent, lorsque les conditions sont de nouveau favorables. Ce n'est pas forcément le cas pour des protistes (eucaryotes).

Company et coll. (2005) ont mené une expérience un peu à part. Sachant qu'à Menez Gwen, Lucky Strike et Rainbow, les concentrations en cadmium varient de 1 à moins de 15 $\mu\text{g.l}^{-1}$, les auteurs ont soumis des *Bathymodiolus azoricus* à une exposition toxique à une concentration en cadmium de 100 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pendant 24h, 48h et 144h. Le seuil de tolérance des animaux est largement dépassé car les auteurs s'intéressent ici à l'ordre et l'ampleur des lésions générées par une concentration toxique de cadmium pour les moules. **L'intérêt que nous voyons à ce travail est de donner des références de base, si, un jour, des expériences d'études d'impacts sont menées à petite échelle et permettent de mesurer les concentrations en cadmium après une activité minière au niveau d'un site hydrothermal.**

5.2.3.2. *Vulnérabilité de l'écosystème et capacités de restauration*

Synthèse de la littérature scientifique sur les nodules

L'analyse de la littérature scientifique montre que **les temps de rétablissement des écosystèmes sont extrêmement variables pour un même type de milieu, en l'occurrence les différents champs de nodules dans le monde.** Aussi, plutôt que de parler de restauration, il conviendrait peut-être de parler de recolonisation.

Seuls les champs de nodules ont fait l'objet d'étude des perturbations du milieu et de leur devenir dans le temps.

Dans le bassin du Pérou (Pacifique Sud-Est), dans le cadre de DISCOL, les scientifiques ont surveillé la communauté formée après la collecte de nodules à petite échelle. Ils ont ainsi constaté une recolonisation des sillons au bout de 3 ans, avec une abondance des taxons dans les sillons comparable à celles des sédiments non perturbés. Les ophiurides, les concombres de mer, les poissons et les bernard-l'hermite sont revenus (Bluhm, 2001). Les scientifiques ont cependant observé des **variations de dominance au niveau des familles** de polychètes (Borowski, 2001). Par ailleurs, dans un autre article paru la même année, Ahnert et Schriever ont reporté avoir observé, 7 ans après la perturbation, des **variations dans les compositions des groupes** de nématodes et de copépodes harpacticoides, à la fois dans les zones ayant été perturbées directement, mais aussi dans les zones ayant été perturbées secondairement (par la résédimentation des particules du nuage sédimentaire) (Ahnert and Schriever, 2001). Au bout de 7 ans également, les organismes à mobilité réduite, tels les anémones, les lophenteropneustes ou les étoiles de mer sont réapparues dans les zones perturbées (Bluhm, 2001). **C'est donc une nouvelle communauté qui s'est établie, et un écosystème différent de celui qui existait avant les simulations d'exploitation minière.**

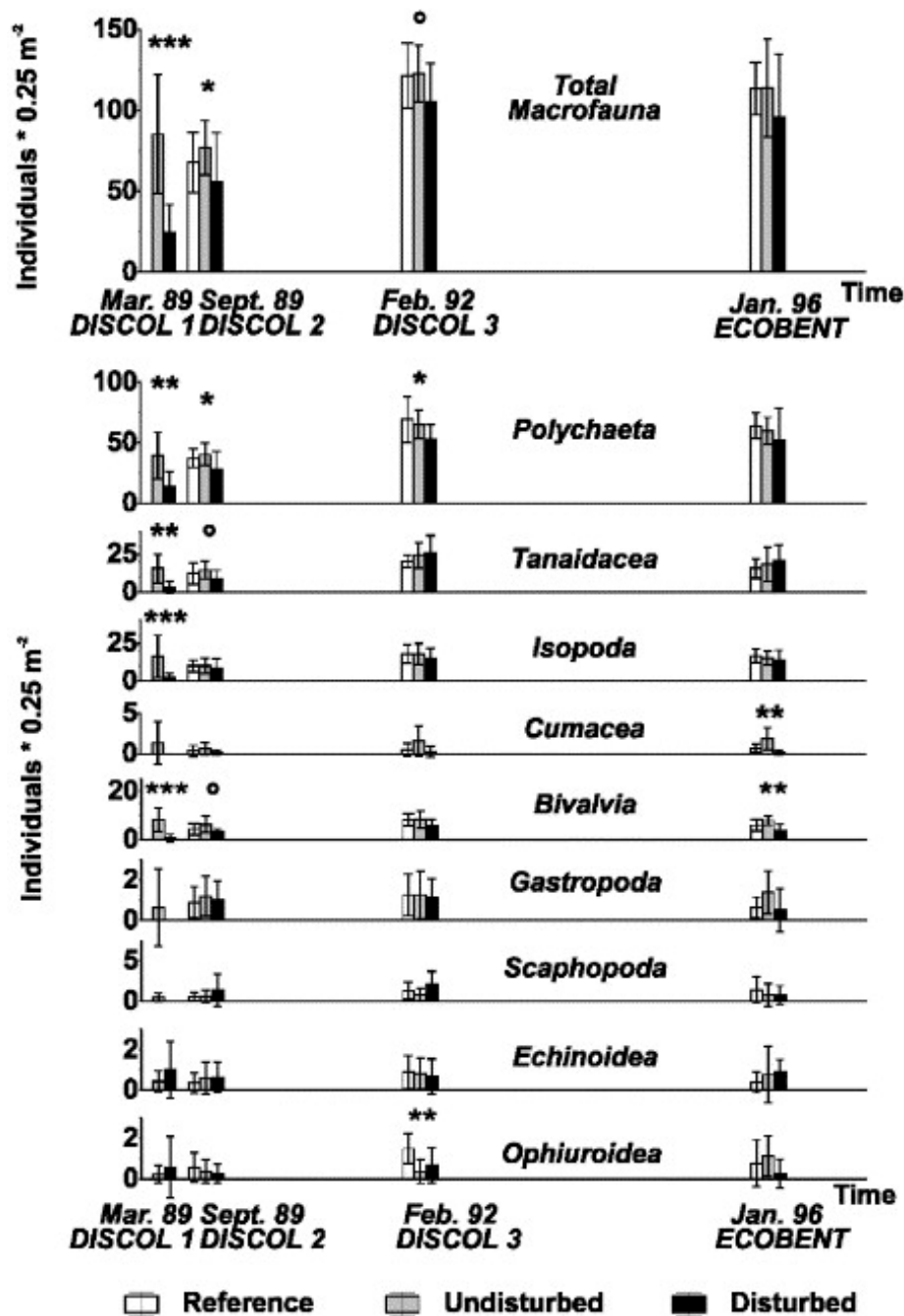


Figure 5-11 Abondance de la macrofaune des sites DISCOL (>500µm, entre 0 et 5cm de profondeur dans le sédiment) après la perturbation à différents temps d'observation.

Pour DISCOL 1, les astérisques signifient des différences d'abondance entre les zones perturbées et non perturbées. Pour les autres expéditions, les symboles signifient les résultats significatifs de l'analyse ANOVA. Les niveaux de significativité sont (***) $p < 0.001$; (**) $p < 0.01$; (*) $p < 0.05$; (°) $p < 0.1$.

Les espèces ne sont pas toutes égales dans leur capacité à réinvestir le milieu. Les observations faites dans l'océan Pacifique Central, 2 ans après les tests effectués dans le cadre de l'étude japonaise JET, ont montré que les limivores (holothuries) étaient les plus impactés par la suspension et la redéposition des particules du nuage sédimentaire. Au bout de 2 ans, il existait toujours un écart significatif entre les abondances des holothuries des zones perturbées et celles des zones non perturbées, alors que les densités d'éponges et d'ophiurides ne différaient pas d'une zone à l'autre. Fukushima, Shirayama et Kuboki expliquent ces réponses différentes par une perturbation prolongée du milieu nutritionnel des limivores alors

qu'elle aurait été beaucoup plus restreinte pour les suspensivores et les omnivores (Fukushima, Shirayama and Kuboki, 2000). On constate des temps de recolonisation du milieu semblables à ceux observés dans le bassin du Pérou. De même, dans le Pacifique Nord-Est, dans le cadre de JET et de DIETS, les scientifiques ont constaté qu'au bout de 2 ans, le méiobenthos avait retrouvé une abondance normale (Brunn, 2011). Plus précisément, d'après les résultats obtenus lors de JET, la densité du méiobenthos était revenue à sa valeur d'origine dès la première année (Shirayama and Fukushima, 1997), avec même un doublement de la densité des crustacés (5 à 10 % du total du méiobenthos). La densité de la macrofaune était également remontée à son niveau d'origine. On a cependant pu observer plus de crustacés dans les zones à forte sédimentation et trois fois moins de polychètes dans les zones non-perturbées (Fukushima and Imajima, 1997). Quant à la mégafaune, si les holothuries étaient encore moitié moins nombreuses qu'avant la perturbation, les autres espèces n'ont visiblement pas été affectées (Matsui et al, 1997).

Enfin, toujours dans le Pacifique Nord, 1 an et 10 mois après les perturbations, Radziejewska a relevé une augmentation significative de l'abondance du méiobenthos, dans la partie du site de test affectée par une augmentation de la remise en suspension des sédiments et un apport naturel de phytodétritus. Elle a aussi observé spécifiquement les nématodes et les harpacticoides (Radziejewska, 2001 et 2002).

Dans le bassin de l'océan Indien Central, des observations ont été faites aussi, après un peu plus de 3 ans et demi, mais elles révèlent une situation différente. Ingole et coll. avaient déjà remarqué que les polychètes, qui dominaient la faune avant l'expérience INDEX, avaient été supplantés après la perturbation par les crustacés et les nématodes (Ingole et al, 2001). 3 ans et 8 mois après INDEX, Ingole et coll. constatent une récupération de la méiofaune partielle mais inégale selon la profondeur dans le sédiment : 80% dans les couches entre 30 et 35 cm de profondeur contre seulement 16% dans les 2 premiers cm de sédiments (Ingole et al, 2005). Le retour à la normale a pris plus de temps que dans le bassin du Pérou et dans le Pacifique Central (Ingole et al, 2005; Raghukumar et al, 2001).

Les expériences menées dans les champs de nodules de la zone Clarion-Clipperton confirment également une recolonisation du milieu par la faune, entre 2 et 7 ans, rapporte Khripounoff en citant Trueblood, Ozturgut et Thiel (Trueblood and Ozturgut 1997; Thiel, 2001; Khripounoff, Caprais and Crassous, 2006). Khripounoff et coll. ont étudié un site dans la Zone de fracture Clarion-Clipperton dédiée aux français, à 5000 m de profondeur. Ce site avait été exploré entre 1977 et 1988. Une description de sa faune a été réalisée par Virginie Tilot, dans son rapport de thèse datant de 1992 (Tilot, 1992). Ils ont ainsi pu mettre en évidence que la composition de la nouvelle communauté était différente de la communauté initiale. Les perturbations engendrées dans les cycles des nutriments : silicates, phosphates et nitrates, semblent être revenues à la normale en 26 ans. Ils ont par contre remarqué que les sillons étaient toujours visibles et que le gradient chimique dans le sédiment superficiel ne s'était toujours pas rétabli. Apparemment, ni la surface de la trace ni la structure géologique du sédiment n'ont été restaurées par des processus diffusants ou de bioturbation. L'épifaune a été complètement détruite ou exportée et il n'y a pas de recolonisation possible puisqu'il n'y a plus de nodules.

Tableau 5-10 Comparaison des différentes méthodes de perturbation, résilience des zones perturbées et résilience des assemblages de nématodes dans trois études d'impact en milieu marin profond (par comparaison avec une référence, par exemple, un site adjacent non perturbé) (Miljutin et al, 2011).

Disturbance experiment			
Name, year	OMCO, 1978	IOM BIE, 1995	DISCOL, 1989
Region	Central part of CCFZ, Pacific	Eastern part of CCFZ, Pacific	Peru Basin, Pacific
Depth, m	~ 5,000	~4,300	~4,100
Disturbance gear	Self-propelled miner with two Archimedean screws	Passively towed, two-runner, sled-type disturber	Passively towed, "plough-harrow"-like disturber
Area of disturbance	? (at least several tracks)	~ 1800 m ² (14 tracks) of total experimental field 3 km ²	~2 km ² of total experimental field 10.8 km ²
Width of track, m	~1.5	~2.4	~8
Depth of disturbed sediments, cm	~4	~*	10–15
Impact on superficial soft sediment layer	Completely released into water column	Completely released into water column	Stirred and partially raised into water column
Impact on nodules	Completely extracted	Not extracted	Stirred, but not extracted
Changes in habitat heterogeneity after disturbance	Decreased	Decreased	Increased
Post-impact study, a comparison of the disturbed fields with adjacent, undisturbed fields			
Year	2004	1997	1996
Time after disturbance, years	26	2	7
Visible effects of disturbance	Track looks fresh	Track almost not visible, enriched with phytodetritus	Track visible but having fuzzy contours
Sediment structure	Did not recover	Recovered	Did not recover
Nematode assemblage structure at genus level	Significant difference	Significant difference	No difference
Nematode assemblage structure at family level	Significant difference	~*	Significant difference
Nematode diversity at genus level	Decreased	Decreased	Decreased
Nematode diversity at family level	Decreased	~*	~*
Total nematode density	Decreased	No difference	Decreased
References	Present study; Chung (2005); Khripounoff et al. (2006)	Brockett (1994); Radziejewska et al. (2001a,b); Radziejewska (2002)	Vopel and Thiel (2001); Borowsky (2001)

* No data available.

Ces recolonisations s'expliquent de la manière suivante : dans un premier temps, les animaux morts ou bl essés constituent une source de nourriture providentielle pour les animaux survivants (Brunn, 2011). **Les espèces qui vont bénéficier dans un premier temps des modifications environnementales vont être des espèces très spécifiques qui montrent normalement une faible abondance dans la communauté d'origine. Le milieu redevient favorable à la plupart des taxons lorsque la couche semi-liquide superficielle du plancher océanique est reconstituée et que les sillons sont comblés par accumulation de**

matériel transporté latéralement des zones voisines. Cette reconstitution nécessite cependant plusieurs années.

De façon identique, comparativement aux résultats des expériences de colonisation de monticules de sédiments artificiels dans une région bathyale de l'océan Pacifique Nord-Est, la façon dont les colonisateurs ont atteint les sillons DISCOL a été considérée comme étant de la migration latérale d'adultes ou de jeunes benthiques, plutôt qu'une colonisation par les larves à partir de la colonne d'eau. Les observations confirment que le processus de rétablissement dans les sillons a continué depuis DISCOL3, car 7 ans après la perturbation, les abondances de presque tous les taxons étudiés étaient semblables à celles des zones non perturbées et le signal de perte de la diversité dans les régions perturbées était plus faible que dans DISCOL3. Cependant, certains effets de la perturbation restent encore détectables.

Prévisions sur la vulnérabilité des écosystèmes associés aux encroûtements cobaltifères et de leurs capacités de restauration

En ce qui concerne les encroûtements cobaltifères, **il est possible de comparer les impacts de leur exploitation avec ceux de la pêche profonde sur ces écosystèmes**, en particulier les coraux. En effet, **la faune des monts sous-marins à encroûtements est dominée par des espèces sessiles à croissance très lente : éponges et coraux**. Or ces mêmes monts peuvent également être exploités pour la pêche.

Il existe quelques publications sur les impacts de la pêche au chalut sur la faune des monts sous-marins. D'après ces études, **les coraux profonds ont une espérance de vie de l'ordre de quelques dizaines d'années à quelques centaines d'années, avec un taux de croissance très lent, de seulement quelques millimètres par an** (Althaus et al, 2009). La résilience des écosystèmes des monts sous-marins, dominés par les coraux semble donc très faible (Stone, 2006) : **des tests menés en Nouvelle-Zélande et en Australie ont montré que les écosystèmes n'avaient toujours pas récupéré au bout de 10 ans** (Williams, 2010). La reformation des récifs coralliens profonds (les plus physiquement touchés par les engins de pêche) est estimée à plusieurs siècles, voire même des milliers d'années. S'ils se reforment... Les espèces les plus endémiques disparaîtront également définitivement. L'écosystème se reformera, mais il sera différent du précédent. La pêche profonde a permis de mettre en évidence certaines conséquences socio-économiques de la réduction de la biodiversité marine profonde : une réduction de la productivité primaire (Runge, 1988), qui a entraîné une plus grande difficulté pour les écosystèmes à se régénérer, et des zones-refuges et de réserves de nourriture, ainsi qu'une réduction de la quantité et du nombre des espèces commercialisables. Ces impacts sont toutefois dépendants de la spécificité des espèces les plus touchées, s'il existe des substituts à ces espèces ou non (Beaumont et al, 2006).

Prévisions sur la vulnérabilité des écosystèmes associés aux sulfures hydrothermaux et de leurs capacités de restauration

Les rapports consacrés à l'exploitation des sulfures (AIFM) soulignent le fait que les habitats hydrothermaux sont instables par nature. Ils s'appuient sur les observations de la recolonisation d'habitats affectés par des éruptions volcaniques (Chapitre 4) pour anticiper un recouvrement rapide des communautés en place. Cependant, cette extrapolation n'est pas correcte lorsqu'il s'agit de **communautés de zones inactives, qui sont, elles, au contraire, particulièrement stables dans le temps. Par ailleurs, le rôle écologique d'espèces à croissance lente comme les coraux d'eau froide est aussi plus marqué dans ces zones**

inactives. La résilience des communautés de zones inactives ne peut pas être prédite au regard de ce qui est connu pour les zones actives.

Des zones hydrothermales actives, notamment sous forme d'émissions diffuses, sont cependant souvent associées aux zones inactives cibles de l'exploitation minière. Dans ce cas, les impacts sur les communautés hydrothermales elles-mêmes sont à considérer. Les perturbations naturelles de grande ampleur qui ont conduit à l'éradication locale des communautés en place et ont permis l'étude de cette résilience sont des éruptions volcaniques massives sur des dorsales rapides telles que la dorsale Est-Pacifique ou Juan de Fuca. Les instabilités sur les dorsales lentes comme la dorsale Atlantique où sont situés les permis miniers français et russes sont plutôt de nature sismique. Si l'instabilité interannuelle des habitats et des densités de population d'espèces dominantes a été décrite pour plusieurs sites, les causes de cette instabilité et les mécanismes qui permettent le maintien des populations sont très peu connus. Il n'est pas établi que cette dynamique reflète la capacité des communautés à répondre à une perturbation environnementale. Les régions arrière-arc sont elles aussi soumises à des phénomènes éruptifs mais ceux-ci sont de nature différente (volcanisme explosif) et la réponse des populations de ces régions n'a pas été étudiée. **On dispose en fait de très peu d'éléments permettant de prévoir la réponse des communautés associées aux sulfures et leur capacité de recolonisation des zones actives et inactives après la destruction de l'habitat.**

L'ensemble des impacts décrits dans le chapitre et la capacité de résilience des écosystèmes et des environnements sont résumés dans le tableau 5-11 suivant.

Tableau 5-11 Synthèse des impacts environnementaux et résilience des écosystèmes.

Activité	Type d'impacts	Impacts	Ressource exploitée	Région impactée	Durée de l'impact	Echelle spatiale	Résilience	Importance
Collecte	Impacts physiques directs	Destruction des habitats	nodules, encroûtement, sulfures	fond marin	court-moyen terme	locale	lente	forte
		Mortalité des espèces sessiles sur le trajet des collecteurs et autres engins sous-marins	nodules, sulfures	fond marin	court terme	locale	rapide	forte
		Mortalité des animaux prélevés avec le minerais	nodules, encroûtement, sulfures	fond marin	court terme	locale	dépend des espèces : rapide (méga-faune) à très lente (micro-organismes)	forte
		Modification des propriétés géochimiques du sol et de l'eau de fond (mélanges des couches oxydées et suboxydées → modifications du pH, de la concentration en O ₂ et des concentrations en métaux lourds)	nodules	fond marin	très long terme	locale	?	forte
	Formation de nuages de particules par le système de	Recouvrement partiel ou total de la faune dans les sillons	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme	dépend de la courantologie et des caractéristiques des particules (taille, granulométrie)	?	
		Colmatage des organes filtrants des suspensivores	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme		?	

	propulsion du collecteur	Dilution des ressources alimentaires des détritivores	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme			?
	Formation de nuages de particules par les systèmes de décollement à jet d'air ou d'eau		nodules	fond marin, colonne d'eau	court terme			?
	Formation de nuages de particules par concassage des nodules		nodules	fond marin, colonne d'eau	court terme			?
	Augmentation de la concentration d'ions métalliques toxique dans le milieu		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin	?	locale	?	?
	impact sur le cycle du carbone		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin	?	locale	?	?
	Pollution électromagnétique		nodules, encroûtements, sulfures	colonne d'eau	court terme	locale	?	?
	Vibrations		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme	locale-régionale	?	?
Déversement des déchets (débris de minéral, eau, sédiments)	Augmentation du flux de particules		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme	?	?	forte
	Relargage d'éléments métalliques		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	?	locale-régionale	?	?
	Absorption des métaux par la faune		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, eaux de fond	?	locale-régionale	?	?
	Apport en matière organique dissoute		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme	locale	?	?
	Changements biochimiques		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	?	locale?	?	?
	Modification de la température		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Augmentation de la turbidité		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme	locale	?	?
	Réduction de la lumière (liée à l'augmentation de la turbidité)		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Perturbation de la migration verticale et horizontale du zooplancton et du necton		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Perturbation du transport vertical et horizontal de la matière		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme	locale	?	?
	Modification de la production primaire par apport de nutriments mais réduction de la photosynthèse		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Modification de l'activité bactérienne		nodules,	eaux de	court	locale	?	?

		encroûtements, sulfures	surface	terme			
	Modification des taux de consommation d'oxygène	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Impact sur la dominance des diatomées, susceptible d'entraîner une augmentation du taux d'absorption du dioxyde de carbone.	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court terme	locale	?	?
	Perte de la biodiversité	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme et peut-être moyen terme	?	?	?
	Fertilisation en surface provoquant l'anoxie des eaux plus profondes	nodules, encroûtements, sulfures	milieu de la colonne, eaux de fond	?	?	?	?
Déversement de saumures issues de la production d'eau potable à bord des bateaux-support		nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	long terme	dépend de la courantologie	lente	forte
Logistique/Transport	Perte de minerai	nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme	locale	?	faible
	Fuite de carburant	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	long terme	dépend de la courantologie	lente	faible
	Dysfonctionnements d'équipement non prévus pouvant aboutir à des pertes de matériel dans le riser de remontée et dans le système de pompage.	nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court terme	locale	?	faible

5.3. Introduction aux services écosystémiques et à leurs méthodes d'évaluation économique

La terminologie "services écosystémiques" désigne les bienfaits rendus aux hommes par les écosystèmes. D'après le Millenium Ecosystem Assessment (MEA) (Swallow et al, 2009; site du MEA), ces services se répartissent en quatre grandes catégories :

- les **services support**, à la base de tous les autres services rendus par les écosystèmes, pouvant subir un impact plus ou moins direct et à long terme ou influencer sur les conditions d'exploitation minière : habitats, cycles bio-géo-chimiques, sites de reproduction, utilisation de l'espace pour les câbles sous-marins, transport de matière...
- les **services d'approvisionnement**, qui permettent d'obtenir des biens directement commercialisables : le poisson (et autres espèces comestibles), les ressources minérales (ou matériaux bruts) et énergétiques, les ressources médicinales...
- les **services de régulation**, qui sont des bénéfices obtenus par la régulation de processus des écosystèmes : la régulation du climat, la régulation de la composition chimique des océans...
- les **services culturels et sociaux**, non matériels : la récréation (tourisme), l'emploi, des avancées scientifiques, le patrimoine mondial, le bien-être de l'Homme...

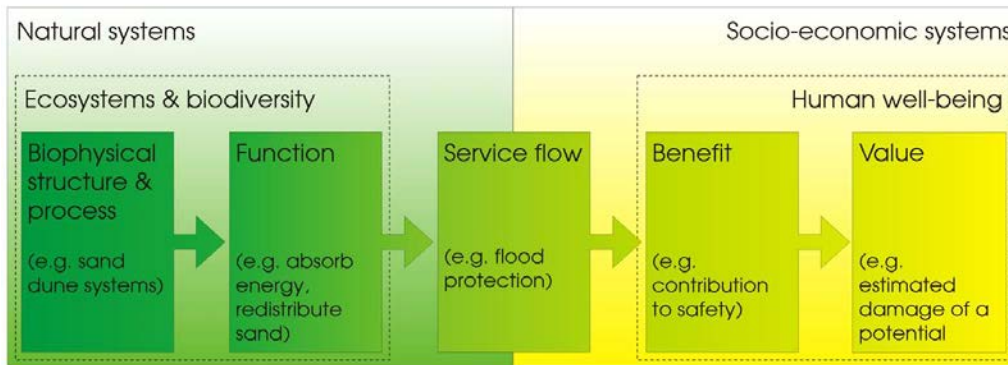


Figure 5-12 Illustration du modèle en cascade dans le cadre du contexte naturel et socio-économique (Liquete et al, 2013).

Le schéma ci-après illustre avec clarté la manière dont les différents rôles des écosystèmes profitent à l'espèce humaine.

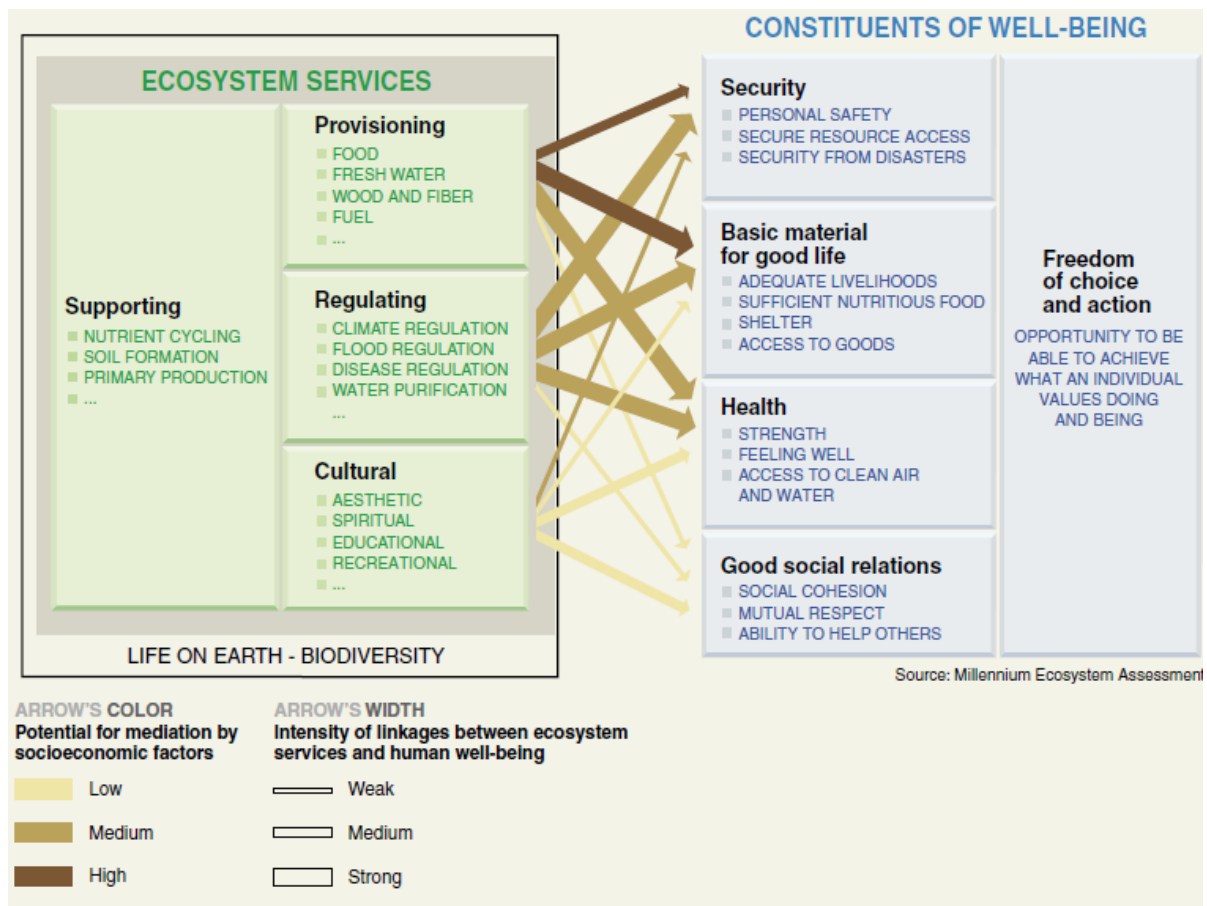


Figure 5-13 Exemples de relations entre les services écosystémiques et le bien-être humain (Reid et al, 2005).

La tendance aujourd'hui, qui est impulsée en particulier par les travaux européens (MAES, Mapping et Assessment of Ecosystems and their Services), est de ne plus parler de services support, dans la mesure où ils correspondent et souvent décrivent des fonctions écologiques, et de ce fait sont sortis de l'analyse "services". Toutefois, ils nous semblent importants pour la compréhension des autres services écosystémiques. Aussi avons-nous fait le choix de les présenter dans ce chapitre.

Par ailleurs, jusqu'à présent, les grandes études sur les services écosystémiques (Millenium Assessment, TEEB, UK National Ecosystem Assessment...) traitaient exclusivement des services rendus par la biodiversité. Cependant, les services abiotiques rendus par les milieux peuvent aussi générer également du profit et du bien-être (Brouwer et al, 2013). Les prochaines études devraient donc traiter également les services de nature abiotique (Brouwer et al, 2013), et nous avons également fait ce choix dans ce chapitre.

L'évaluation monétaire des services écosystémiques est délicate car « la valeur économique est *a priori* subjective » (Salles, 2010), surtout en ce qui concerne quelque chose d'aussi complexe que l'environnement.

La valeur économique est définie comme « une relation d'équivalence subjective entre les biens qui dépend de leur utilité et de leur rareté ». L'« utilité » de la biodiversité et des services écosystémiques se perçoit :

- d'une part, à travers leur contribution au « bien-être » humain
- et d'autre part, à travers ce que la perte de la biodiversité entraînerait comme coût pour les humains ou comme changement de comportement/sociétal.

Dans la perspective où les services écosystémiques sont considérés comme des biens communs, il est difficile d'en repérer la valeur et les changements car les droits d'exploiter ces écosystèmes et ces environnements profonds ne sont pas forcément bien définis. En effet, des problèmes de surexploitation peuvent apparaître (pêche commerciale des espèces démersales), de même que des problèmes d'encombrement (par exemple, exploitation des ressources biologiques contre exploitation de ressources minérales, dans notre cas). Les connaissances manquent pour faire une estimation.

Afin d'évaluer la valeur des écosystèmes, une grande partie des économistes semblent se baser sur la notion de Valeur Economique Totale (VET) des écosystèmes étudiés.

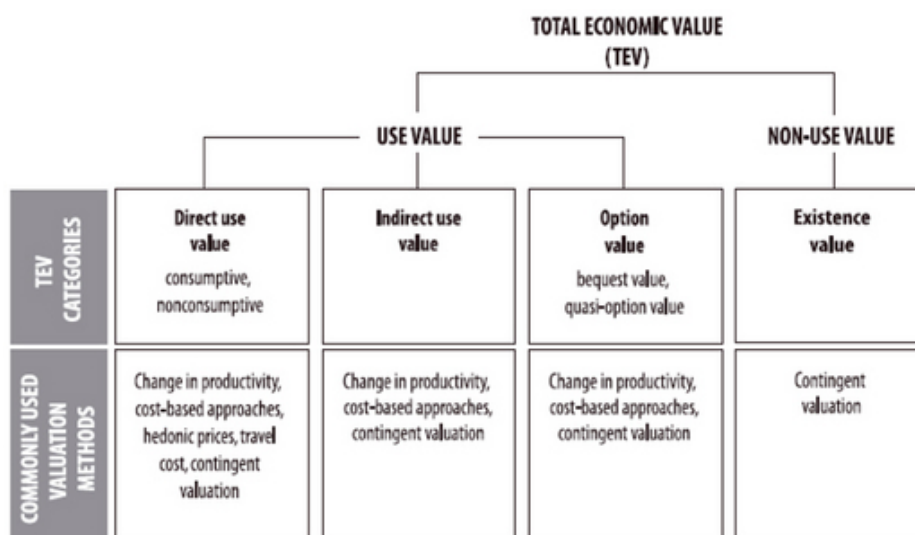


Figure 5-14 Cadre général d'analyse de la valeur économique totale (VET) (Reid et al, 2005).

La « Valeur Economique Totale » comprend des valeurs d'usage direct ou indirect (les usages indirects qui représentent souvent une part significative des usages vont nécessiter des approches spécifiques, développées ci-après), de non-usage (mais il n'existe pas de consensus parmi les économistes à ce sujet), d'option (mais ces dernières, de fait, ne peuvent donner lieu qu'à des mesures imprécises, soumises à des hypothèses restrictives, avec risque de sous-évaluation) parallèlement à la prise en compte des usages présents et des usages futurs.

La part de subjectivité (dans l'appréciation de certaines de ces valeurs) fait que même la Valeur Economique Totale (VET) reste sujette à la critique. Ainsi, par exemple, le Commissariat Général du Développement Durable du MEDDE n'adhère pas à ce concept (CGDD, comm. pers. 2013). Les approches en termes de coût de maintien/coût de remplacement peuvent représenter une alternative à la VET. Toutefois, ces approches ne sont pas équivalentes, car elles ne disent rien sur l'importance sociale de ces écosystèmes. Elles prennent simplement en compte ce que coûterait la décision de les préserver ou de les reproduire.

Les approches de type "multicritères", si elles n'aboutissent pas à une évaluation au sens habituel, permettent de hiérarchiser des choix, et même de le faire de façon plus ou moins délibérative.

On peut également citer les bilans matière, les analyses éco-énergétiques et, plus récemment (et avec beaucoup plus de succès que les précédentes), les indicateurs comme l'empreinte écologique, l'indice de planète vivante (qui doit pouvoir se décliner sur des espaces limités)...

Ce chapitre tente d'identifier les conséquences des impacts environnementaux (engendrés par l'exploitation des ressources minérales marines profondes) sur les services rendus par les écosystèmes et milieux concernés par cette exploitation.

Il existe ainsi différentes approches d'analyse économique, comme le montre la figure 5-15.

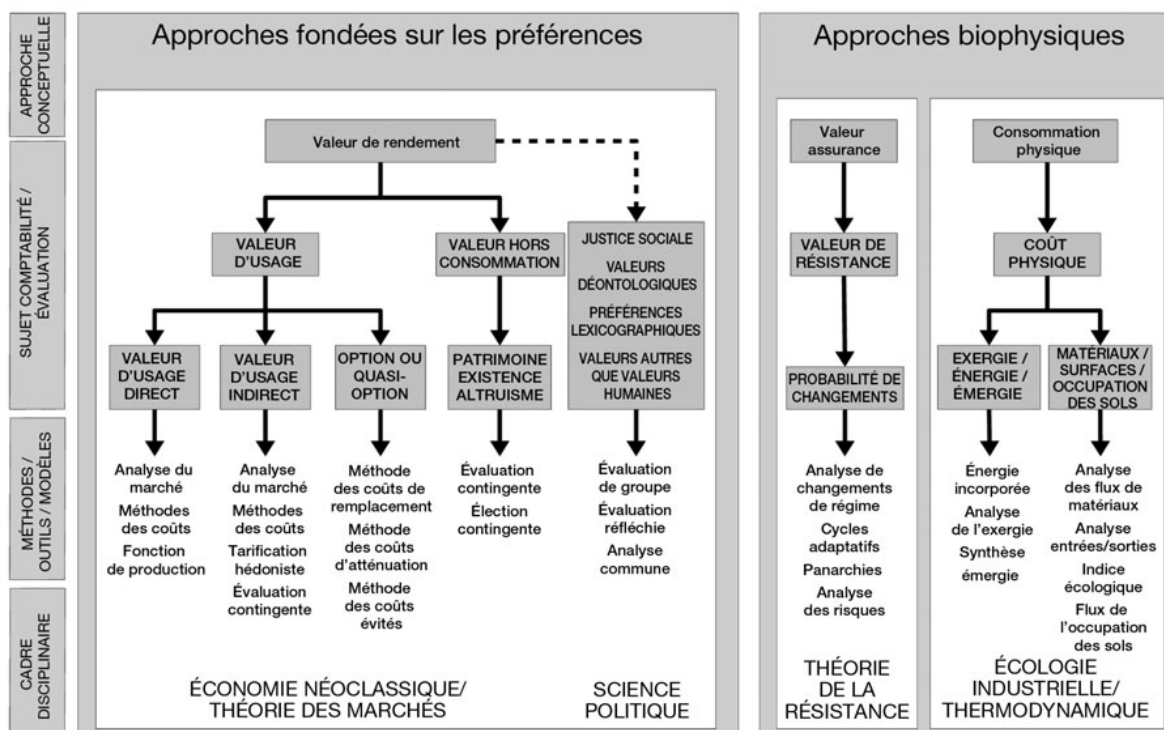


Figure 5-15 Approches générales d'estimation de la valeur des services écosystémiques (Gomez-Baggethun and de Groot, 2010).

D'après Gomèz-Beggethun et de Groot (2010), les approches biophysiques, qui correspondent à une évaluation en termes de coûts de production (surface, travail, quantité d'énergie, de matériel...), donnent un coût physique au maintien d'un état écologique donné et permettent d'évaluer les stocks du capital naturel. Par contre, elles sont relativement inadaptées pour évaluer les services « culturels ».

Les méthodes basées sur des préférences, qui s'intéressent à la valeur accordée par les humains à l'environnement, permettent plus facilement une monétarisation des services écosystémiques. Toutefois, les services non matériels, en particulier, ont une appréciation soumise à la subjectivité. En effet, les écosystèmes peuvent être considérés comme des biens tutélaires. Ainsi, l'archipel des Galápagos, les aires protégées des îles Phénix (République des Kiribati), le lagon sud des îles Chelbalcheb (République des Palaos), la zone sud-ouest et les îles subantarctiques de la Nouvelle-Zélande, par exemple, sont sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. C'est un type de service dont la valeur ne peut pas être évaluée par les méthodes des préférences déclarées.

L'autre possibilité est de les envisager comme des biens communs. Cependant, les droits juridiques ne sont pas forcément bien définis et des problèmes d'encombrement ou de surexploitation peuvent apparaître : exploitation des ressources minérales *a priori* difficilement compatible avec l'exploitation des ressources biologiques sur le même site (puisque les deuxièmes sont détruites plus ou moins partiellement), risque de surpêche des espèces démersales....

Bien que les deux points de vue semblent intéressants, Gomèz-Baggethun et de Groot relèvent qu'ils sont souvent incompatibles et que cela fait débat dans la communauté des économistes. (Gomèz-Baggethun and de Groot, 2010).

Dans les méthodes basées sur des préférences, on distingue celles des préférences révélées et celles des préférences déclarées. Les approches biophysiques, elles, sont représentées par les méthodes basées sur des coûts et les transferts de valeur (Salles, 2010).

Ces quatre méthodes peuvent être ainsi définies (Salles, 2010):

- Les « méthodes basées sur les préférences révélées » : on considère que les comportements indiquent des préférences. Ces méthodes sont principalement utilisées pour monétariser des services touristiques : par exemple, pour estimer la valeur immédiate d'un sanctuaire à requins, on multiplie la valeur du ticket d'entrée par le nombre de touristes venus visiter le sanctuaire.
- Les « méthodes basées sur les préférences déclarées » : les économistes vont faire des sondages. Elles portent soit sur ce que les gens sont prêts à payer (évaluations contingentes), soit sur ce que les interrogés vont préférer comme option parmi une gamme de choix donnée (analyses conjointes). Toutefois, ces méthodes nécessitent que les personnes interrogées aient « une perception claire et quantitative » des biens ou services qui font l'objet des questionnaires. A partir des réponses, on déduit la valeur sous-entendue de ces biens ou services. Dans cette famille de méthodes, l'expérience à choix discret est particulièrement utilisée pour évaluer les biens à valeur non marchande (Jobstvogt et al, 2013).
- Les « méthodes basées sur des coûts observables » ou les méthodes basées sur le marché ou les coûts » : utilisables principalement pour les services à valeur marchande comme la pêche, lorsque la modification des écosystèmes et de la biodiversité se traduit par une perte de la productivité, chiffrable, ou bien lorsque l'on peut chiffrer le coût de remise en état ou d'un système de substitution ou de compensation. On distinguera la « méthodes coûts évités »¹⁹, la « méthode des coûts de

19 « Méthode consistant à évaluer les coûts qu'il faudrait supporter en l'absence du bien environnemental étudié. » <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/m%C3%A9thode-des-co%C3%BBts-%C3%A9vit%C3%A9s>, consulté en 2013.

remplacement »²⁰ et la « méthode des coûts de substitution »²¹ (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Alsace, 2013).

- Les « transferts de valeur » : il s'agit d'attribuer les valeurs connues pour un site, par exemple, au site similaire que l'on veut estimer. Cependant, cette approche entraîne parfois des biais voire des excès.

L'évaluateur se retrouve à devoir choisir entre les méthodes, en fonction :

- **Des données disponibles,**
- **De ses objectifs,**
- **Des types d'usages faits de l'écosystème qu'il étudie.**

Jean-Michel Salles conclut ainsi : « *Les préférences déclarées peuvent refléter la valeur totale, mais leur faible robustesse reste un handicap, malgré des pistes intéressantes pour la construction de préférences raisonnées. Quant aux approches basées sur des compensations en nature (remplacement, restauration), elles peuvent prétendre à couvrir l'intégralité des coûts, si l'on dispose d'une information complète sur les écosystèmes à reproduire; mais la relation avec leur valeur sociale implique une évaluation parallèle.* »

Salles soulève encore le **manque d'information** et le **très faible nombre d'analyses des services écosystémiques** réalisées.

La recherche bibliographique réalisée dans le cadre de la rédaction de ce chapitre confirme la pénurie d'informations au sujet des milieux marins profonds.

5.4. Services écosystémiques rendus par les zones d'exploitation potentielles

Les études économiques portant sur les écosystèmes marins sont relativement rares (à l'exception des récifs coralliens peu profonds). Le chapitre qui suit prend modèle sur la douzaine d'articles et de rapports portant sur l'étude des écosystèmes marins, dans leur généralité.

Parmi les plus remarquables, citons les deux rapports sur les écosystèmes des grands fonds écrits pour le premier dans le cadre du projet européen HERMES (van den Hove and Moreau, 2007), et pour le second, qui réactualise le premier, dans le cadre du projet européen HERMIONE (Armstrong et al, 2010). Citons également le rapport sur les services écosystémiques de la mer Baltique « What's in the Sea for Me? Ecosystem Services Provided by the Baltic Sea and Skagerrak. » de l'Agence Suédoise pour la Protection de l'Environnement et un rapport sur les services écosystémiques de la ZEE du Royaume-Uni (Beaumont et al, 2006). Ces deux rapports sont plus généraux du point de vue de l'écosystème étudié et plus ciblés d'un point de vue géographique. Un dernier rapport mérite d'être cité : c'est l'analyse coûts-bénéfice des mesures de gestion des récifs coralliens et mangroves de Nouvelle-Calédonie de l'IFRECOR (François et al, 2012). La méthodologie de ce rapport nous a montré à quel point nous manquons de données monétaires avant de pouvoir réaliser

20 « Méthode consistant à évaluer le coût induit par le remplacement d'un actif environnemental détruit. » <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/m%C3%A9thode-des-co%C3%BBts-de-remplacement>, consulté en 2013.

21 « Méthode consistant à évaluer les coûts qu'il faudrait supporter pour pallier l'absence du bien environnemental étudié par un moyen artificiel. » <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/m%C3%A9thode-des-co%C3%BBts-substitués>, consulté en 2013.

une analyse semblable sur les écosystèmes qui nous intéressent : monts sous-marins profonds, dorsales océaniques, sites hydrothermaux, plaines et fosses abyssales.

Chaque service écosystémique identifié a été ensuite complété grâce à des recherches bibliographiques spécifiques supplémentaires.

L'ensemble de ce chapitre repose majoritairement sur les articles scientifiques (plus de la moitié du corpus), mais la part de littérature grise est également très importante, en particulier les rapports scientifiques, économiques, statistiques et les sites d'organisations et programmes européens et internationaux, de banques de données scientifiques, des organismes scientifiques (CNRS, Ifremer, MNHN), d'organismes gouvernementaux, de sociétés industrielles, de fondations et d'associations de protection de la nature...

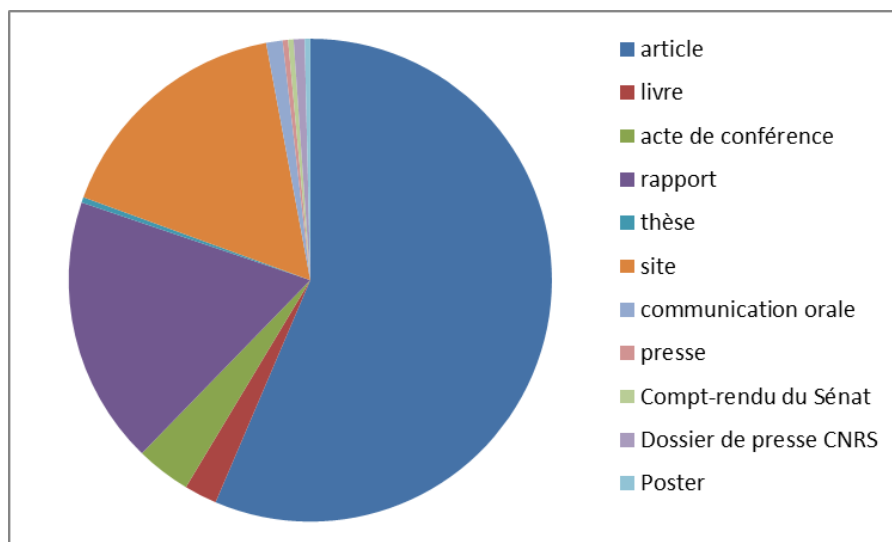


Figure 5-16 Proportion des différents types de documents utilisés pour documenter la description des services écosystémiques rendus par les écosystèmes et milieux potentiellement impactés par l'exploitation minière profonde.

- Les articles scientifiques prédominent largement comme source d'informations supplémentaires, pour la plupart des thématiques : habitat, cycles des nutriments, productivité, cascades d'eau dense, biotechnologies, coraux précieux, décharge, régulation de l'air, du climat, de la composition des océans, transport de matière, absorption et détoxification d'éléments toxiques, paléoclimatologie, biologie évolutive et recherche sur l'origine de la vie/astrobiologie/astrophysique.
- La pêche, par contre, a été majoritairement documentée grâce à des rapports de diverses instances gouvernementales nationales ou européennes. Un grand nombre de détails ont été obtenus en consultant la banque de données FishBase et les sites de criées françaises, de Rungis, de commerces, etc.
- Les informations sur le tourisme en général ont été en grande partie fournies par le site de l'Ambassade de France, les offices du tourisme, d'organismes gouvernementaux locaux...
- Les informations sur les régions classées Patrimoine de l'Humanité proviennent majoritairement du site de l'UNESCO.

- Le rôle des milieux profonds comme source d'inspiration pour des activités créatrices a été majoritairement documentée grâce à des sites : banque de donnée World.Cat, sites de commerce, sites d'artistes...

Armstrong et coll. (2012) ont synthétisé les différents types de services rendus par les écosystèmes profonds en général dans le schéma ci-dessous.

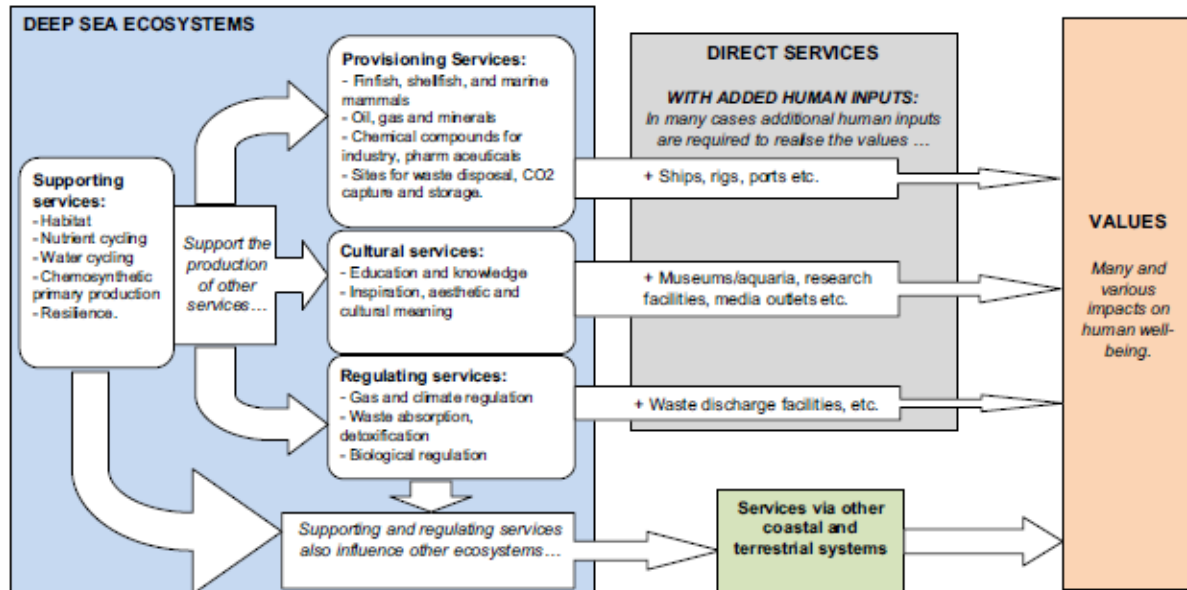


Figure 5-17 Les différentes classes de services écosystémiques rendus par les milieux marins profonds (Armstrong et al, 2012).

Dans cette partie de chapitre, nous allons redéfinir les différents services rendus par les écosystèmes potentiellement menacés par l'exploitation des ressources minérales marines profondes, en précisant si possible les données pour les différentes régions du monde concernées.

L'étude bibliographique montre que les principales îles et pays concernés par l'exploration et l'exploitation des ressources minérales sont, en fonction du type de ressource :

- ♣ **pour les nodules** : îles Clarion, Clipperton, Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), Marshall, Kiribati, Samoa, Cook, Tuvalu, Niue, Hawaii, archipel des Revillagigedo, golfe de Finlande dans la Mer Baltique (Cartes de l'AIFM),
- ♣ **pour les sulfures** : Wallis et Futuna, TAAF, Polynésie Française, îles Marianne du Nord, Guam, Papouasie Nouvelle-Guinée, îles Fidji (sur l'un des segments de la dorsale centrale du Bassin Nord-Fidjien, à proximité du point triple de 16°50'S, sur la ride de Peggy dans la partie nord du bassin de Lau, ainsi que près du point triple de Kings (Kings Triple Junction) et le long de la ride de Valu Fa, et dans le bassin de Manus, en Papouasie Nouvelle-Guinée), Salomon, Vanuatu, Tonga, le long des côtes américaines jusqu'aux Galápagos, dorsale de Kermadec (près de la Nouvelle-Zélande), dorsale médio-atlantique, dorsale Centrale Indienne (Cartes de l'AIFM),
- ♣ **pour les encroûtements** : Nouvelle-Calédonie, Polynésie Française, fosse d'Okinawa, arc Izu-Ogasawara (dit aussi Izu-Bonin), îles Marshall, Palaos, Kiribati, Tuvalu, Samoa, Niue, (Cartes de l'AIFM et Hannah, 2012), arc des Kouriles et des Aléoutes, monts sous-marins proches des îles Canaries, de Madère (Peacock et al, 2007) et de l'archipel des Açores (entre 1 200 et 4600m), les régions nord de la mer Baltique, de la mer de Barents et de la mer de Kara.

▲ **pour l'hydrogène : les champs hydrothermaux Kairei (dorsale centrale indienne), Rainbow, Lost City, Logatchev I et II, Ashadze I et II (dorsale médio-atlantique).**

5.4.1. Services support

5.4.1.1 Habitat

Comme nous l'avons vu lors des chapitres précédents, les ressources minérales marines sont liées de manière plus ou moins spécifique à divers habitats : plaines abyssales et fosses sous-marines pour les nodules polymétalliques, sites hydrothermaux pour les sulfures polymétalliques, monts sous-marins profonds. Ces environnements existent dans plusieurs types de fonds océaniques remarquables dans le contexte géophysique global : dorsales océaniques, marges continentales ouvertes, bassins arrière-arcs.

Ces milieux fournissent un abri à de nombreux vertébrés, invertébrés et micro-organismes à fort potentiel économique.

Les fosses océaniques profondes où se trouvent des nodules polymétalliques et des boues métallifères abritent une mégafaune et une endofaune démersale (Ramirez-Llodra et al, 2011). La mégafaune est très diversifiée et très endémique : poissons, holothuries, polychètes, bivalves, isopodes, actiniaires, amphipodes et gastéropodes (Salomidi et al, 2010). Dans l'endofaune se trouvent des micro-organismes uniques (chimolithotrophes et hétérotrophes intervenant dans les cycles des métaux) ayant un grand potentiel biotechnologique.

Autre habitat lié aux nodules : les plaines abyssales. Elles abritent surtout une épifaune et une endofaune sessile et mobile (Ramirez-Llodra et al, 2011). La biodiversité de ces habitats est très peu connue. Cependant, un certain nombre de publications mettent en évidence l'existence d'une flore microbienne associée aux nodules, ce qui laisse espérer la découverte de nouvelles molécules/fonctions/activités utilisables en industrie (Salomidi et al, 2010).

Les dorsales océaniques sont caractérisées par une faune benthique sessile et des communautés pélagiques et démersales localisées (Ramirez-Llodra et al, 2011). Elles regroupent deux structures distinctes aux services écosystémiques propres : les sites hydrothermaux riches en sulfures polymétalliques et les monts sous-marins auxquels sont associés les encroûtements cobaltifères. Les dorsales océaniques procurent des habitats importants et variés à diverses espèces commerciales d'eau profonde, comme les grenadiers et les requins (Salomidi et al, 2010), ainsi qu'à divers cétacés (Cf. tableau 5-12) (Doksaeter et al, 2008; Skov et al, 2008). Outre la pêche, un tourisme spécifique s'est développé autour des cétacés et requins. Ils ont également une grande importance culturelle pour nombre de populations dans le monde.

Tableau 5-12 Cétacés répertoriés le long de la dorsale médio-atlantique (traduit de Doksæter et al, 2008).

Nom commun	Nom scientifique
Rorqual bleu	<i>Balenoptera musculus</i>
Rorqual commun	<i>Balenoptera physalus</i>
Baleine à bosse	<i>Megaptera novaengliae</i>
Rorqual boréal	<i>Balenoptera borealis</i>
Petit rorqual	<i>Balenoptera acutorostrata</i>
Cachalot	<i>Physeter macrocephalus</i>
Baleines à bec	<i>Mesoplodon ssp.</i>
Globicéphale noir/tropical	<i>Globicephala melas/macrorhynchus</i>
Orque ou épaulard	<i>Orcinus orca</i>
Dauphin à flancs blancs	<i>Lagenortynchus acutus</i>
Dauphin à nez blanc	<i>Lagenorhynchus albirostris</i>
Dauphin bleu et blanc	<i>Stenella coeruleoalba</i>
Dauphin commun	<i>Delphinus delphis</i>

Ces observations ont bien été faites au niveau du fond. Les profondeurs ont été précisées pour quatre espèces (Doksæter et al, 2008):

- les dauphins bleus et blancs ont été observés à une profondeur médiane de 2869,35 m (intervalle: 1841-3479 m)
- les dauphins communs ont été vus à une profondeur médiane de 3154,09 m (intervalle de confiance : 2145-3872 m)
- les globicéphales ont été vus à une profondeur médiane de 2106,35 m (intervalle : 676-3818 m)
- les dauphins à flancs blancs ont été observés à une profondeur médiane de 2280,56 m (intervalle : 1435-2834 m)

Les encroûtements cobaltifères sont situés sur les pentes des monts sous-marins ou à proximité. Ces monts sous-marins sont des points chauds de biodiversité car ils délimitent des environnements distincts et offrent un habitat à une grande variété d'espèces benthiques sessiles et pélagiques (Ramirez-Llodra et al, 2011). Cela est particulièrement vrai pour les récifs de coraux d'eau froide ou les lits de gorgones et de coraux noirs, qui procurent des microhabitats très riches en biodiversité, comme le sont les récifs coralliens tropicaux à faible profondeur (Salomidi et al, 2010; Chapitre 4). Ces récifs de coraux froids abritent aussi de nombreuses espèces commerciales de poissons, notamment les sébastes, l'empereur, la lingue... (Armstrong et al, 2010). Ce sont des zones de très fort endémisme et qui s'accompagnent d'un fort taux de spéciation de la faune.

Les monts sous-marins créent également les conditions environnementales adéquates pour la reproduction de nombreuses espèces de poissons pélagiques ou démersaux, comme l'hoplostèthe orange (*Hoplostethus atlanticus*, nom commercial : « empereur »), le grenadier de roche (*Coryphaenoides rupestris*), le béryx long (*Beryx splendens*) le sonneur commun (*Epigonus telescopus*). Ces espèces en particulier, à forte valeur commerciale, fraient au niveau des monts sous-marins de l'Atlantique Nord. (Menezes et al, 2009).

Les monts sous-marins contribuent souvent à maintenir les stocks de poissons démersaux et pélagiques en leur offrant habitat, nourriture et site de reproduction (Salomidi et al, 2010). La destruction de ces habitats risque donc d'impacter les stocks halieutiques. Il ne semble pas y avoir eu d'études d'impact de l'exploitation des encroûtements sur le sujet. Par contre, on trouve des travaux sur les impacts du chalutage sur les grands fonds, assez destructeur de l'habitat, pour ces milieux (Puig et al, 2012).

La biodiversité des sites hydrothermaux présente un fort taux d'endémisme du fait du haut degré de spécialisation et d'adaptation (Salomidi et al, 2010; Ramirez-Llodra et al, 2011). Ils comprennent notamment une très grande diversité de bactéries chimioautotrophes, qui sont au cœur de la chaîne trophique.

Ces habitats et leur disponibilité, dont découlent ainsi la survie de nombreuses espèces et donc des services qu'elles peuvent rendre sont les premiers à être impactés par une exploitation des ressources minérales profondes. Bien que la technologie d'exploitation ait beaucoup évolué depuis les années 70, périodes des premiers tests et essais d'exploitation, **la destruction, au minimum partielle, est inévitable, mais les connaissances manquent pour évaluer l'étendue des conséquences de ce type d'impact sur l'économie.**

5.4.1.2. *Cycle des nutriments*

Les écosystèmes marins profonds interviennent dans les différents cycles des nutriments mais leur rôle exact est très peu connu. A la base de ce service écosystémique, se trouvent principalement les micro-organismes qui gouvernent les cycles biogéochimiques dans l'océan.

Dans son article sur les services écosystémiques rendus globalement par le milieu marin profond, Armstrong se réfère à la définition donnée par Costanza et coll. en 1997.

Celui-ci définit le cycle des nutriments de la manière suivante : il s'agit de prendre en compte le stockage, le recyclage, la transformation et l'acquisition des nutriments.

Les principaux cycles biogéochimiques sont les cycles du carbone, de l'oxygène, du phosphore, du l'azote, du soufre, de l'azote, du fer, du potassium, du calcium, du magnésium (Armstrong et al, 2010), du manganèse...

Les cycles des nutriments ont à la fois un rôle de support car ils nourrissent les « ressources vivantes » qui constituent un service d'approvisionnement, comme les poissons à valeur commerciale, et un rôle de régulation, en ce sens que la disponibilité en nutriments régule la productivité primaire et secondaire de l'écosystème. Si ces cycles opèrent également dans les grands fonds, leur potentiel de régulation est moins bien identifié. Les bactéries et les archées chimiosynthétiques utilisent l'hydrogène, le méthane, le sulfure d'hydrogène, le manganèse ou le fer pour fixer le carbone inorganique et produire de la biomasse. Dans les habitats pauvres en oxygène ou anoxiques, en particulier, ces micro-organismes peuvent avoir un rôle de détoxification du milieu en oxydant les sulfures ou les métaux sous forme dissoute comme le fer et le manganèse dont les formes oxydes précipitées adsorbent les métaux lourds (Armstrong et al, 2012).

A l'échelle de l'ensemble des environnements marins, les micro-organismes assurent la majeure partie de la respiration des écosystèmes et de la régénération des nutriments (Armstrong et al, 2012). L'Angleterre a calculé que, dans ses eaux, les cycles des nutriments pèsent 800-2,320 milliards de livres (Heip et al, 2009). **Ces processus microbiens des sédiments de l'océan profond, contribuent peu au recyclage nécessaire à la production primaire de la zone photique des océans qui a lieu principalement dans les couches de surface de l'océan. Cependant, ils jouent un rôle encore mal quantifié à l'échelle des grands cycles globaux.** A l'échelle régionale, les environnements particuliers que constituent les dorsales et les monts sous-marins où sont rencontrés certaines accumulations de ressources minérales sont aussi des « hot-spots » de productivité et donc de recyclage des éléments

majeurs : carbone, azote, soufre, phosphate, fer. Certaines études suggèrent qu'une perturbation locale de la biodiversité marine peut entraîner une réduction exponentielle des fonctions des écosystèmes marins profonds (Armstrong et al, 2012). **Cette spécificité des milieux benthiques mérite une attention particulière en milieu profond car il n'est pas possible d'estimer les impacts potentiels sans comprendre ces relations biodiversité-fonctions.**

Sans les processus microbiens du marin profond, la production primaire de la zone photique des océans finirait par décliner et une perte de la biodiversité marine profonde risque d'entraîner une réduction exponentielle des fonctions des écosystèmes marins profonds, y compris la régénération des nutriments (Armstrong et al, 2012).

Reeburgh a résumé dans le tableau de synthèse ci-après les tailles et le "turn-over" des différents réservoirs pour les principaux nutriments.

Tableau 5-13 Taille des réservoirs et temps de "turn-over" des éléments biologiquement actifs (Reeburgh, 1997).

Element	Quantity	Turnover time (yr)	
Carbon (10^{15} g C)			
Sediments, rocks	77×10^6	$\gg 10^6$	
Deep ocean (DIC)	38000	2000	
Soils	1500	$< 10-10^5$	
Surface ocean	1000	decades	
Atmosphere	750	5	
Deep ocean (DOC)	700	5000	
Terrestrial biomass	550-680	50	
Surface sediments	150	0.1-1000	
Marine biomass	2	0.1-1	
Oxygen (10^{15} mol O_2)			
Sedimentary rocks		10^6	
Atmosphere	37000	3×10^6	
Long-lived biota	180	1000	
Ocean	219	500	
Biota	11	50	
Surface ocean	6	22 days	
Nitrogen (10^{12} g N)			
Atmosphere (N_2)	4×10^9	10^7	
Sediments	5×10^8	10^7	
Ocean (dissolved N_2)	2.2×10^7	1000	
Ocean (inorganic)	6×10^5		
Soil	3×10^5	2000	
Terrestrial biomass	1.3×10^4	50	
Atmosphere (N_2O)	1.4×10^4	10^2	
Marine biomass	4.7×10^2		
Sulfur (10^{12} g S)			
Lithosphere	2×10^{10}	10^8	
Ocean	3×10^9	10^6	
Sediments	3×10^8	10^6	
Soils	3×10^5	10^3	
Lakes	300	3	
Marine biota	30	1	
Atmosphere	4.8	8-25 days	
Phosphorus (10^{12} g P)			
Sediments	4×10^9	2×10^8	
Land	2×10^3	2000	
Deep ocean	8.7×10^4	1500	
Terrestrial biota	3000	~50	
Surface ocean	2700	2.6	
Atmosphere		0.028 days	
Water			
	Vol. (10^3 km ³)	Percentage	Turnover time (yr)
Oceans	1,370,000	97.61	37,000
Polar ice, glacier	29,000	2.08	16,000
Groundwater	4000	0.29	300
(actively exchanged)			
Freshwater lakes	125	0.009	10-100
Saline lakes	104	0.008	10-10,000
Soil moisture	67	0.005	280 days
Rivers	1.32	0.005	12-20 days
Atmospheric water vapor	14	0.0009	9 days

L'océan profond contient 38 000 Pg de carbone inorganique, 219 Pg d'oxygène et 87 Pg de phosphate. Il constitue le principal emplacement de stockage du carbone (Reeburgh, 1997).

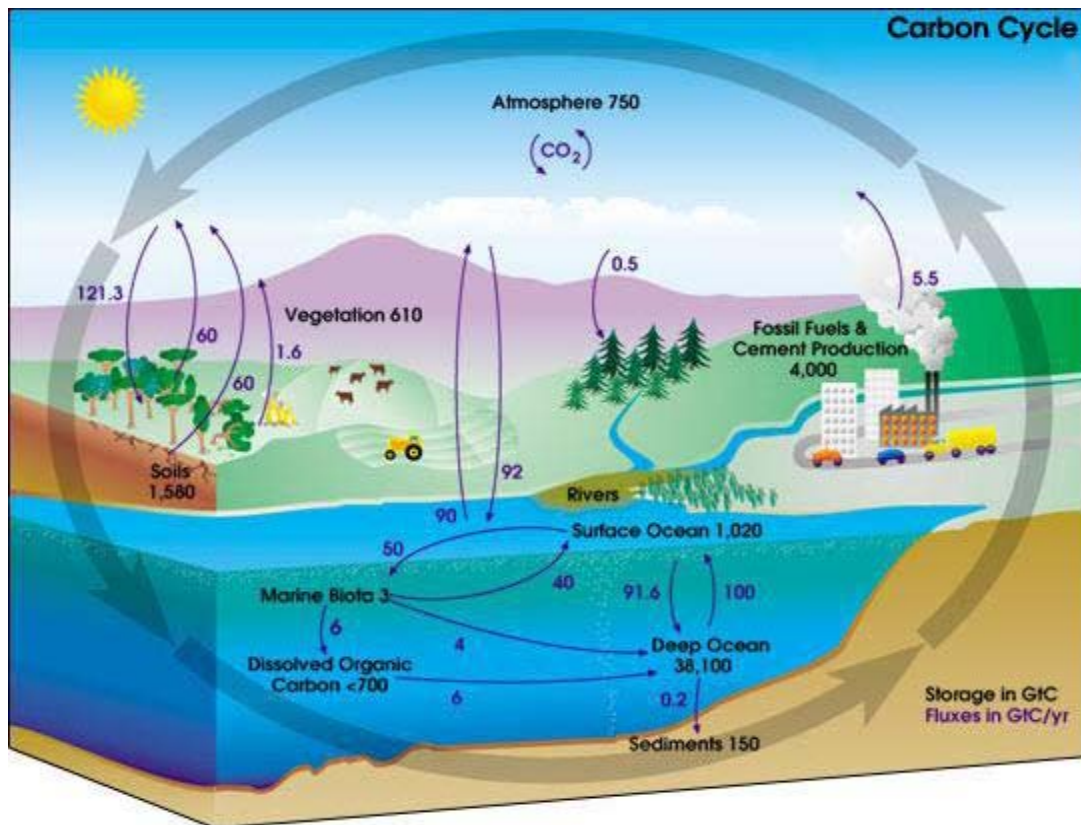


Figure 5-18 Cycle du carbone (Armstrong et al, 2010).

Ce schéma illustre le stockage et les échanges annuels de carbone entre l'atmosphère, l'océan et la lithosphère en gigatonnes de carbone (GtC). Les flèches en noir correspondent aux quantités de carbone stockées et les flèches en violet au flux annuels de carbone.

Le rôle de régulateur du carbone océanique par les micro-organismes en grande profondeur est un autre type de service à considérer. Le taux annuel de méthanogénèse est également estimé entre 85-300 Tg CH₄ pour le plancher océanique (qui couvre plus de 70% de la surface de la terre). Les micro-organismes des sédiments profonds océaniques consommeraient 90% de ce méthane. L'oxydation en conditions anaérobies du méthane permet alors de réguler efficacement le flux de méthane atmosphérique provenant de l'océan (Rapport de la Convention sur la Diversité Biologique, 2007).

Ce processus concerne cependant essentiellement les marges continentales, où la sédimentation de carbone organique est importante et produit par reminéralisation du méthane, ou les sédiments qui renferment des formes fossiles de carbone organique et de fortes concentrations en méthane. **Les régions ciblées par les activités minières ne sont pas particulièrement riches en matière organique, à l'exception des hotspots de productivité sur les flancs des monts-sous-marins ou à proximité de champs hydrothermaux actifs. Seuls les systèmes hydrothermaux qui prennent place dans des roches dites « ultramafiques » sont associés à des émissions importantes de méthane et abritent des communautés microbiennes méthanotrophes capables de le dégrader.**

Les écosystèmes, et tout particulièrement ceux des sources hydrothermales, sont source de carbone organique (Van Dover, 2000; Arico and Salpin, 2005; Leary, 2009). Ainsi Roth et Dymond, en 1989, estimaient qu'à moins de 21 m de la cheminée hydrothermale, 95% du flux total de carbone organique mesuré avait une origine chimiosynthétique. Ils constatent que 62% de ce flux avait encore une origine chimiosynthétique à 100-200 km au-dessus du sol et à environ 2 km du champ hydrothermal (Roth and Dymond, 1989).

Le carbone sous forme de composés organiques dissous ou de colloïdes intervient aussi dans les cycles d'autres éléments. C'est en particulier le cas du fer : le carbone organique stabilise le fer dissous au niveau des cheminées hydrothermales en formant des complexes avec les ions Fe^{2+} (Bennett et al, 2008; Toner et al, 2009). Ce fer provient pour une part non négligeable des cheminées hydrothermales. Les cheminées hydrothermales pourraient ainsi générer 12 à 22 % du fer dissous dans l'océan profond (Bennett et al, 2008).

Une partie de ce fer dissous se transforme en oxydes de fer et ces oxydes de fer, à leur tour, à proximité des cheminées hydrothermales, immobilisent entre 5 et 40% du phosphate total dissous dans les océans. Or ce phosphate est essentiel à la croissance du phytoplancton (Wheat et al, 1996). Les sources principales de fer sont la dissolution de la ferrihydrite et la diagenèse de la matière organique (Poulton and Canfield, 2006).

Le fer est également une des ressources limitantes de la production primaire. Saito et coll. confirment les travaux précédents sur les dorsales lentes, identifiées comme nouvelle source non-négligeable dans le bilan de fer océanique (Saito et al, 2013). Les impacts locaux ou régionaux sur le cycle du fer engendré par l'exploitation des sulfures, notamment, sont donc à considérer au regard des sources naturelles de cet élément en contexte hydrothermal actif.

Les cheminées hydrothermales rejettent aussi dans leur environnement un grand nombre d'autres éléments métalliques (Bennett et al, 2011), le manganèse étant le plus abondant d'entre eux, après le fer (Klinkhammer and Hudson, 1986; Campbell et al, 1988). Ce manganèse, que l'on trouve dans les sédiments métallifères et dans l'eau (sous forme ionique $Mn(II)$) à proximité des fumeurs, provient en partie des émissions des cheminées hydrothermales. Il est ensuite oxydé et précipité par les micro-organismes à proximité, plus ou moins rapidement (Dick, Lee and Tebo, 2006). Ce processus participe de manière importante à la formation des dépôts métallifères (Campbell et al, 1988; Tebo et al, 2004), que ce soit sur les dorsales ou dans les bassins arrière-arcs (Dick, Lee and Tebo, 2006).

La formation des encroûtements de manganèse résulte également de l'activité des communautés microbiennes ayant colonisé la surface des roches basaltiques des monts sous-marins et au niveau des jeunes dorsales actives (travaux d'Alexis Templeton, 2005 et 2009; d'Hondt, 2004; Santelli, 2008 et 2009; Knowles, Wirth and Templeton, 2012).

Les travaux de Campbell et coll. en 1988 sur la géochimie du manganèse dans le bassin de Guaymas ont montré que le manganèse dissous restait une semaine dans la colonne d'eau, avant d'être précipité en particules de 2 à $5\mu m$, qui forment des panaches hydrothermaux. Le cas du bassin de Guaymas n'est pas généralisable, les taux de précipitation de manganèse y sont particulièrement importants (Dick et al, 2009). Ainsi sur la dorsale Est-Pacifique, la précipitation du manganèse dissous par les bactéries prend plus de temps (Dick et al, 2009).

L'analyse par Dick, Lee et Tebo de la communauté microbienne du bassin de Guaymas a montré que les espèces bactériennes oxydantes de manganèse cultivables sont majoritairement des *Bacillus*.

L'implication des micro-organismes chimiotrophes dans les cycles des nutriments est considérée à l'échelle du compartiment marin profond dans son ensemble (Armstrong et al, 2010). Il est donc très difficile d'estimer dans quelle mesure ils peuvent être, en tant que services proprement dits, impactés par les opérations minières. Il est possible que ces impacts restent localisés et compensés à l'échelle régionale ou globale par les processus naturels, sans qu'il soit possible d'exclure que la perturbation engendre un déséquilibre de l'écosystème. **La taille et le nombre des exploitations constituent un facteur important dans cette évaluation.**

5.4.1.3. *Influence des écosystèmes profonds sur les réseaux trophiques*

Les panaches hydrothermaux, en particulier, sont à la base des réseaux trophiques locaux en soutenant les communautés de zooplancton supérieures.

La production secondaire au niveau des dorsales océaniques est maintenue par une production primaire en augmentation, associée aux processus frontaux dans la partie supérieure de la colonne d'eau (Skov et al, 2008; Doksaeter et al, 2008 en parlant de la dorsale médio-atlantique). Cette production secondaire soutient une chaîne trophique dont font partie diverses espèces commerciales de poissons, de céphalopodes et de crustacés et d'autres espèces à valeur culturelle (cétacés).

La forte concentration de poissons (y compris les espèces commerciales telles que le thon) au niveau des monts sous-marins peut s'expliquer, entre autres hypothèses, par l'amélioration autochtone de la productivité primaire et le transfert ascendant d'énergie du fond aux niveaux trophiques supérieurs.

Un modèle du réseau trophique général au niveau des monts sous-marins est décrit dans la figure 5-19 ci-dessous.

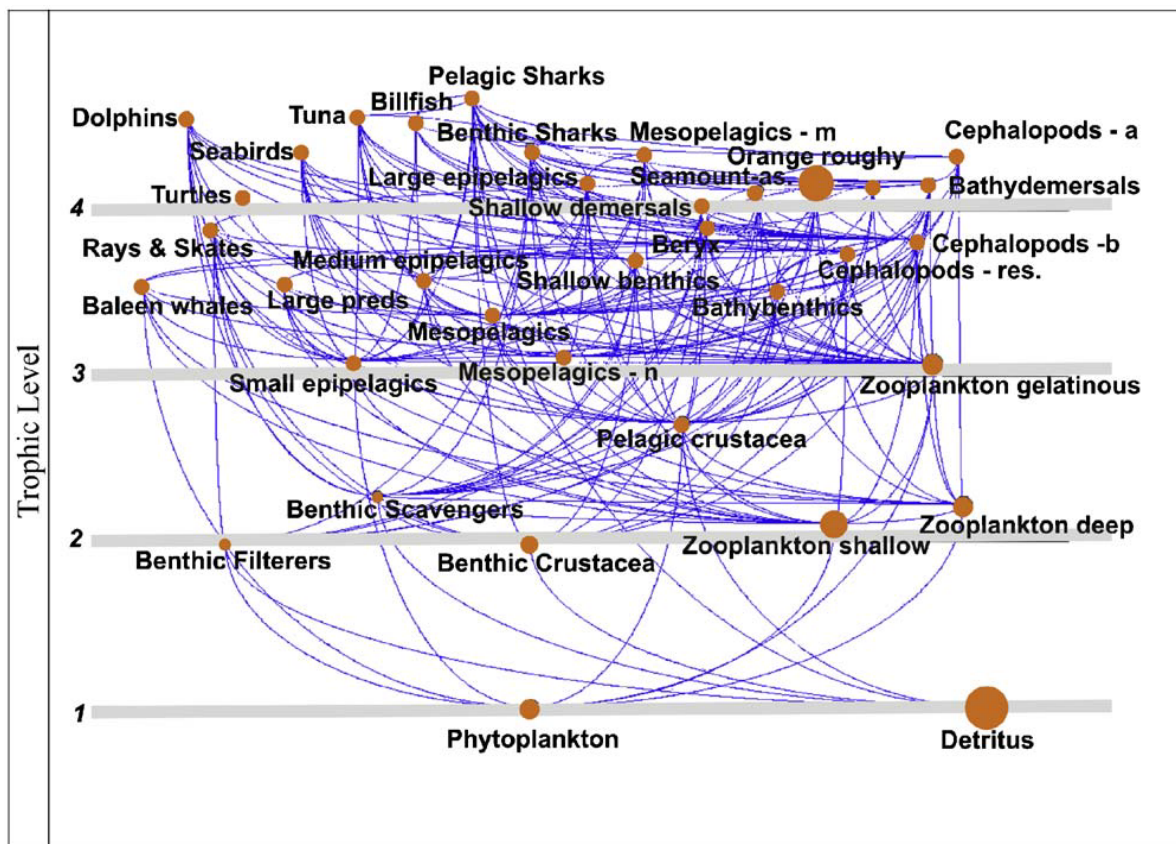


Figure 5-19 Modélisation du réseau trophique au sein d'un écosystème de mont sous-marin (Morato, 2009).

L'aire des nœuds est proportionnelle à la biomasse de chaque groupe.

5.4.1.4. Services support de nature abiotique

Les services mentionnés ci-après ne sont pas, à proprement parler, rendus par la biodiversité des grands fonds. Cependant il est intéressant de les mentionner car ils pourraient constituer des obstacles au lancement d'une exploitation minière dans certains territoires.

Transport d'informations et d'énergie par les câbles sous-marins

Les fonds marins sont de plus en plus colonisés par les câbles sous-marins qui alimentent les îles en courant depuis les parcs éoliens offshore ou assurent des services de transmission de données.

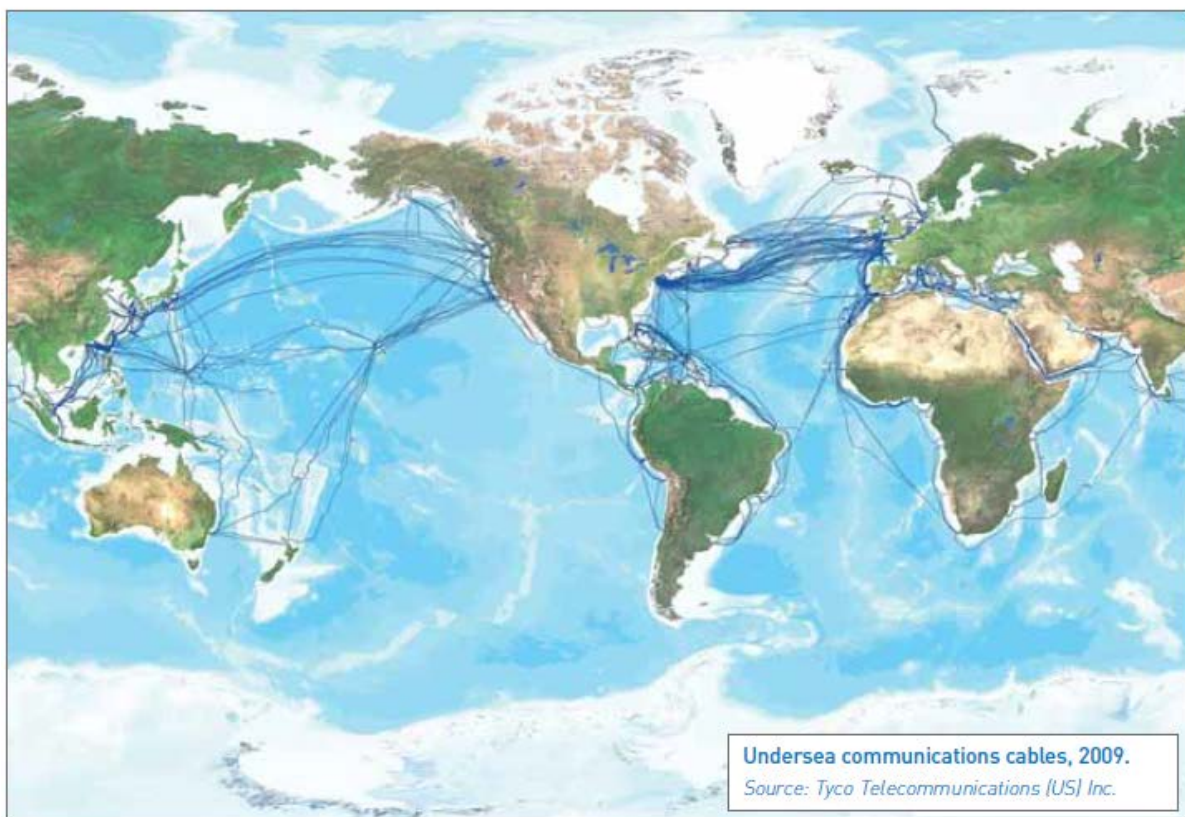


Figure 5-20 Carte du réseau mondial de câbles sous-marins (Carter et al, 2009).

En terme d'information écrite, les sociétés de télécommunication confirment que l'on peut trouver des câbles à plusieurs milliers de mètres (site de la société Ericsson), jusqu'à au moins 8 300 m de profondeur (description de l'activité câblière sur le site d'Orange Marine).

Ce service est notamment très important en Nouvelle-Zélande, où ces câbles représentent 90% des services de télécommunication du pays avec l'international (Rapport du Ministère pour l'Environnement de Nouvelle-Zélande, 2005).

Les minéraliers ne chercheront probablement pas à obtenir des autorisations d'exploitation des ressources à proximité des réseaux de communication, mais nous ne savons toutefois pas à quelle distance devront se situer les exploitations minières pour ne pas endommager les câbles ou perturber le transport de données.

En l'occurrence, nous pensons notamment à la fois à un impact possible des vibrations engendrées par les engins d'exploration et d'exploitation et à la fois au niveau même de l'exploration fine des zones potentiellement intéressantes.

En effet, à faible et moyenne profondeurs, les câbles peuvent être protégés soit par enfouissement dans le sédiment, soit grâce une armature métallique (comme c'est le cas dans les zones de pêche au chalut). Cependant, cela n'est pas faisable à plus de 1000-1500 m de profondeur, et ils sont simplement posés sur les fonds.

Notons qu'en cas d'endommagement, le temps de la réparation est estimé entre 3 et 10 jours sur place, sans compter les jours de transit pour se rendre sur le site. Entre la location du bateau, de l'équipage, des techniciens, les pièces et la quantité de câble à changer, les frais de réparation globaux sont estimés à environ 45 000 euros par jour. Il s'agit ici d'une estimation très générale, les coûts de réparation pouvant varier en fonction de la zone géographique, du type de câble, etc. (informations du 15 octobre 2013 communiquées par une source industrielle ayant souhaité rester confidentielle).

Cette problématique est particulièrement centrale dans l'hypothèse d'une exploitation des ressources minérales de la dorsale médio-atlantique et dans le Pacifique.

Notons également qu'à proximité des îles, des réseaux de câbles ne servent pas aux télécommunications mais à transporter de l'énergie (électricité).

Rôle-clé des cascades d'eau dense sur les plateaux dans le maintien de la productivité des écosystèmes

Les cascades d'eau dense sont des phénomènes transitoires. Elles se produisent lorsque les conditions climatiques occasionnent le refroidissement de grandes masses d'eau en surface tout en augmentant leur salinité. Cela crée des gradients de température qui engendrent eux-mêmes des gradients de densité, induisant à leur tour des écoulements d'« eau dense » par gravité (Ivanov and Shapiro, 2005). Elles peuvent en théorie se former n'importe où, mais sont surtout identifiées dans les régions polaires, entre autres dans la mer de Barents et dans le nord du golfe de Californie (Ivanov et al, 2004) ou encore en Méditerranée (Canals et al, 2006).

Les courants sous-marins, qui sont évalués normalement à quelques centimètres par secondes, peuvent atteindre des vitesses proches d'1m/s, transportant brutalement, en quelques semaines, des centaines de mètres cube d'eau et des centaines de milliers de tonnes de carbone organique à plus de 2 400 m de profondeur (Canals et al, 2006).

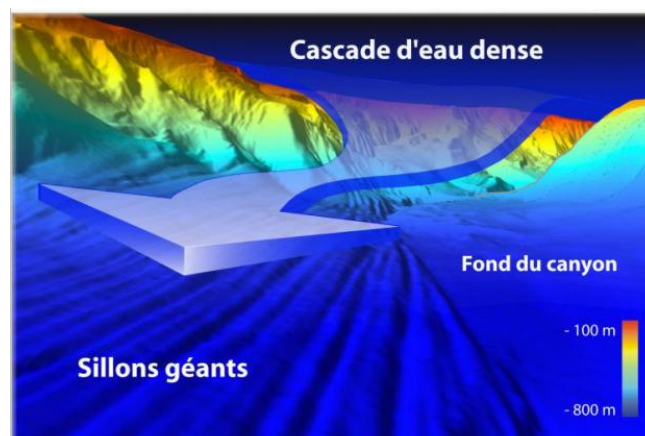


Figure 5-21 Schéma du passage d'une cascade d'eau dense dans le canyon du Cap Creus.
 (Sources : Image fournie par l'Université de Barcelone et le Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens (CEFREM) de l'Université de Perpignan; source traduction : communiqué de presse CNRS, 2006).

Ces cascades contribuent à la ventilation des eaux intermédiaires et profondes. Elles creusent des sillons géants, modifiant le fond marin au cours du temps par érosion et par apport de sédiments. Elles transportent aussi efficacement la matière organique accumulée dans les sédiments du plateau continental vers la pente et le bassin, transformant ainsi des zones « désertes » en « oasis » grâce à un fort apport de matière organique fraîche. (Canals et al, 2006; Reeburgh, 2007; Armstrong et al, 2010; Pusceddu et al, 2013). Mais ces cascades transportent aussi, et avec la même efficacité, les polluants terrigènes.

Ce phénomène a également été constaté le long de l'arc Izu-Ogasawara jusqu'à la dorsale et l'Est du bassin des Mariannes, où ont été localisés des encroûtements cobaltifères, ou encore en Nouvelle-Zélande (Micallef et al, 2012) ainsi qu'en Antarctique (Shapiro, 2003).

L'activité minière n'aura pas d'influence sur ce phénomène. Par contre, l'inverse est probable. Les auteurs du chapitre 3 sur les technologies ont souligné la sensibilité des systèmes de remontée de nodules rigides aux conditions météorologiques et océaniques. Il est très peu probable que l'on rencontre ce type de phénomène dans les champs de nodules, trop profonds. Par contre, **les systèmes miniers utilisés pour l'exploitation des autres ressources (encroûtements s'ils sont également équipés de « risers » rigides, pourront présenter une certaine fragilité. Les cascades d'eau dense pourraient également influencer sur le transport des particules générées par l'activité minière :** ces particules pourraient parcourir ainsi de plus grandes distances en peu de temps et donc se redéposer plus loin, étendant ainsi la zone d'impact.

Transport de matière

Les canyons ont une fonction de transport de grandes quantités de sédiments et de matière organique des côtes jusqu'aux zones marines profondes (Canals et al, 2006; Armstrong et al, 2012). Ils jouent un rôle crucial dans la redistribution du carbone et des matériaux d'origine humaine, dérivés de la production primaire marine et de l'écoulement terrestre (Koslow, 2007). Gulin et coll. (2013), par exemple, décrivent la connexion établie par le canyon Dnepr entre la zone photique et la plaine abyssale de la Mer Noire et ouvrent leur conclusion sur la possibilité d'une interaction du canyon Dnepr et les exploitations potentielles de pétrole et de gaz.

Il existe également des phénomènes de coulées de débris sous-marins. Dans les domaines volcaniques, ce phénomène peut prendre une ampleur non négligeable. Urgeles et coll. (1997), par exemple, décrivent entre autres un écoulement de 400 m³ de sédiments, dû à une rupture à la base de la pente de l'île El Hierro (Canaries), entre 3200 et 3700 m de profondeur (Urgeles et al, 1997).

Comme les cascades d'eau dense, les apports massifs de matière organique ne sont pas un service rendu par les milieux potentiellement exploitables, mais sont susceptibles d'influencer les conditions d'exploitation.

5.4.2. Services d'approvisionnement

5.4.2.1. Les pêcheries d'eau profonde

La pêche en mer profonde est encore mal définie. Elle concerne les prises faites à partir de 400 m de profondeur, au-delà du plateau continental, d'après la définition du Conseil International pour l'Exploration de la Mer (Dossier d'actualité de l'Ifremer, 2013). Toutefois cette limite semble sujette à discussion. Certains auteurs considèrent que la pêche profonde commence à partir de 200 m (IUCN, 2009; FAO, 2013), 250m (Norse et al, 2012), 500m (Weaver et al, 2011)... Beaucoup ne précisent simplement pas la gamme de profondeur. **Nous avons choisi de nous aligner sur la définition donnée par le Conseil International pour l'Exploration de la Mer.**

Les pêcheries d'eau profondes restent sujettes à la polémique depuis quelques années. Notre objectif n'est pas ici de juger ou de préjuger de leur avenir. A l'heure actuelle, ces pêcheries existent. Elles contribuent à l'économie de divers pays. Cette source de revenus est vulnérable face aux impacts environnementaux engendrés par des exploitations minières profondes.

Parmi les milieux marins profonds, certains donnent accès à d'importantes ressources halieutiques : poissons, crustacés, mollusques... Nous nous sommes interrogés sur les conséquences de la destruction des habitats sur les stocks des espèces commercialisées, poissons comme crustacés et céphalopodes, à la fois pour l'habitat de ces espèces elles-mêmes que pour l'habitat de leurs proies habituelles et la destruction directe de ces proies par les outils d'extraction.

Parmi les espèces recherchées, on distingue trois catégories de poissons (Shotton, 2005) :

- les Mésopélagiques : ces espèces occupent la colonne d'eau en dessous de la zone photique et jusqu'à 1000 m de profondeur, comme les poissons-lanternes et les cyclothones. Un grand nombre de ces espèces migre en surface la nuit et descend en profondeur le jour,
- les Bathypélagiques : ils vivent à plus de 1 000 m de profondeur et se sont adaptés à un milieu pauvre en nourriture. Ce sont, par exemple, la baudroie et l'anguille gobeuse,
- les Benthopélagiques : ce sont les espèces exploitées vivant sur ou près du plancher océanique.

Nous retrouvons ainsi, par exemple :

- Entre 400 et 750 m : la lingue franche et la lingue bleue (*Molva dypterygia*) (à titre indicatif, respectivement 2,15 euros et 2,4 euros à la criée pour 1 739 tonnes et 1 549 tonnes respectivement de poissons pêchés en moyenne par an (données de et pour la criée de Lorient sur le site de l'association des Directeurs et Responsables des Halles à Marée de France), le phycis de fond (*Phycis blennoides*), des sébastes (*Sebastes* spp. et *Helicolenus dactylopterus dactylopterus*), les baudroies (vendues 4,87 euros à la criée (données de la criée de Lorient sur le site de l'association des Directeurs et Responsables des Halles à Marée de France) et dans les 22-26 euros le kg, au détail, en tranches, en 2013, (statistiques INSEE en ligne) en métropole, les cardines, vendues au détail dans les 56 euros le kg, ...
- Entre 750 et 1 500-1 700 m : le grenadier de roche (*Coryphaenoides rupestris*) (1 754 tonnes pêchée à raison d'un prix moyen de 2,08 euros à la criée de Lorient (données

de la criée de Lorient) et 2,11 euros le kg pour 1 916 tonnes à la criée de Boulogne sur mer, sa cotation Rungis, pour le mois de juillet s'élève 9,50-10,20 euros le kg), l'empereur (*Hoplostethus atlanticus*), le sabre noir (*Aphanopus carbo*) (1987 tonnes de poissons vendu au prix moyen de 3,52 euros au kg à la criée de Lorient, coté à 5,20 euros en import à Rungis), le brosmme (*Brosme brosme*), la rascasse des profondeurs (*Trachyscorpia critulata echinata*), les beryx (13,50 euros le kg pour le *Beryx decadactylus* ou daurade rose, qu'on trouve dans l'Atlantique et en Nouvelle-Calédonie, cotation Rungis, juillet 2013), le congre (à 3,70 euros le kg, cotation Rungis, juillet 2013) et des petits requins (*Centrophorus squamosus*, *Centroscymnus coelolepis*).

Au-delà de 1 500 m, l'activité de pêche décroît parce qu'elle devient de plus en plus coûteuse (en particulier en raison du temps nécessaire pour que le chalut atteigne et remonte du fond) tandis que l'abondance des ressources décline (Dossier d'actualité de l'Ifremer, 2013). On y trouve quand même des espèces commerciales telles que les sébastes (jusqu'à 2 000 m) (Hamon, 1972), coté pour le poisson entier à Rungis à 6,50 euros/kg (juillet 2013) et vendu au détail en filet à des prix très variables.

Ce sont donc souvent des poissons relativement chers. Ces pêcheries d'eau profonde peuvent jouer un rôle important dans les économies d'un grand nombre de pays concernés par l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

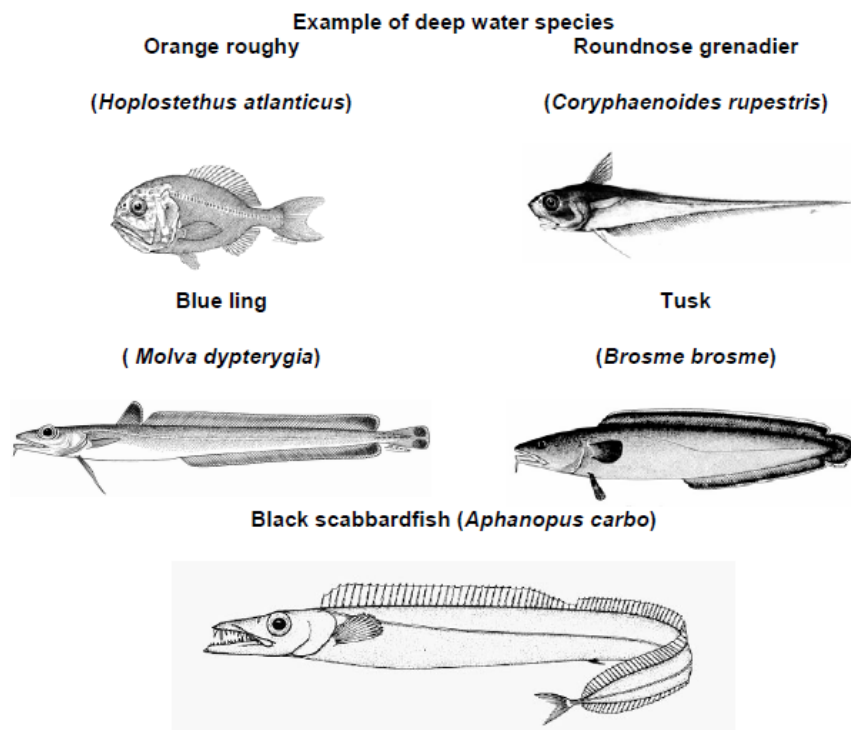


Image Source: FAO

Figure 5-22 Croquis de quelques espèces profondes commerciales (FAO).

Un grand nombre de ces espèces ont une durée de vie longue : 120 ans pour l'hoplostèthe orange, 70 ans pour le grenadier de roche, 25 ans pour la lingue bleue, moins de 15 ans pour le sabre noir... Le grenadier, le sabre et la lingue bleue représentent d'ailleurs 60% des captures des chalutiers de grands fonds. Leur développement est lent et leur capacité de reproduction faible, ce qui oblige à observer un taux d'exploitation très modéré (Ifremer, 2013).

Par contre, on constate une grande variété dans leurs modes de vie (Ifremer, 2012). Les espèces profondes présentent souvent une capacité de résilience faible (Watson and Morato, 2013).

Prenons l'exemple de l'hoplostèthe orange et du grenadier :

Les hoplostèthes oranges se déplacent en bancs denses. Ils se trouvent dans l'Atlantique, l'Océan Indien (Centre et Sud), et le Pacifique Sud, près des monts sous-marins, par exemple, y compris ceux de la dorsale médio-atlantique, et dans les eaux de la Nouvelle-Zélande (UNEP et Census on Marine Life, 2006; FishBase, consulté en 2013). Ils vivent habituellement entre 400 et 900 m mais on les trouve jusqu'à 1 800 m de profondeur (FishBase). Ils se nourrissent de grosses proies : grandes crevettes, céphalopodes, poissons. Ils atteignent 6 kg à maturité. Cette espèce est aussi exploitée au sud et à l'est de l'Australie, au sud de Madagascar et au large de la Namibie et du Chili.

Les grenadiers, par contre, vivent dispersés sur le fond marin, jusqu'à 2 800m de profondeur, (FishBase consulté en 2013) et chassent de petits animaux : crustacés et poissons. Ils font jusqu'à 2 kg. Leur durée de vie moyenne est de 60 ans.

Les hoplostèthes oranges semblent donc plus vulnérables face à la diminution de leurs proies habituelles, dans le cas où la destruction de l'habitat serait telle, qu'elle engendrerait une perte importante au sein de la faune locale.

Les petits requins pèsent 5 à 15 kg selon les espèces et atteignent, pour les plus gros, jusqu'à 1,20 m. Ils se nourrissent des nombreuses espèces de la pente continentale qui sont trop petites pour être commercialisées. *Centroscymnus coelolepis*, par exemple, vit habituellement entre 400 et 2 000 m mais on en trouve jusqu'à 3 700 m (FishBase consulté en 2013). Cette espèce est présente en Nouvelle Zélande, et plus généralement dans l'Atlantique, le Pacifique Ouest et Océan Indien Ouest.

Les pays exploitants sont principalement la France, la Grande-Bretagne, l'Irlande et l'Espagne (Ifremer, 2012). Cette pêche est aussi pratiquée par les flottes côtières traditionnelles portugaises (Parlement européen, 2012).

En 2000, les seuls chalutiers français avaient pêché 25 000 tonnes de poissons des profondeurs. Toutefois, la réglementation des pêches profondes a depuis imposé des quotas plus réduits, afin de préserver les stocks (Ifremer, 2012).

Un certain nombre de dorsales et de monts sous-marins sont exploités dans le cadre de la pêche profonde.

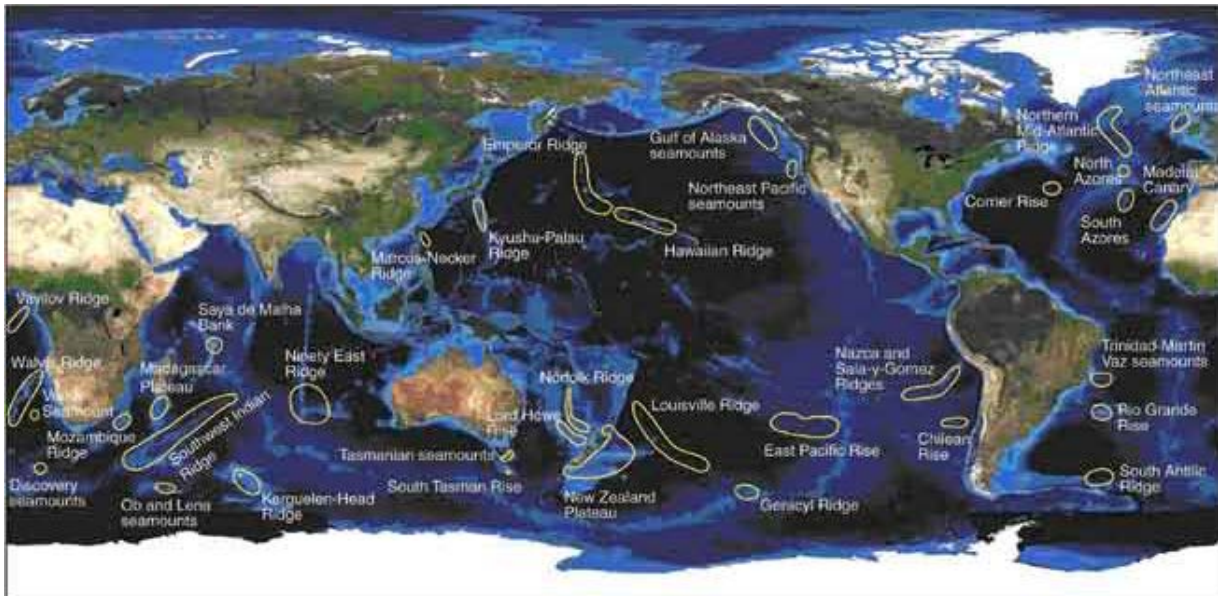


Figure 5-23 Sites de pêche profonde.

Cette carte montre la distribution des principales pêcheries sur les monts sous-marins et les dorsales dans les eaux nationales et internationales (IUCN, 2007).

Exemple des pêcheries de la dorsale médio-atlantique

La dorsale médio-atlantique constitue une zone de pêche très importante. Elle est divisée en deux régions :

- la région centrale et le nord de la dorsale (de l'Islande aux Açores), exploités par des pêcheries industrielles océaniques,
- et la Zone Economique Exclusive des Açores qui fait l'objet de pêche artisanale. (ICES, 2012). Dans les Açores, les pêcheurs vont chercher le poisson (en particulier la daurade rose) à plus de 1 000 m de profondeur, au niveau des monts sous-marins (ICES, 2012).

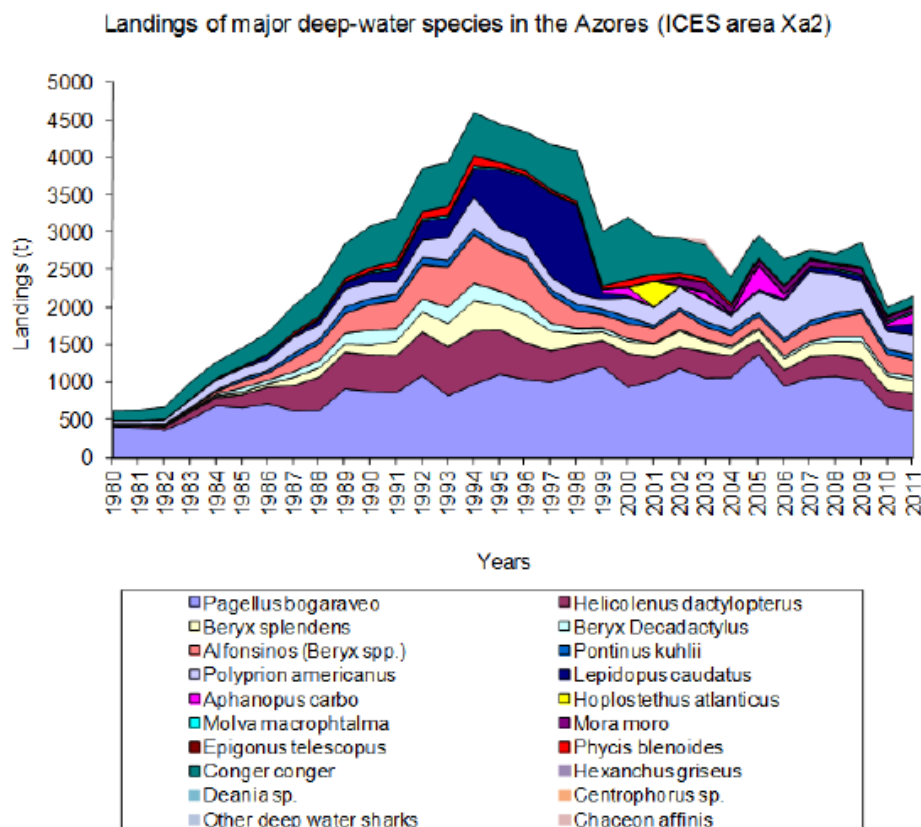


Figure 5-24 Prises annuelles des principales espèces de poissons des grands fonds dans les Açores, par les méthodes de pêche à la palangre et à la ligne (1980-2011) (ICES, 2012).

Dans la région nord de la dorsale médio-atlantique, plus de 40 monts sous-marins ont été répertoriés pour la pêche et abritent notamment le grenadier de roche, le béryx long, l'hoplostèthe orange, le sonneur commun, le brosmes, le sébaste orangé (*Sebastes marinus*) et la lingue bleue. (ICES, 2012).

Tableau 5-14 Résumé des données des pêcheries des monts sous-marins de la dorsale médio-atlantique (ICES, 2012).

Main species	Discovery		No. of commercial seamounts	Maximum catch/yr ('000 t)
	Year	Country		
<i>Coryphaenoides rupestris</i>	1973	USSR	34	29.9
<i>Beryx splendens</i>	1977	USSR	4	1.1
<i>Hoplostethus atlanticus</i>	1979	USSR	5	0.8
<i>Molva dypterigia</i>	1979	Iceland	1	8.0
<i>Epigonus telescopus</i>	1981	USSR	1	0.1
<i>Aphanopus carbo</i>	1981	USSR	2	1.1
<i>Brosme brosme</i>	1984	USSR	15	0.3
<i>Sebastes marinus</i>	1996	Norway	10	1.0

Ces zones sont exploitées par les bateaux russes, islandais, féroïens, polonais, lettons, espagnols... (ICES, 2012).

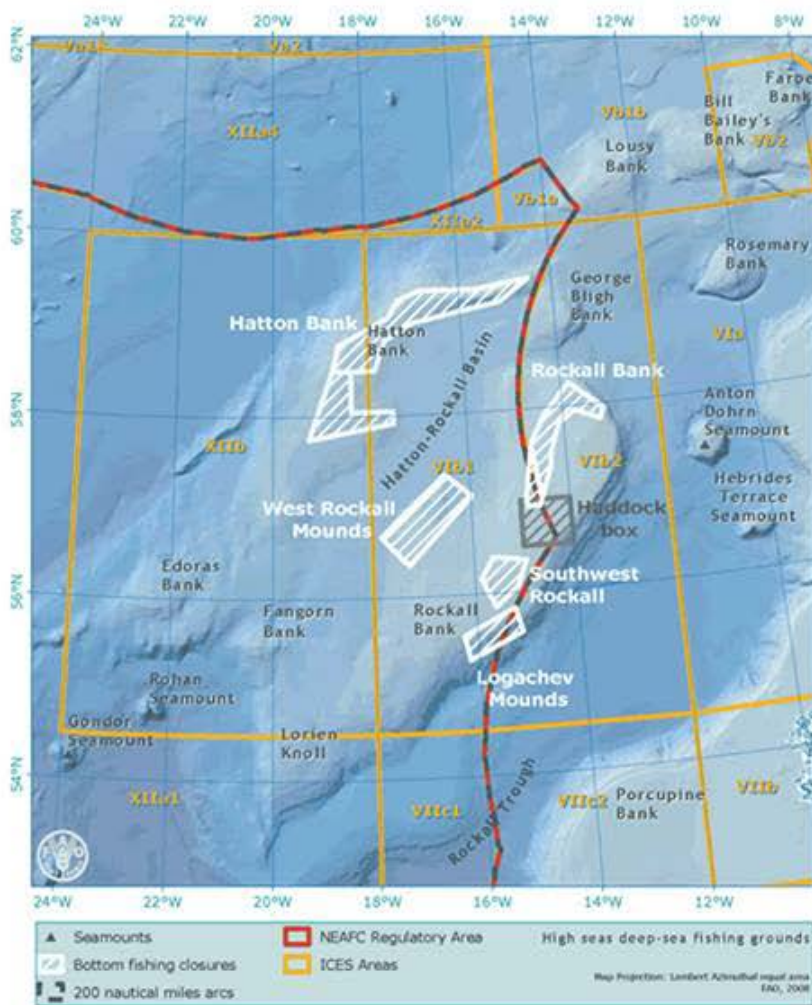
La grande abondance d'espèces commerciales ou commercialisables et de fruits de mer a causé leur exploitation intensive, une exploitation généralement destructrice qui a déjà fragilisé ces écosystèmes. Le sabre noir (*Aphanopus carbo*), la baudroie commune ou lotte (*Lophius piscatorius*), les sébastes (*Sebastes* spp.), le mullet noir (*Alepocephalus bairdii*) (vendu 4,20 euros le kg à Rungis), diverses espèces de requins et des poissons pélagiques comme le thon et l'espadon sont aussi des cibles des pêcheries des monts sous-marins de l'Atlantique Nord-Est (Gubbay, 2000 et 2003; Menezes et al, 2009; liste des dénominations commerciales du Ministère de l'Economie et des Finances consultée en 2013).

Dans l'Atlantique, quelques espèces profondes de crabes (*Chaceon affinis*, par exemple) et de crevettes (*Aristeomorpha foliacea*; *Pandalus borealis*) sont aussi exploitées (Morato et al, 2006; Gordon et al, 2001; Lorange, 2007).

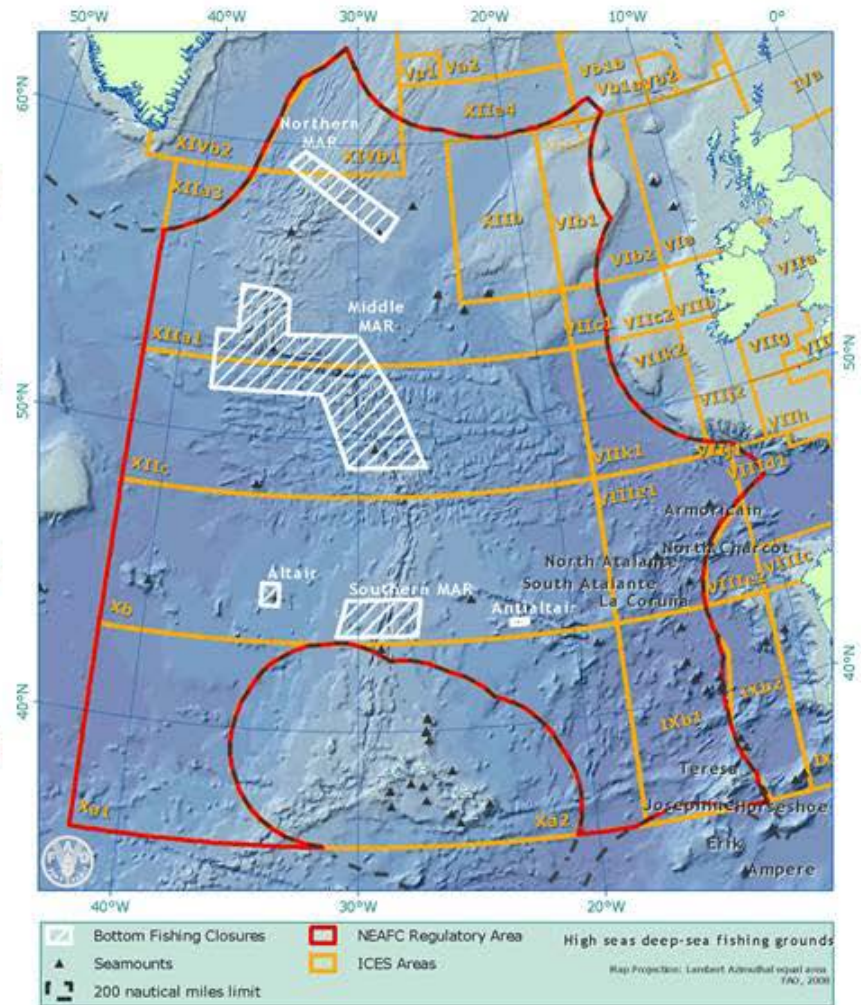
Ces activités de pêche dans l'Atlantique sont réfrénées par l'existence de zones protégées visant à préserver les monts sous-marins, comme le montre la figure 5-25.

Dans le sud de l'Océan Indien, ce sont les monts sous-marins de la dorsale indienne Sud-Ouest et de la ride 90°Est Pacifique qui intéressent l'industrie hauturière pour la pêche au thon.

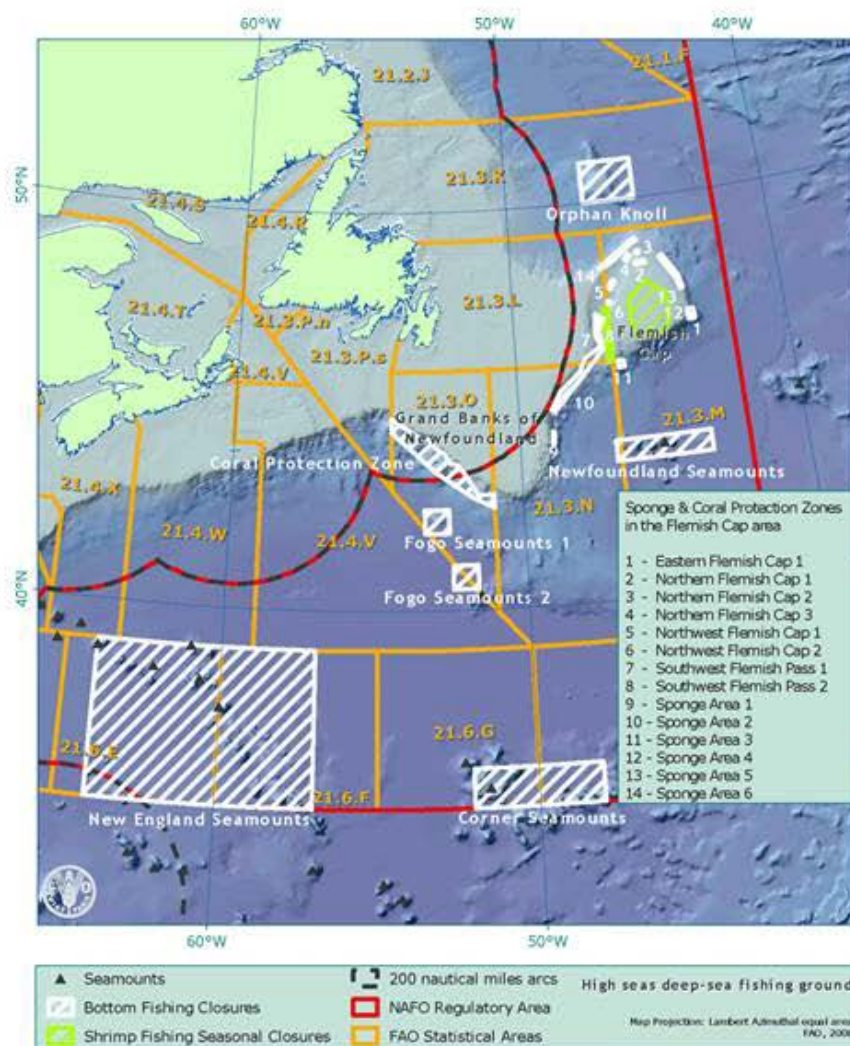
Ces monts ont été classés comme aires protégées benthiques par l'Association des Pêcheries d'Eau Profonde de l'Océan Indien Sud-Ouest (SIODFA) (FAO, 2007-2013), comme le montre la figure 5-26.



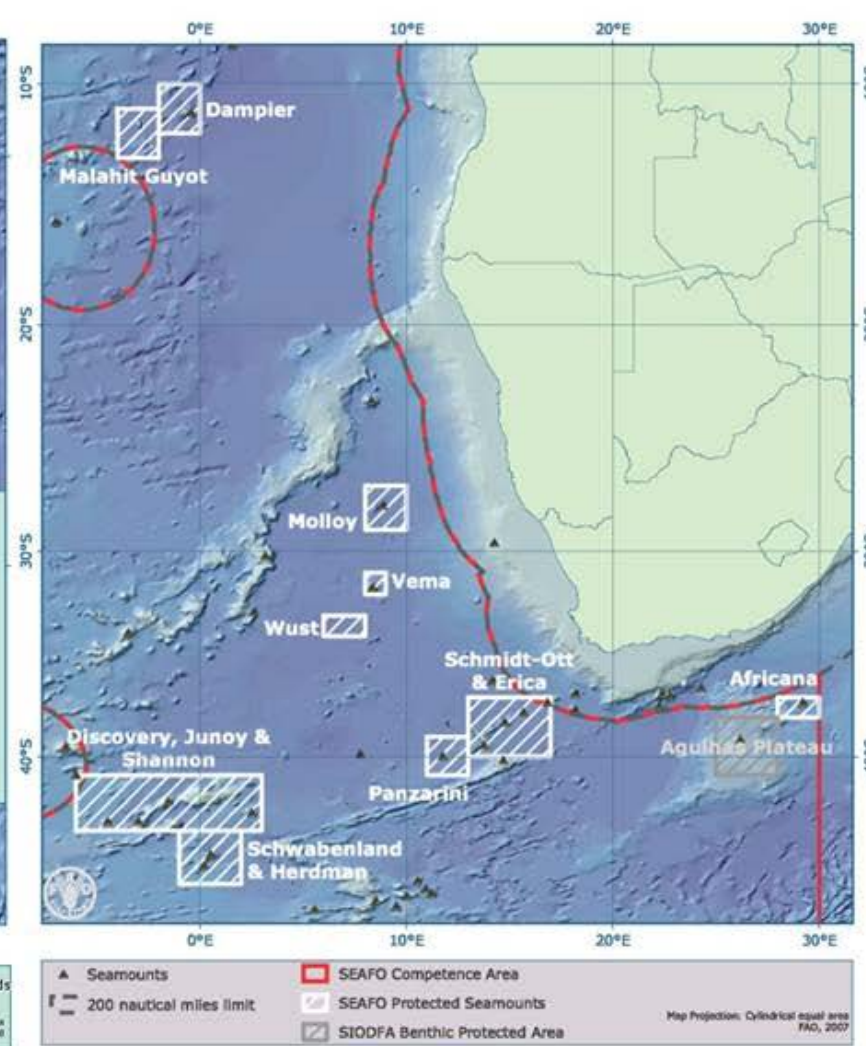
A-a) : Atlantique Nord-Est



A-b) : Atlantique Nord-Est

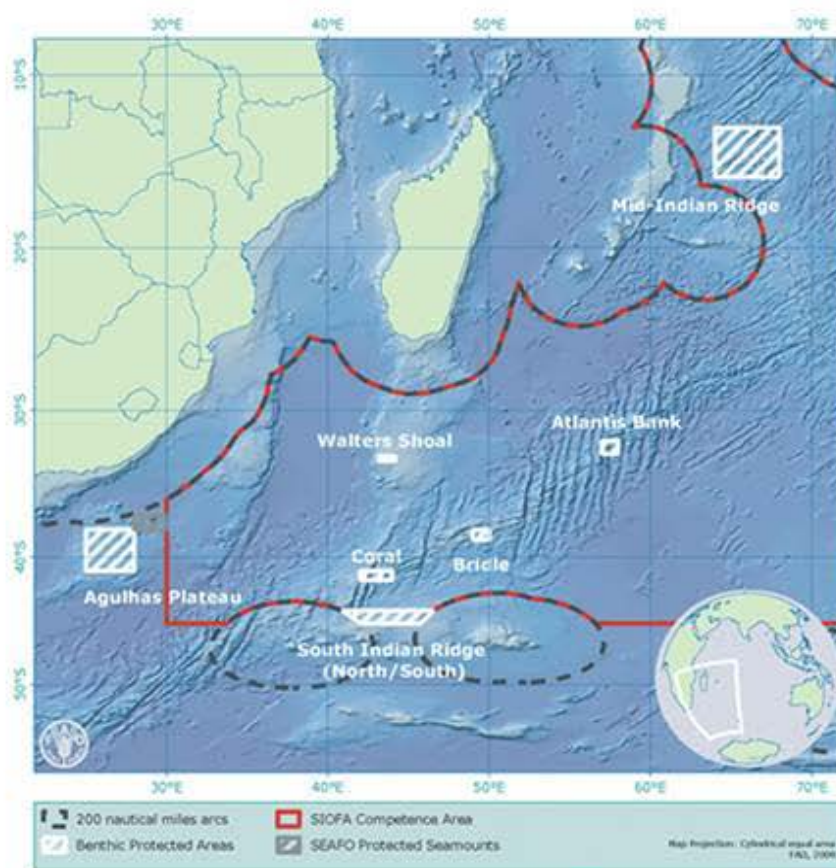


C: Atlantique Nord Ouest

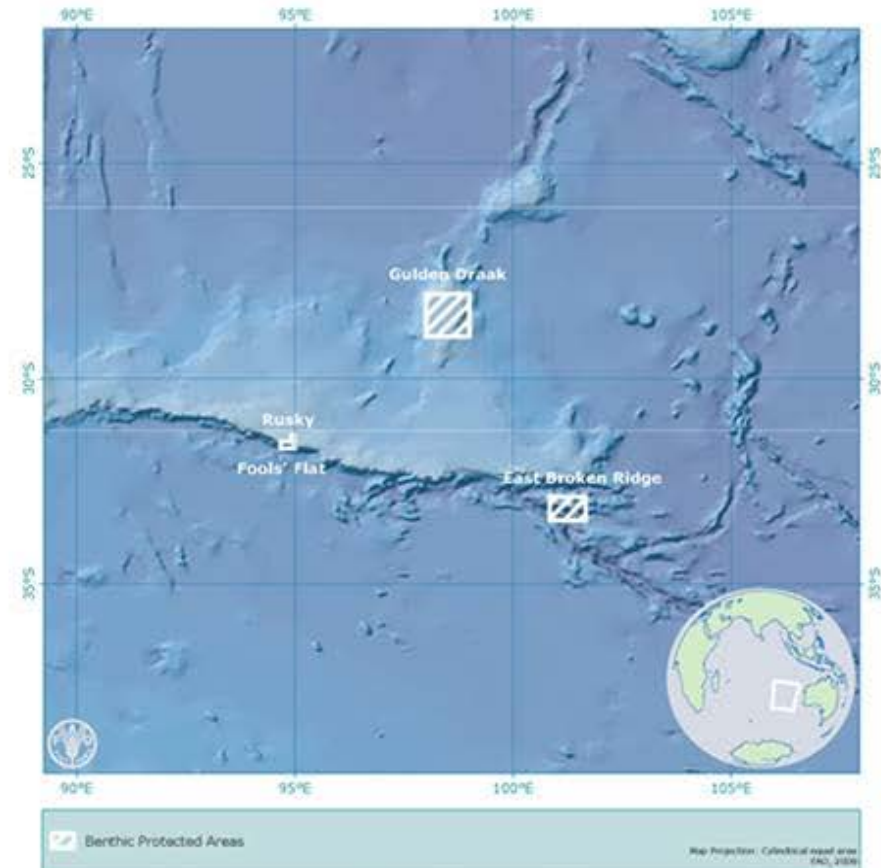


D: Atlantique Sud Est

Figure 5-25 Monts sous-marins profonds protégés dans l'Océan Atlantique (FAO).



A : Zones protégées dans l'Océan Indien Sud-ouest (SIODFA)



B : Zones protégées dans l'Océan Indien Sud-est (SIODFA)

Figure 5-26 Monts sous-marins profonds protégés dans l'Océan Indien (FAO).

La pêche dans les ZEE

La pêche représente l'une des principales sources de revenus ou l'un des principaux potentiels des îles ou territoires dont la zone économique exclusive (ZEE) qui contient des ressources minérales à exploiter.

Un certain nombre de nos territoires Outre-mer sont ainsi concernés.

C'est le cas de l'île de Clipperton, de la Polynésie Française, de la Nouvelle-Calédonie, des îles Wallis et Futuna dans le Pacifique et des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF).

L'île de Clipperton, dite aussi « île de la Passion », à 4 940 km d'Hawaii, 2 390 km des Galápagos, plus de 6 000 km de Tahiti et presque 1 300 km des côtes du Mexique, possède une ZEE de 425 000 km². Elle se situe à la fois dans l'aire de répartition des nodules polymétalliques de la zone de fracture Clarion-Clipperton et à la fois au croisement des migrations de thonidés (cf. figure suivante 5-29). On y trouve notamment l'espèce albacore.

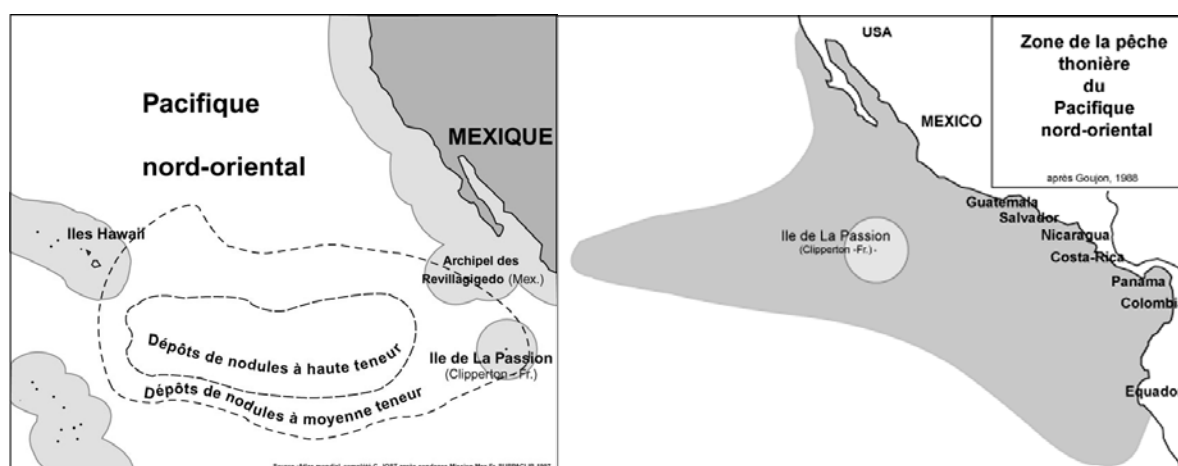


Figure 5-27 Aires de répartition des nodules polymétalliques de la zone de fracture Clarion-Clipperton à gauche et principales zones de pêche thonière dans le Pacifique (Jost, 2010).

Aires de répartition délimitées par les tirets; ZEEs en grisé

Les prises annuelles dans cette zone sont difficiles à estimer car illégales pour une part importante. Elles seraient d'environ quelques dizaines de milliers de tonnes de thons par an (Jost, 2013).

L'exploitation par les pêcheurs français est difficile, car il n'y a pas de zone de mouillage à Clipperton. De plus, l'île est dépourvue des ressources permettant une installation humaine durable et trop loin de nos autres territoires pour les pêcheurs. S'il était possible d'établir une surveillance, les accords de pêche, par exemple pour 50 000 tonnes de thons dans la ZEE de Clipperton, pourraient rapporter environ 21 millions d'euros par an, sachant qu'en Polynésie française, 3 000 tonnes rapportent 1,2 millions d'euros par an (Jost, 2010).

La ZEE polynésienne française, de 5 millions de km², contient également des nodules polymétalliques, et en très grande quantité à partir de 4 200 m de profondeur dans le bassin de Tiki, entre les Marquises et les Tuamotu (Pautot et al, 1981) et des encroûtements de manganèse à 1 000 m de profondeur sur le plateau des Tuamotu. Cette même zone des Tuamotu est également une des plus riches en ressources thonières du Pacifique. En Polynésie française, la pêche est l'une des deux activités principales et traditionnelles. La pêche

industrielle, en 2012, a rapporté 1,3 milliard de francs CFP soit 10,894 millions d'euros, grâce aux exportations (IEOM, 2012 a).

Les thonidés sont les principales espèces pêchées : pour 6 309 tonnes de poisson, 63 % sont des thons germons, 8% des thons obèses, 8% des thons à nageoires jaunes, 5% des marlins bleus, 4% des thazards et le reste, des mahi mahi, des marlins rayés, des saumons des dieux, des espadons... (Chiffres de 2007, Direction des ressources marines et minières, site consulté en 2013).

Espèce	Poids net (t)	Prix moyen (CFP/kg)	Prix min (CFP/kg)	Prix max (CFP/kg)
Thon germon	129	501	270	900
Thon obèse	79	734	300	1 600
Thon jaune	36	650	63	1 160
Marlin bleu	16	425	200	830
Thazard	15	398	50	680
Saumon des dieux	14	411	150	950
Mahi mahi	8	619	50	870
Marlin rayé	8	435	250	700
Espadon	8	719	300	1 140
Papio	3	669	300	810
Mako	1	152	100	220
Total	316	611	50	1 600

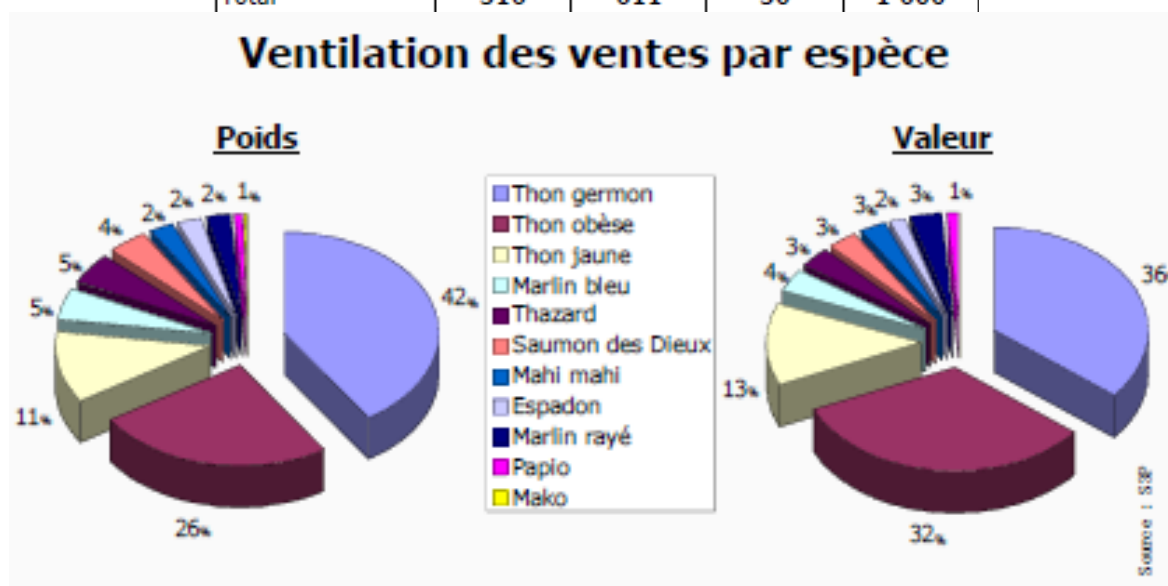


Figure 5-28 Résumé des valeurs des espèces pêchées en Polynésie française en 2007 .

Or 54,6% de cette pêche se fait aux alentours des îles Tuamotu (Mathieu, 2008). Si le thon germon vit préférentiellement à quelques centaines de mètres de profondeur, il descend néanmoins jusqu'à 500-600 m (Ministère Pêche Océan Canada, Direction des ressources marines et minières, FishBase), alors que le thon obèse, l'espadon et le saumon des dieux vivent dans les eaux entre 300 et 500 m environ (Direction des ressources marines et minières, 2013). Ces espèces seraient donc impactées si les déchets miniers de l'exploitation des encroûtements cobaltifères devaient être rejetés en surface ou entre 400 et 1000 m de profondeur. Ces poissons seraient également susceptibles d'être gênés par les conduites de liaison reliant les systèmes miniers d'exploitation des encroûtements aux bateaux minéraliers en surface.

Parmi les espèces citées précédemment, le thon listao, le thon jaune ou albacore et le thon obèse ne devraient, *a priori*, pas être impactés, à moins que l'exploitation minière n'ait des répercussions environnementales indirectes jusqu'à ces profondeurs moyennes (si les eaux polluées sont rejetées à la surface, par exemple), car ces espèces ne descendent pas au-delà de 250 m. Toutefois, ces profondeurs référencées par la banque de donnée FishBase, entrent en contradiction avec les observations faites pendant les campagnes ECOTAP dans les eaux polynésiennes. En effet, pendant ces campagnes, des thons jaunes ont été pêchés entre 50 et 350 m et ils ont été observés jusqu'à 400 m. Il a aussi été rapporté que le thon obèse évoluait en journée entre 350 et 500 m de profondeur, pour remonter entre 100 et 200 m la nuit. Donc l'immunité supposée de ces thonidés face aux impacts environnementaux d'une exploitation minière marine profonde est à relativiser.

Ce cas particulier soulève l'existence de problème de la validité des données lorsqu'elles sont extrapolées pour d'autres objectifs, même pour celles provenant de la littérature scientifique, et de la nécessité de les confirmer, autant que possible, par plusieurs sources de données. Il est nécessaire d'établir une harmonisation et une actualisation permanente de l'information scientifique.

Le thon germon (8,80 euros le kg, cotation Rungis), par contre, se retrouve jusqu'à 600 m. Il est possible que l'exploitation d'encroûtements cobaltifères, que l'on trouve aussi à ces profondeurs, ait des impacts sur cette espèce, soit en faisant disparaître une partie de son habitat soit en altérant celui de certaines de ses proies, entraînant ainsi une diminution de sa nourriture.

Autre territoire d'Outre-mer concerné : la Nouvelle-Calédonie, avec sa ZEE de 1 740 000 km² (Gabrié et al, 2008). Les ressources minérales et biologiques de la Nouvelle-Calédonie sont particulièrement bien documentées grâce aux rapports du programme ZoNéCo, entre 2000 et 2005. Les encroûtements cobaltifères ont ainsi été détectés principalement sur la marge orientale de la Ride de Norfolk à 1 500 m, sur la bordure orientale et à la terminaison nord et méridionale de la Ride des Loyauté (Vanney et al, 1992; Dupont et al, 1995; Lafoy et al, 1996), à la terminaison méridionale de la Ride de Nouvelle-Calédonie, dans la zone d'Entrecasteaux (livret ZoNéCo), dans la Zone du Grand Passage, sur les versants sous-marins de la Grande Terre et dans la partie sud de l'île des Pins (Lafoy et al, 1996).

Les monts sous-marins de la Ride de Norfolk et la Ride des Loyauté, en particulier, sont très exploités pour la pêche au *Beryx splendens* (Lehodey and Grandperrin, 1994), une espèce vivant habituellement entre 400 et 600 m mais que l'on trouve de 25 à 1 300 m de profondeur (Fishbase, consulté en 2013). Le béryx long représentait 93,8% des espèces commerciales en 1994, soit 1 169 tonnes. On trouvait aussi, le *Pseudopentaceros richardsoni* et *P. decacanthus* dans les mêmes habitats (Levy, 2003) et d'autres espèces entre 200 et 400 m comme la sérieole argentée (Laboute and Grandperrin, 2000), les vivaneaux (10,50 euros/kg, cotation Rungis, juin 2013), les loches ou les requins (Fourmanoir, 1977). Plus largement, la ZEE néo-calédonienne est également très riche en thonidés (thon germon surtout entre 100 et 410 m, thon obèse entre 250 et 400 m, thon jaune jusqu'à 250 m), en marlins (thons et marlins sont les deux espèces principalement exploitées par la pêche hauturière (IEOM, 2012 b)) et quelques autres espèces : saumon des dieux (de 210 à 500 m), yoro, mahi-mahi, opah, *Pentaceros japonicus* (apprécié du marché asiatique) et des hoplostèthes au niveau des monts sous-marins de la Ride Norfolk (Vice-rectorat de Nouvelle-Calédonie, 2012). La production de thons a rapporté en 2012 environ 400 millions de francs CFP, soit 3,4 millions d'euros grâce aux exportations (IEOM, 2012b).

La ZEE calédonienne abrite aussi des crustacés à valeur commerciale :

- la crevette *Pasiphaeidae* de grande taille (30 cm), récoltée entre 100 et 1 400 m,
- la crevette *Oplophoridae*, *AcanthePHYra eximia* (10 cm), fréquente entre 800 et 1 000 m,
- la crevette *Aristeidae*, *Aristeus virilis* (20 cm), abondante entre 800 et 1 100 m. Cette espèce est l'une des cibles de la pêche crevettière au chalut sur la côte sud-est australienne,
- la crevette *Pandalidae*, *Heterocarpus parvispina* (10 cm), abondante entre 400 et 600 m. Elle fait l'objet de la pêche crevettière au chalut sur la côte sud-est australienne mais peut également se capturer au casier. En Nouvelle-Calédonie, ce genre est représenté par 11 espèces,
- la crevette *Glyphocrangonidae*, *Glyphocrangon sp.* (15 cm), récoltée entre 1 000 et 1 300 m,
- le crustacé *Polychelidae*, *Polycheles sp.* (20 cm), récolté entre 900 et 1 500 m, prise accessoire des pêches crevettières,
- la crevette *Pandalidae*, *Plesionika sp.* (15 cm), très fréquente entre 300 et 500 m, se capturant aisément au casier,
- la crevette *Penaeidae*, *Haliporoides sibogae* (15 cm), très fréquente entre 500 et 700 m. Elle fait l'objet de la pêche crevettière au chalut sur les côtes australiennes des Nouvelles-Galles du Sud,
- la crevette *Eugonatonotidae*, *Eugonatonotus chacei* (10 cm), fréquente entre 400 et 600 m,
- le crabe *Geryonidae*, *Chaceon bicolor* (20 cm), récolté entre 600 et 1000 m. Cet animal vit sur des fonds meubles où il creuse des terriers. Les espèces de cette famille font également l'objet d'une exploitation commerciale dans l'Océan Atlantique,
- la langoustine *Nephropidae*, *Nephropsis suhmi* (12 cm), récoltée entre 800 et 1 200 m. Cinq espèces de langoustines *Nephropidae* sont présentes en Nouvelle-Calédonie,
- la cigale de mer *Scyllaridae*, *Ibacus brucei* (18 cm), récoltée entre 250 et 400 m. Il existe deux espèces de *Scyllaridae* de profondeur en Nouvelle-Calédonie. Une espèce du genre *Ibacus* est également exploitée en Australie, au large de Brisbane, sous le nom de «Balmain bug »,
- la langouste *Palinuridae*, *Puerulus angulatus* (20 cm), récoltée entre 200 et 500 m. Il existe trois autres espèces de langoustes des profondeurs en Nouvelle-Calédonie, appartenant aux genres *Justitia* et *Linuparus*. Cette espèce est exploitée de façon commerciale dans plusieurs zones de l'Indo-Pacifique sous le nom de « langouste fouet ».

La pêche hauturière représente également un axe de développement très important pour les îles Wallis et Futuna, dont la ZEE de 266 000 km² est riche en sulfures polymétalliques (Document unique de programmation de Wallis et Futuna pour le 10^{ème} Fonds Européen de Développement, 2013). En effet, l'économie reste très traditionnelle et la pêche, bien qu'artisanale, reste l'une des deux sources de revenus de ces îles. 70% des ménages pêchent pour leur consommation propre. La pêche, comme l'agriculture, fait l'objet de programme de structuration et de développement pour devenir une activité génératrice de revenus à long terme (IEOM, 2012 c). Outre diverses espèces de thons, on trouve des carangues, des loches, des vivaneaux, sur les pentes récifales externes et les monts sous-marins, mais généralement à 200-300 m de profondeur (Anon, 2003).

Un autre territoire français est encore concerné par l'exploitation des ressources minérales marines. Il s'agit des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). Des sulfures polymétalliques y ont été découverts, plus précisément dans les ZEEs des archipels de Crozet, des Kerguelen, des îles Saint-Paul et Amsterdam, ainsi que des encroûtements de manganèse dans les îles Eparses (Compte-rendu du Sénat, 2012) et, plus largement, des nodules polymétalliques (Ministère des Outre-mer, 2012). Or les principales ressources halieutiques des TAAF sont des espèces démersales.

Ainsi la légine australe, qui risque d'être impactée, est l'un des poissons les plus chers au monde : 10-12 \$/kg à la débarque (site des TAAF, consulté en 2013). Le droit de pêche, lui, fixé annuellement par l'administrateur supérieur, se monte à 0,59 euros/kg de légine (site des TAAF consulté en 2013). A Crozet et Kerguelen, les adultes (jusqu'à plus de 2 m pour 80 kg) vivent entre 300 et 2 000m de profondeur (Reyes et al, 2012). La maturité de l'espèce est tardive (plusieurs années). La France possède le premier quota au monde soit 5 800 tonnes et cette pêcherie est la deuxième de France en valeur. La pêche de la légine est aussi une des ressources majeures de la Réunion. C'est son deuxième secteur d'exportation et il procure 220-250 emplois directs (site des TAAF; site du Pôle Mer Bretagne consultés en 2013) et plus d'un millier d'emplois indirects (site des TAAF).

Les îles de Saint-Paul et Amsterdam, par contre, se caractérisent par la pêche à la langouste, *Jasus paulensis*, (390 tonnes de langoustes par an, et un droit de pêche à 1,70 euros/kg de langouste), mais elles vivent en eaux peu profondes : 60 m de profondeur maximum, elles ne risquent donc pas être impactées, à moins que les sites potentiellement exploitables soient près des côtes.

On trouve également des poissons, pêchés en quantité limitée, dont le grenadier, et des espèces peu profondes (cabot, gros yeux, Saint-Paul, bleu, poulpe...) (article du site des TAAF sur la pêche dans les Subantarctiques, consulté en 2013).

Dans les îles Eparses, on retrouve à nouveau de grandes quantités de thonidés (albacore, listao, patudo) (article du site des TAAF sur la pêche dans les Îles Eparses, consulté en 2013). Les eaux de l'Antarctique abritent également de nombreuses espèces de requins qui descendent jusqu'à 4 000 m de profondeur. (MNHN, article en ligne sur la biodiversité en Antarctique, dans le cadre de la Mission «Mers Australes», site consulté en 2013)

La pêche constitue encore l'une des ressources principales de nombreuses autres îles, non françaises, ou représente l'un des principaux intérêts de régions dans le Pacifique et l'Atlantique, notamment. C'est le cas des îles Marshall, riches en encroûtements de manganèse, et dont les licences de pêche (pêche au thon, 1 546 tonnes de thons obèses pris en 2010) sont la principale source de revenus (site du Ministère des Affaires Etrangères, consulté en 2013). C'est également le cas :

- de Kiribati (thon obèse), des Samoa (pour qui l'exportation du poisson constitue une partie non négligeable de leur économie),
- des îles Cook (exportation),
- de la Papouasie Nouvelle-Guinée (250 000 tonnes de thons par an (Nicol et al, 2009) : listao, thon jaune et thon obèse (Kumoru, 2007; Kumasi et al, 2012), à qui les exportations ont rapporté 50 millions de dollars US en 2003 et pour qui l'industrie thonière comptabilisait plus de 4 000 emplois en 2004 (Cartwright and Tuqiri, 2004)),
- des îles Salomon,
- de Tuvalu (pour qui la pêche au thon (thon germon, thon à nageoires jaunes, listao) constitue la principale ressource : 39 141 tonnes de thons en 2007 pêchés offshore, qui a rapporté jusqu'à 9,2 millions de dollars US en 2008 et qui représente entre 7,4% et

plus de 30% du PIB de Tuvalu avec les seuls droits d'accès pour la pêche (Siaosi et al, 2012).

La pêche est encore l'un des deux piliers de l'économie :

- du Royaume des Tonga (pêche au thon),
- des Galápagos (concombre de mer, langoustes, requins...) s'élevant à 19,8% de s revenus avec 55 891 812 dollars US en 2005 (Taylor et al, 2009),
- de la Nouvelle-Zélande (la pêche est sa 4^e source de revenus et les espèces profondes représentent 70% du volume total des prises (rapport de 2005 du Ministère pour l'Environnement de Nouvelle-Zélande),
- et des îles Canaries (pêche à la crevette, entre 100 et 1 300 m de profondeur selon l'espèce (Arrasate-López et al, 2012)).

A Madère (intéressante pour ses encroûtements cobaltifères), région autonome du Portugal, la pêche a de l'importance pour l'alimentation locale mais ne représente que moins d'1% de la production et du secteur de l'emploi (Iborra Martín, 2008). On y pêche le thon (thon obèse et bonite à ventre rayé, notamment), le sabre noir et quelques autres espèces profondes et les activités liées à la pêche rapportaient environ 12 millions en 2007-2008.

Aux Açores, il s'agit plutôt d'un secteur en développement (thon pour la pêche industrielle, maquereau, hareng, daurade, congre... pour la pêche artisanale).

Le golfe de Cadix en Méditerranée, où l'on trouve des nodules entre 850 et 1 000 m de profondeur et des hydrocarbures (González et al, 2007; Merinero et al, 2008; González et al, 2009; González et al, 2010), est également exploité pour son poisson et ses crustacés tandis que la mer de Barents est exploitée surtout pour la morue, l'églefin et le lieu noir au niveau du plateau peu profond (230 m de profondeur) (Ifremer, 2013). **Si les rejets de déchets devaient avoir lieu à 200 m, ces pêcheries, pourtant considérées comme non profondes pourraient être impactées.**

La mer Baltique, et plus précisément le golfe de Finlande, représente un cas à la limite du champ de l'expertise car les nodules polymétalliques se trouvent en eaux peu profondes, à moins de 1 000 m de profondeur. Dans ces eaux, on trouve du saumon, du hareng, du sprat...

Dans la baie de Californie, y compris le bassin de Guaymas, on pêche aussi l'encornet géant (*Dosidicus gigas*). Il représente une des cibles les plus importantes de la pêche dans le Pacifique Centre-Est et est le céphalopode le plus pêché à l'échelle mondiale (fiche de l'encornet géant dans Animal Diversity Web, consulté en 2013 ; Rodhouse, 2005). Cet animal évolue entre la surface et 700 m de profondeur. Consommable sous forme de surimi, en filet, en lamelles ou en anneaux, il intéresse les industriels de l'agro-alimentaire d'un certain nombre de pays. On retrouve, d'après les plates-formes de commerce, des producteurs et des fournisseurs d'encornet géant au Pérou, principalement, mais aussi au Mexique, en Equateur, en Argentine, au Chili, au Venezuela, au Brésil, au Panama, en Uruguay, aux Etats-Unis, au Canada, en Chine, à Taiwan, à Hong-Kong, à Singapour, en Corée, au Japon, au Vietnam, aux Philippines, en Malaisie, en Thaïlande, en Indonésie, en Inde, au Pakistan, en Espagne, en France, au Royaume-Uni, en Ukraine, en Lituanie, en Turquie, en Egypte... (Groupe Adrien, Alibaba.com, EC21, global B2B Marketplace).

D'une manière générale, il y a trois risques à craindre dans le cas de la pêche profonde :

- que l'habitat même du poisson/crustacé/mollusque/céphalopode soit détruit,
- que ce soit celui de ses proies qui soit détruit, conduisant à une diminution de la quantité de nourriture pour ces espèces et donc, dans les deux cas, à une diminution des stocks,
- que les migrations soient gênées ce qui obligerait les espèces à changer leur trajectoires, si elles en sont capables, ce qui pourrait provoquer à court terme une perturbation des activités de pêche, jusqu'à ce que les nouveaux modèles migratoires soient connus.

Nous n'avons pas les données pour pouvoir évaluer la réduction des stocks, ni même savoir avec certitude lesquelles des espèces citées dans ce paragraphe seront impactées par une exploitation minière. Cela dépend à la fois de la localisation précise des sites d'exploitation, de l'étendue de ces sites, de la biologie et du comportement des espèces et des pressions anthropiques. Il est difficile, pour l'instant, d'estimer quelle pourrait être la perte économique liée à une exploitation minière profonde.

5.4.2.2. *Autres ressources minérales ou énergétiques concurrentes*

Manquant de données précises sur les localisations exactes des différents types de ressources minérales ou organiques, nous avons choisi d'évoquer les différents territoires connus pour posséder plusieurs types de ressources, donc susceptibles de voir une activité minière impacter d'autres types d'exploitations minérales et énergétiques et donc d'engendrer des problèmes juridiques et économiques.

Les îles **Eparses**, notamment, sont déjà très exploitées pour la pêche au thon et des permis d'exploration ont été déposés pour prospecter des **champs gaziers et pétroliers marins** dans la ZEE de l'île Juan de Nova de 2008 à 2013.

Outre la pêche, **le golfe de Finlande est également exploité pour ses réserves de pétrole sous-marines**. Le golfe de Finlande se trouve déjà, d'un point environnemental, dans une situation délicate. L'eutrophisation des eaux du golfe, ainsi que du reste de la Mer Baltique, inquiète les pays riverains. Cette question a fait l'objet de 85 publications depuis 1991 (requête faite sur Web of Science en juin 2013). D'une manière plus globale, un rapport de l'Agence Suédoise pour la Protection de l'Environnement datant de 2008 souligne, à l'époque, le manque d'information sur les impacts environnementaux de l'exploitation du pétrole sous-marins et le manque d'information sur l'importance du statut environnemental non seulement du golfe mais plus généralement de toute la Mer Baltique sur le tourisme dans la région (Söderqvist and Hasselström, 2008). Suite à ce rapport, une autre enquête sur l'importance de l'état environnemental de la Mer Baltique a été réalisée par la même agence (Hasselström, 2008).

Le golfe de Cadix se caractérise par une grande variété de milieux profonds : volcans de boue auxquels sont associés les **hydrates de méthane, suintements froids**, dorsales et récifs de coraux froids.

Un autre cas est celui du bassin de Guaymas, où se trouve des sources hydrothermales, potentiellement associées à des sulfures polymétalliques, et des suintements froids, source de méthane ou d'hydrocarbures, pouvant eux aussi intéresser des industriels.

La ZEE néo-zélandaise comporte également des gisements de pétrole et de gaz en cours d'exploitation (documents du Ministère de l'Environnement de Nouvelle-Zélande, 2005 et du Ministère du Commerce de Nouvelle-Zélande). De plus, près de 85% des exportations néo-zélandaises sont acheminées par voie maritime. (Document du Ministère de l'Environnement de Nouvelle-Zélande, 2005). Cependant, la zone de production de pétrole et de gaz offshore se limite au bassin de Taranaki, en face de la mer de Tasman. Elle est donc bien isolée par rapport à Kermadec.

Dans la partie méridionale de la mer de Barents se trouvent des exploitations pétrolières et du gaz (Du Castel, 2005). A l'époque de l'étude, les champs étaient non exploités, mais ils le sont depuis (site de la société Statoil).

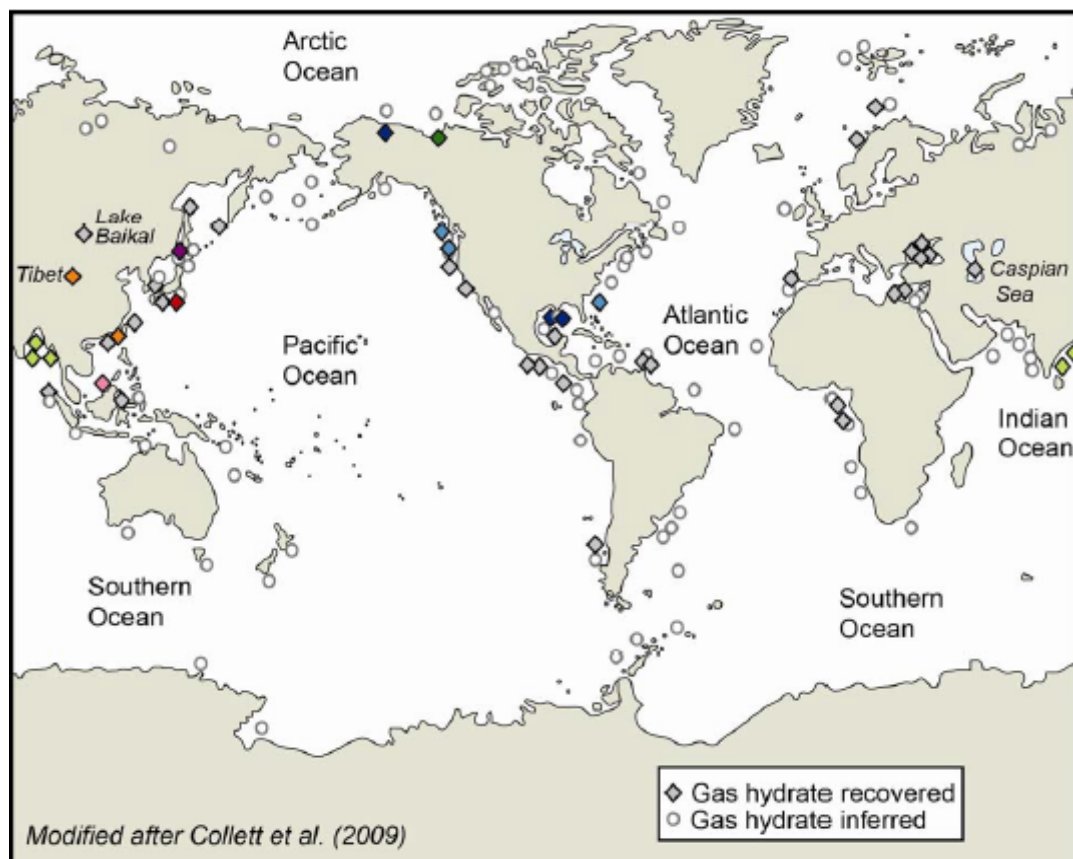


Figure 5-29 Répartition mondiale des hydrates de gaz marins (Ruppel, 2011).

Une des craintes concerne la proximité des différentes zones d'exploitation. Nous ne savons pas si les exploitations de gaz ou de pétrole offshore en cours sont suffisamment éloignées des gisements métallifères pour qu'il n'y ait aucune interférence en cas d'exploitation de ces derniers. C'est une information à rechercher.

5.4.2.3. Composés chimiques à usages pharmaceutiques et industriels

Des centaines d'espèces ont été découvertes, notamment dans les sites hydrothermaux. Parmi elles, les bactéries thermophiles ou hyperthermophiles et les archées ont démontré un fort potentiel dans le domaine des biotechnologies (Guezennec, 2002; Nichols et al, 2005).

Le marché global des enzymes industrielles conserve une forte croissance. C'est un marché en expansion de plusieurs milliards de dollars (Kumar et al, 2008). Parmi les enzymes industrielles, les protéases occupent la majeure partie des ventes des enzymes, soit environ 60% (García-Gómez et al, 2009; Rai and Mukherjee, 2010). Les ventes industrielles des protéases sont estimées à plus de 350 millions US\$ annuellement (Kumar et al, 2008).

Les principes actifs d'origine naturelle représentent 30% du marché et pas moins de 10% ont été isolés à partir d'organismes marins (Laurienzo, 2010).

Les coraux peuvent aussi être source de biomolécules intéressantes. S'il n'est pas fait mention d'une telle découverte chez un *Anthomastus bathyproctus* de la dorsale médio-atlantique en revanche, on a pu isoler chez des *Anthomastus bathyproctus* en Antarctique, des stéroïdes potentiellement intéressants comme anticancéreux (Mellado et al, 2005).

Les grandes profondeurs représentent le plus grand réservoir de ressources génétiques et de biomolécules, parmi lesquelles certaines sont d'un intérêt majeur en biotechnologie. Une récente étude (Yooseph et al, 2007) rapporte la découverte de milliers de nouveaux gènes et protéines dans seulement quelques litres d'eau, promesse de nombreuses nouvelles applications potentielles. Les caractéristiques inhabituelles des organismes des grands fonds, leurs adaptations uniques qui leur permettent de survivre dans des environnements froids, plongés dans le noir et soumis à une très forte pression, offrent des opportunités uniques, faisant d'eux l'objet d'un intérêt considérable pour la communauté scientifique et avec de nombreuses possibilités commerciales intéressantes (Arico and Salpin, 2005). Plusieurs espèces connues pour être associées aux coraux froids pourraient être sources de nouvelles ressources biochimiques (Maxwell et al, 2005). **Les scientifiques étudient un grand nombre de composés issus des milieux marins profonds pour développer de nouveaux produits pharmaceutiques contre le cancer, la maladie d'Alzheimer, l'asthme, les infections virales et la greffe osseuse.** (McAllister, 1988; Witherell and Coon, 2000; Grehan et al, 2003). Les composés organiques, tels les antibiotiques, trouvés chez des gorgones d'eaux peu profondes pourraient aussi être trouvées chez les espèces profondes (Pitcher et al, 2000).

Tableau 5-15 Exemples de produits dérivés d'espèces et de matériaux d'environnements marins profonds (d'après Armstrong et al, 2010; Arico and Salpin, 2005; Maxwell et al, 2005; Roche Applied Science, New England Biolabs, Office Européen des Brevets).

Espèces profondes	Fonction(s)	Application(s)	Profondeur/Localisation	Statut
<i>Thermus thermophilus</i> (bactérie)	Enzymes	Produits anti-UV, protection de la peau	Souche isolée à 2000 m de profondeur dans le bassin de Guaymas	Commercialisé par Serderma sous le nom de gamme Venuceane®
<i>T.thermophilus</i> , <i>Thermus aquaticus</i> , <i>Thermatoga maritima</i> , <i>Pyrodictium sp.</i> , <i>Thermosipho africanus</i> (bactéries)	Taq DNA Polymerase, GMP Grade	Outil de biologie moléculaire		Commercialisé par Roche Applied Science
<i>Salinospora tropica</i> (bactérie)	Salinosporamide-A	Antibiotique et anticancéreux (mélanome, cancer du poumon "non à petites cellules", cancer du côlon, cancer du sein)	> 1000m, Océan Pacifique Nord	
<i>Lithistida</i> (éponge)	Dictyostatine-1	Traitement contre le cancer	442m, Jamaïque	
<i>Spongosporites ruetzleri</i> (éponge)	Topsentine	Implants orthopédiques	300-600m, Bahamas	
<i>Isidae</i> (corail bambou)		Greffe osseuse		
<i>Vibrio diabolicus</i> (bactérie)	HE800, exopolysaccharide	Greffe osseuse		
<i>Pseudoalteromonas sp. DY3</i> (bactérie)	Cellulases		Sédiments marins profonds	
	Estérases		Séquence identifiée dans le métagénome établi à partir de sédiments prélevés du lit d'une colonie de palourdes du mont sous-marin Edison, au sud de l'île de Lihir, près de la Papouasie Nouvelle-Guinée	
<i>Photobacterium profundum</i> (bactérie)	Orf6 thioesterase	Bioremédiation et production de biocarburant		
<i>Bacillus stratosphericus</i> et <i>Bacillus aerophilus</i>	Lipases et cellulases	Chimie, industrie alimentaire pour les lipases et industrie papetière pour les cellulases	Sédiments collectés entre 500 et 5000m dans la portion sud de la Ride du Rio	
<i>Oplophorus gracilirostris</i> (crevette)	NanoLuc® Luciferase	Biotechnologie	Monts sous-marins dans les ZEEs de Polynésie française et de Nouvelle-Calédonie, dans le golfe de Mexico et à Madagascar	Commercialisé par Promega
Organisme hydrothermal Archée inconnue	Pyrolase™ 160 ThermalAce™ DNA	Outil de biologie moléculaire		Commercialisé par Diversa Corporation et ses partenaires
<i>Pyrococcus sp.</i>	Deep VentR® DNA Polymerase	Outil de biologie moléculaire	Cheminée hydrothermale à 2010 m de profondeur dans le bassin de Guaymas	Commercialisé par New England BioLabs Inc
<i>Thermococcus litoralis</i>	VentR® DNA Polymerase	Outil de biologie moléculaire	Cheminée hydrothermale	Commercialisé par New England BioLabs Inc
<i>Thermococcus sp.</i>	Therminator DNA Polymerase	Outil de biologie moléculaire		Commercialisé par New England BioLabs Inc
	BactoScreen™			Développé par Aquaartis

<i>Thermus aquaticus</i>	DNA polymerase Taq Red	Outil de biologie moléculaire		Commercialisé par HyTest Ltd
	<i>Tth</i> DNA Polymerase	Outil de biologie moléculaire		Commercialisé par Promega
<i>Nanoarchaeum equitans</i>				Brevet
<i>Aeropyrum pernix</i> et <i>Pyrococcus horikoshii</i>	Thioredoxine	Agent détoxifiant dans la composition de sérum anti-venin + protège la peau des UV + élimination d'allergènes an industrie agroalimentaire		Brevet
<i>Cryptococcus</i> sp., (levure)			Sédiments profonds	Brevet
<i>Methanospirillum hungatei</i> , <i>Methanococcus jannaschii</i> , <i>Methanococcus voltae</i> , <i>Methanosarcina mazei</i> , <i>Methanobrevibacter smithii</i> et <i>Halobacterium cutirubrum</i> . (archées)	Ether lipides	Etude du transport transmembranaire en recherche, adjuvant en immunologie, transport de principe actif en pharmacie, composant des produits cosmétiques pour la peau, composant d'insecticides...		Brevet
<i>Thermus thermophilus</i>	Protéine ribosomale 30S	Antibiotique potentiel		Brevet
<i>Vibrio diabolicus</i> (bactérie)	Polysaccharides	Ingénierie des tissus conjonctifs non minéralisés, cicatrisation osseuse, régénération et protection du periodontium, modulation de l'angiogénèse	Source hydrothermale	4 brevets déposés par l'Ifremer ou des chercheurs de l'Ifremer à titre privé
<i>Bryhograea thermydron</i> (crabe), <i>Alvinella caudata</i> (ver), <i>Ventiella sulfuris</i> (amphipode)	Eléments génétiques mobiles	Procédés de transposition <i>in vitro</i> et <i>in vivo</i>	Source hydrothermale	Brevet déposé par le CNRS
	Estérases KTL 7 et 9		Sédiments profonds	2 brevets
Poisson des grands fonds (espèce non précisée)	Collagène de la peau	Traitement de l'hypertension par réduction de la pression sanguine		Brevet chinois
Poisson-lanterne <i>Myctophidae</i>	Peptides fonctionnels	Activateur de la synthèse du collagène, immunorégulateur, composition pour la peau à usage externe		Brevet taïwanais déposé par le FISHERIES RES INST COUNCIL OF AGRICULTURE
Souche d' <i>Aspergillus</i> (champignon)	Protéase alcaline	Détergents	Milieu marin profond	Conseil indien de la Recherche Scientifique et Industrielle
Souche bactérienne SM-A87	Polysaccharide	Cosmétique	Milieu marin profond	Brevet déposé par l'université du Shandong
<i>Alteromonas infernus</i> (souche GY 685,		Biodétoxification et traitement des eaux	Eau de mer de <i>Riftia pachyptila</i> , vivant sur un	

bactérie)		usées	site hydrothermal, bassin de Guaymas	
<i>Alteromonas macleodii</i> subsp. <i>Fidjiensis</i>		Agent d'épaississement dans l'industrie alimentaire, dans biodétoxification et dans le traitement des eaux usées, guérison des os, traitement de maladies cardio-vasculaires	Cheminée hydrothermale profonde, Bassin Nord-Fidjien	
HYD-1545 (bactérie)			Tissus d'un polychète marin vivant sur un site hydrothermal à grande profondeur	
<i>Pseudoalteromonas</i> sp. (souche GY 768, semblable à <i>P. carrageenovora</i>) (bactérie)		Biodétoxification et traitement de l'eau, guérison des os	Tissus d'invertébrés vivant sur un site hydrothermal dans le bassin de Guaymas	
<i>Pseudoalteromonas</i> sp. (souche GY 786, semblable à <i>P. undina</i>) (bactérie)		Biodétoxification et traitement de l'eau	Tissus d'invertébrés vivant sur un site hydrothermal dans le bassin de Guaymas	
<i>Pseudoalteromonas</i> souche 721		Propriétés gélifiantes	Cheminée hydrothermale profonde	
<i>Vibrio</i> sp. (bactérie)		Actions anticoagulante, anti-VIH et pharmaceutique	Tissus d'invertébrés vivant sur un site hydrothermal la Dorsale Est-Pacifique 9°N	

Les entreprises de biotechnologies, par exemple, Diversa aux Etats-Unis, Prokarya en Islande et Protéus en France, possèdent notamment des collections de plusieurs milliers de souches microbiennes, dont un grand nombre provient de sources hydrothermales océaniques profondes.

Elles disposent des moyens matériels, techniques et financiers pour identifier les enzymes les plus intéressantes et créer des enzymes recombinantes aux capacités optimisées. Un projet de ce type est conduit par les sociétés Protéus et Degussa : ces deux sociétés ont mis au point un biocatalyseur thermostable issu de *Pyrococcus* pour les réactions d'estérification. Cette enzyme, conçue au départ pour le secteur cosmétique, pourrait aussi trouver une utilité dans la production industrielle de produits chimiques (Ravot et al, 2004).

L'Ifremer possède d'ailleurs un accord de partenariat exclusif sur les enzymes avec Protéus.

Les sociétés de développement d'outils de biologie moléculaire sont également très actives. Les ADN polymérases sont particulièrement étudiées. En effet, les ADN polymérases classiquement utilisées proviennent de *Thermus*, or celles provenant des archées des sources hydrothermales telles que *Pyrococcus* et *Thermococcus* sont beaucoup plus stables et présentent une fidélité de 2 à 10 fois supérieure. Elles sont donc particulièrement recommandées pour les kits de diagnostic de maladies génétiques (Ifremer, 2012).

Le développement des enzymes pourrait permettre d'éviter le recours à des procédés industriels chimiques à fort impact sur l'environnement (Ifremer, 2012).

Diverses industries s'intéressent également aux exopolysaccharides dont les applications générales sont variées : détergents, textiles, adhésif, papier, peinture, alimentation (Sutherland, 1996), industrie pharmaceutique, anticancéreux, galénique (Benedetti et al, 1989; Greco et al, 1998), récupération des résidus pétrochimiques et métalliques de l'industrie minière (Gutnick, 1997; Poli et al, 2010), formulation de milieux de culture pour bactéries, etc....

La première espèce de *Vibrio* isolée sur un site hydrothermal a été une bactérie mésophile qui secrète un exopolysaccharide semblable à l'héparine d'un point de vue chimique, et donc très intéressant en vue d'un usage thérapeutique (Deming, 1999).

Les polysaccharides peuvent former des hydrogels super-absorbants qui trouvent une application en galénique, en ingénierie tissulaire, en culture cellulaire, dans les produits d'hygiène... (Laurienzo, 2010; Omidian et al, 2005).

On trouve également des polysaccharides et même des protéines polyphénoliques de moules dans des adhésifs pour préparations ophtalmiques (Laurienzo, 2010; Deming, 1999).

Quelques bactéries sécrétrices d'EPS :

- Les *Halomonas*, non endémiques. On en trouve au niveau des cheminées hydrothermales et dans les sédiments profonds (Kaye and Baross, 2000). Les exopolysaccharides qu'elles produisent intéressent l'industrie (Ventosa et al, 1998; Ventosa and Nieto, 1995). *Halomonas* n'est pas une espèce endémique mais on la trouve beaucoup dans les sédiments marins profonds et les cheminées hydrothermales,
- Les *Alteromonas* associées à *Alvinella pompejana*, au niveau des fumeurs de la Ride Est-Pacifique (travaux de Bozzi et al, 1996). La souche *Alteromonas infernus sp.* a été isolée à partir de *Riftia pachyptila* dans le golfe de Californie. Les souches découvertes par Bozzi et coll. (travaux de Bozzi et al, 1996) sont capables de produire des EPS pouvant se lier à molécules métalliques de plomb, cadmium et zinc, ce qui est intéressant pour les procédés de détoxification et de dépollution des eaux usées, entre autres (Loaëc et al, 1998),
- *Pseudoalteromonas* souche HYD 721, une souche d'une cheminée hydrothermale de la Ride Est-Pacifique (Guezennec, 2004),
- *Vibrio diabolicus*, toujours de la ride Est-Pacifique (Guezennec, 2004). Ces EPS, notamment, sont hydrosolubles et, par leur composition particulière en sucres, ont trouvé des applications dans l'industrie pharmaceutique.

Les polysaccharides sont des sucres complexes formés par une répétition de motifs simples mais plus ou moins branchés spécifiquement. Chez les bactéries, ces polysaccharides entrent dans la composition des lipopolysaccharides (LPS) de la paroi bactérienne ou bien ils peuvent être excrétés hors de la cellule. Dans ce cas, ils peuvent jouer un rôle dans la formation de biofilm ou dans la reconnaissance cellulaire, entre autres fonctions. Ce sont les exopolysaccharides (EPS).

Du point de vue industriel, ces EPS bactériens présentent de nombreux avantages, par rapport à leurs concurrents d'origine végétale : ils sont biosynthétisables en laboratoire, leur production est donc facilitée, contrôlable et optimisable, ils sont facilement modifiables et purifiables (Guezennec, 2004).

Les micro-organismes ne sont pas les seules sources de biomolécules intéressantes pour l'industrie.

La prospection des ressources biologiques en Nouvelle-Calédonie a révélé la diversité des organismes potentiellement intéressants. Les étoiles de mer, par exemple, sont sources de stéroïdes. C'est ainsi le cas des étoiles de genre *Rosaster* (à 400 m de profondeur), de *Tremaster novaecaledoniae* (à 530 m), *Styracaster caroli* (à 2000 m). Les holothuries aussi contiennent des stéroïdes (saponines), les cnidaires sont source de terpènes, certaines gorgones contiennent des alcaloïdes, les éponges peuvent contenir des stéroïdes, des terpènes et une très grande variété d'autres molécules, comme la corallistine et le sphinxolide. Les superstolides et autres macrolides, isolés à partir de certaines Lithistides à 500 m ont des propriétés anticancéreuses. Certaines éponges contiennent encore des molécules antifongiques, antibactériennes ou encore des alcaloïdes (Laurent, 1999).

De plus, parmi les éponges siliceuses (*Porifera*), certaines espèces peu profondes intéressent beaucoup le secteur des biotechnologies car elles produisent, entre autres molécules intéressantes pour diverses industries, des protéines (silicatéine α) qui polymérisent la silice (Krasko et al, 2000). C'est également le cas des espèces profondes géantes *Monorhaphis chuni* et *Monorhaphis intermedia* (travaux de Muller et al, 2008). De récentes expériences chez les espèces peu profondes ont montré que ces mêmes protéines polymérisaient également certains métaux : titane, cuivre, zinc... (Sumerel et al, 2003; Natalio et al, 2010; Hire et al, 2013; présentation de Johan Gardères, 2013). Il est possible que ce phénomène se produise en conditions naturelles. Toutefois, concernant ces éponges, leur(s) rôle(s) au sein des écosystèmes est (sont) encore très mal connu(s).

La Nouvelle-Zélande se prête particulièrement à la recherche scientifique et à la bioprospection. Cette dernière activité fait officiellement partie des quatre types de ressources naturelles considérées comme des axes de développement économique par le site du Ministère du Commerce, de l'Innovation et de l'emploi de Nouvelle-Zélande. La bioprospection, comme la pêche, fait l'objet d'une réglementation stricte, dans le cadre de la protection des ressources naturelles vivantes, mise en place par le gouvernement néo-zélandais (Ministère de l'Economie de Nouvelle-Zélande, 2007).

Ce service risque d'être diminué par la perte de biodiversité engendrée par la destruction des habitats et de l'étouffement des animaux par les particules fines mises en suspension lors de l'extraction du minerai ou rejetée avec les déchets.

5.4.2.4. *Les coraux précieux*

Certaines espèces de coraux, dits précieux, ont acquis une importante valeur marchande en étant utilisés en joaillerie, dans l'artisanat ou en médecine (Tsounis et al, 2010).

Le principal corail dit « précieux » est l'espèce peu profonde *Corallium rubrum*, que l'on trouve en Méditerranée, c'est le corail rouge, utilisé couramment en joaillerie et en artisanat. Cependant, il existe quelques autres espèces de coraux précieux : les *Corallium* sp, *Corallium secundum* (Chang et al, 2013), *Corallium konojoi* (Uda et al, 2011), *Corallium elatius* (Nonaka and Muzik, 2009), *Paracorallium japonicum* (Uda et al, 2011), les coraux noirs (Wagner et al, 2012), *Corallium lauense* (Baco and Shank, 2005; Baco, Clark and Shank, 2006).

Les *Corallidae* se retrouvent notamment au Japon, à Hawaii et à Taiwan (Uda et al, 2011).

Certains de ces coraux, notamment les coraux roses, *Corallium* sp, peuvent se retrouver sur les monts sous-marins à plus de 300 m de profondeur (Parrish et al, 2002; Clark, 2011). *Corallium secundum* aussi se retrouvent sur les monts sous-marins avec encroûtements cobaltifères et d'autres *Corallium* et *Paracorallium* y ont été trouvés (Clark, 2011).

Les monts sous-marins associés aux encroûtements cobaltifères sont trop profonds pour que leurs coraux soient exploités de cette manière. Mais ces récifs profonds seront peut-être utilisés dans l'avenir comme pépinière pour restaurer les récifs peu profonds actuellement fortement menacés et pour la culture de coraux à des fins commerciales.

5.4.2.5. Décharge (service passé)

Ce « service » est un cas limite, en ce sens qu'il n'est plus d'actualité. Il peut toutefois avoir des conséquences sur les conditions d'exploitation minière sous-marines à de grandes profondeurs. C'est un problème qui se pose plus particulièrement pour les fosses océaniques et à cause de la connexion des canyons sous-marins avec les grands fonds (AAMP, 2013).

La pollution est soit volontaire, comme dans les années 60 où la pratique d'immerger de grosses quantités de déchets nucléaires (Ifremer, 2012) et industriels (Palanques, Diaz and Farran, 1995) à de plus ou moins grandes profondeurs était courante, soit accidentelle, à cause des courants qui transportent les déchets (plastiques, ferrailles, débris de chalut, etc...) depuis d'autres zones marines et qui s'accumulent dans les canyons, soit enfin à cause de naufrages, par exemple.

Ainsi, dans le golfe de Cadix, certaines sociétés industrielles ont envoyé leurs déchets jusqu'en 1990 sur le talus continental (Palanques, Diaz and Farran, 1995).

C'est aussi le cas de certaines fosses de l'océan Atlantique notamment, où 11 000 tonnes de déchets radioactifs ont été immergés à 4 600 m de profondeur à 400 m de la Galice en 1967, 9 000 autres tonnes entre 4000 et 4 600 m de profondeur à 900 km de la Bretagne en 1969 par divers pays européens, etc. Entre 1949 et 1970, ce sont 50 201 tonnes de déchets qui ont été déposées dans les plaines abyssales de l'Atlantique Nord-Est (et notamment la plaine abyssale ibérique) (Thiel, 2003).

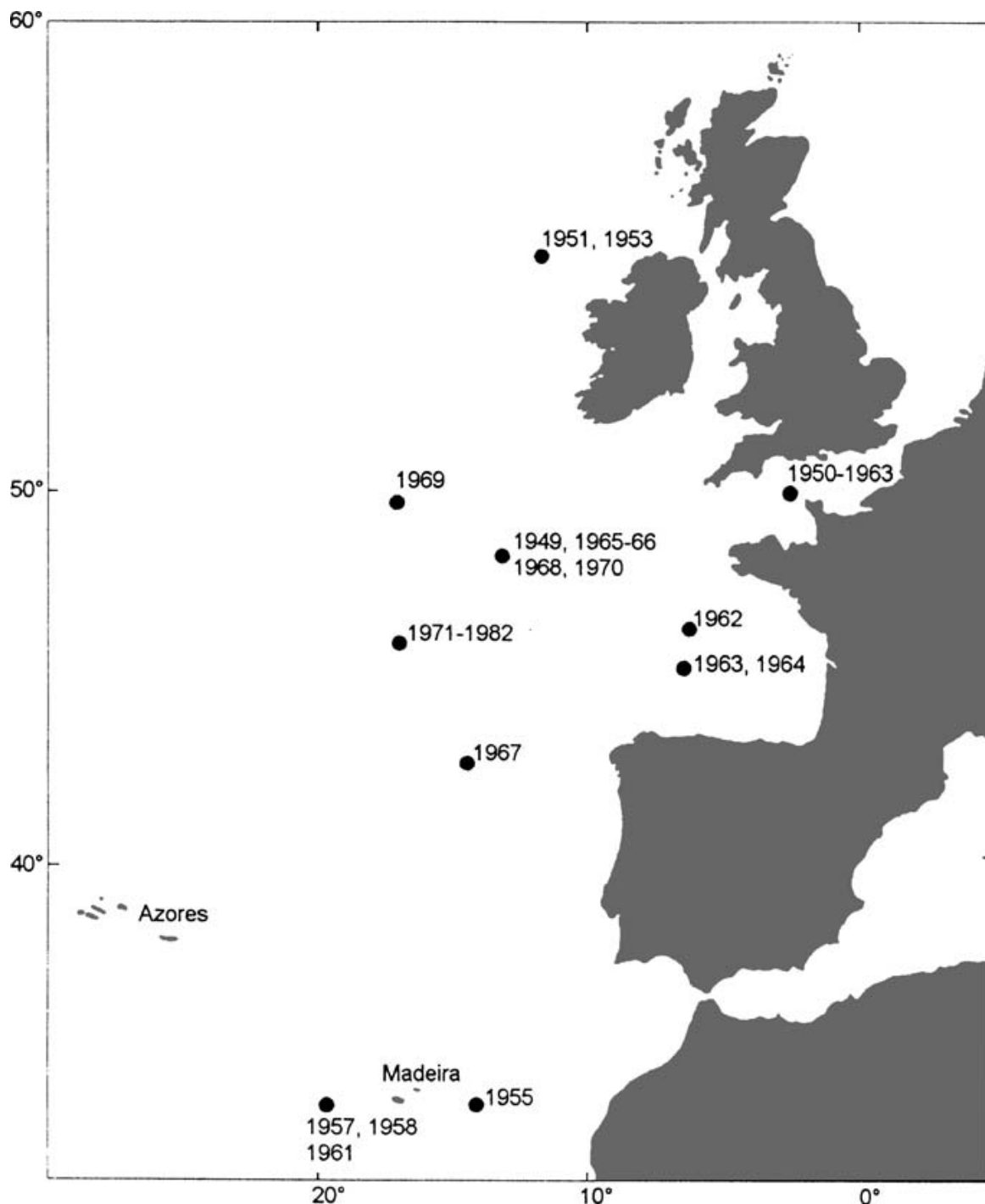


Figure 5-30 Localisation de sites utilisés pour déposer des déchets radioactifs dans l'Océan Atlantique Nord-Est, entre 1949 et 1982 (Thiel, 2003).

L'Atlantique n'est pas le seul à avoir été utilisé : la France a également immergé environ 2 500 tonnes à plus de 2 000 m en Polynésie (Ifremer, 2012; article du journal Le Monde, 2012). Les Etats Unis se sont ainsi débarrassés, depuis 1996, de 47 000 bidons de déchets nucléaires dans le golfe des Farallones, l'Union Soviétique a immergé 17 réacteurs nucléaires dans l'Océan Arctique (Koslow, 2007). Le Japon, la Corée du Sud et la Nouvelle-Zélande se sont également débarrassés de 3 185 fûts entre 1954 et 1976.

L'idée était d'enterrer les déchets dangereux au niveau des zones de subduction pour qu'ils soient entraînés dans la croûte terrestre et ainsi naturellement détruits, ou dans des puits très profonds. **Ce procédé est maintenant interdit par la législation internationale.**

La pollution accidentelle, doit être prise en compte, compte-tenu des courants océaniques qui entraînent les déchets côtiers jusque dans les zones profondes où ils s'accumulent. Des observations menées par l'Ifremer ont pu quantifier 15 débris par hectare à 1 800 m de profondeur dans le golfe de Gascogne et 100 débris par hectare à 1 000m en Méditerranée. On retrouve principalement des déchets plastiques (60-95%), des objets en verre, en métal et autres (Ifremer, 2012).

Une partie de ces débris pourrait se retrouver dans les plaines abyssales, via la connexion des canyons avec les milieux profonds. Ils représentent alors, selon leur nature, un risque supplémentaire potentiellement non négligeable pour le bon déroulement de l'exploitation. En augmentant le risque d'accidents, ils augmentent la probabilité d'arrivée de certains impacts environnementaux graves (exemple : si un fût de déchets radioactifs se trouve sur le passage d'un collecteur ou d'une machine de terrassement et est percé...).

5.4.2.6. Capture et stockage artificiel de CO₂

Les auteurs des rapports HERMES (Van den Hove et al, 2007) et HERMIONE (Armstrong et al, 2010) recensent, parmi les services d'approvisionnement le stockage artificiel de CO₂ dans les fonds marins.

Notre expertise n'a pas vocation à discuter cet usage potentiel des fonds marins. Le stockage artificiel du CO₂ est un sujet complexe qui fait l'objet de divers rapports et d'expertises à part entière, notamment les travaux en cours du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

Nous signalons seulement que quelques travaux proposent d'envisager les basaltes océaniques profonds comme sites de stockage du CO₂ (McGrail et al, 2006; Goldberg et al, 2008; Matter et al, 2009). Dans les bassins arrière-arc les plus matures et les dorsales, le basalte peut être un substrat dominant (Cf. Chapitre 2). Sur les flancs des dorsales et dans les bassins arrière-arc peuvent également se trouver des encroûtements cobaltifères (bien que les bassins connus pour être riches en encroûtements cobaltifères (Okinawa, Bassin de Lau...) soient plutôt des bassins arrière-arc jeunes) (Cf. chp2). Nous ne pouvons donc pas exclure complètement qu'il puisse y avoir, éventuellement, dans quelques cas, une concurrence entre la recherche sur le stockage de CO₂ dans les basaltes profonds et la prospection d'encroûtements cobaltifères.

La question se pose également pour la Mer de Barents et la Mer Baltique, car il existe des stockages géologiques de CO₂ à Snoehvit dans la Mer de Barents et dans la partie polonaise de la Mer Baltique (site d'ECO2, consulté en 2013). Ce pendant, les nodules et les encroûtements dans la Mer de Barents sont situés plus au nord (Ingri, 1985; Godfrey et al, 1997) et les nodules de la Mer Baltique semblent être localisés dans les baies de Kiel et du Mecklenburg (Hlawatsch et al, 2002), la baie de Botnie (Amakawa et al, 1991), le golfe de Finlande (Anufriev et Boltenkov 2007) et la baie de Riga (Baturin et Dubinchuk, 2009). Les interactions entre les sites de stockage de CO₂ et les champs de nodules semblent donc, en principe, peu probables.

5.4.3. Services de régulation et de maintenance

Les écosystèmes marins profonds, (notamment les sites hydrothermaux) contribuent au refroidissement de la planète dans son ensemble, à son équilibre thermique, et à l'équilibre chimique de l'océan et de l'atmosphère (Rapport de la Convention sur la Biodiversité, 2007). 75% du milieu marin se situe entre 1 000 et 6 000 m (CNRS, Prospective Mer, 2013). Si l'on reprend les différents types d'environnements potentiellement concernés par une exploitation minière, nous savons que :

- Les nodules sont répartis sur 9 millions de km² dans la Zone Clarion-Clipperton soit 15% des fonds du Pacifique entre 4 000 et 5 000m (Fouquet and Lacroix, 2012), et sur plus de 0,4 millions de km² dans le bassin du centre de l'Océan Indien (Mukhopadhyay et al, 2003). Il est difficile de trouver les aires des autres champs de nodules.
- On estime qu'il existe 60 000 km de dorsales océaniques (Bougault et al, 1993), dont seules quelques centaines ont été explorés. Les dimensions des sites hydrothermaux sont variables : Rainbow a une forme à peu près rectangulaire de 300 m sur 100 m (Marcaillou, 2011), le champ actif de Logatchev s'étend sur 800 m sur l'axe suivant l'axe Nord-Ouest/Sud-est et sur 400 m suivant l'axe Nord-Est/Sud-ouest (Marcaillou, 2011). La profondeur est régulièrement indiquée dans les publications, mais ce n'est pas le cas des aires des champs. Donner une estimation des surfaces concernées est très délicat.
- Les encroûtements, entre 400 et 4 000 m, correspondent à une surface estimée à 6,35 millions de km², soit 1,7% de la surface des océans (Fouquet and Lacroix, 2012).

Les différents services de régulation, présentés ultérieurement, sont des services à l'échelle de la biosphère.

Il semble donc peu probable qu'une seule exploitation minière, même sur 20 ans et sur 75000 km² puisse engendrer une destruction des milieux assez importante pour perturber un service qui se réalise à une échelle si vaste. Toutefois, s'il devait y avoir simultanément des dizaines d'exploitations, il n'est pas impossible que la perturbation ainsi amplifiée affecte ces services de manière plus significative.

5.4.3.1. Régulation de l'air et du climat

Salomidi et coll. mentionnent que les collines abyssales pourraient avoir un rôle important dans la régulation du climat, la régulation de la qualité de l'eau et la conservation de la biodiversité des grands fonds (Salomidi et al, 2010). Ce rôle s'exerce principalement à travers l'influence de ces anomalies topographiques sur les courants profonds et plus généralement la circulation océanique et le mélange vertical des masses d'eau (Chapitre 4).

D'après Armstrong et coll. (2010), les milieux profonds participent d'une manière générale à la régulation de l'air et du climat à travers le mécanisme de « pompe biologique », soit un ensemble de processus biologiques qui assure le transport de la matière (carbone et autres nutriments) de la surface océanique aux couches profondes (Armstrong et al, 2012). Il est important de préciser cette définition de « pompe biologique » ici, lorsque l'on parle du stockage naturel du CO₂ par l'océan en général. Le sens du terme « pompe biologique » est souvent réduit à l'activité phytoplanctonique dans les eaux de surface et à la sédimentation des organismes morts tombés sur le plancher océanique. Pour les auteurs du rapport HERMIONE, il semble que ce soit principalement cette fonction de stockage du CO₂ dans les

sédiments profonds qui produit un service de régulation du climat. Cela rappelle l'étude de Nath et coll. (2012) sur l'impact possible de l'exploitation des nodules sur le cycle du carbone et de la corrélation entre le cycle du carbone et le cycle des phosphates.

Ce sont visiblement des services très délicats à monétariser. La seule estimation économique que nous avons pu trouver concerne l'ensemble du compartiment marin, dans les limites de la ZEE britannique (Heip et al, 2009; Beaumont et al, 2008). Les services de régulation du climat et de l'air sont à évalués à entre 420 millions et 8,47 milliards de livres sterling. Les auteurs ont uniquement considéré la fixation photosynthétique du CO₂ pour estimer la valeur de la fonction de régulation du climat et de l'air. Ils ont choisi un cas d'étude (îles Scilly ou Sorlingues, à la pointe Sud-ouest de la Grande-Bretagne). Ensuite, à partir de ce cas particulier, ils ont calculé les valeurs de fixation photosynthétique annuelle nette du CO₂, grâce à deux méthodes :

- Ils ont cartographié les habitats d'espèces-clés d'algues et d'herbiers marins et ont analysé la littérature scientifique, afin de quantifier leur productivité,
- Ils ont utilisé des méthodes de télédétection pour estimer la productivité du phytoplancton.

Ils ont ensuite estimé la valeur économique du service par la méthode des coûts évités appliquée à des dommages marginaux (non précisés). La comparaison avec un site adjacent dans l'Atlantique leur a permis d'indiquer l'importance relative de la biodiversité de l'île pour ce service. Ils semblent avoir extrapolé la valeur globale de ce service pour la biodiversité marine de la ZEE britannique.

Pour notre part, nous nous posons la question suivante : admettons que le carbone stocké dans les grands fonds résulte principalement de la sédimentation du phytoplancton. Peut-on réellement considérer que la valeur monétaire de ces milieux en tant que réservoir de carbone est égale à celle de la fixation antérieure du carbone dans les eaux de surface ?

Nous présentons cette méthode d'estimation avec des réserves.

Les masses d'eau profonde participent également à la régulation de la température (Armstrong et al, 2010). En effet, l'océan constitue un énorme réservoir de chaleur, qui ralentit le réchauffement ou le refroidissement de la Terre dus aux variations des conditions climatiques. Toutefois, Armstrong et coll. soulignent bien le manque de connaissances sur les seuils et les points de basculement possibles dans les milieux profonds, comme, par exemple, les taux de mélange des couches d'eau profondes et des couches moins profondes, les impacts sur les modèles globaux de circulation et les conséquences pour les services-supports et finaux produits par les milieux profonds et les écosystèmes influencés par eux.

Parmi les différents types de milieux profonds qui concernent cette expertise, les panaches hydrothermaux, en particulier, sont susceptibles de jouer un rôle dans la régulation du bilan de carbone des milieux profonds et celui des micronutriments comme le fer (Bennett et al, 2011; cf. Chapitre 4.)

Notons par ailleurs, que lorsqu'Armstrong et coll. (2010) parlent de régulation de l'air, ils précisent qu'ils parlent d'une part de l'implication de la pompe biologique dans le cycle global du carbone et d'autre part, du cycle du méthane. Les communautés microbiennes de certains événements hydrothermaux peuvent participer à ce dernier cycle. Toutefois, ce sont plutôt les communautés microbiennes des suintements de méthane, notamment sur les volcans de boue, qui participent de manière conséquente à ce cycle. Or ces habitats ne rentrent pas dans le champ de l'expertise car aucune des ressources métallifères considérées ne leur est associée.

Nous n'avons pas trouvé de données plus précises sur l'importance des grands fonds marins pour ces services de régulation de l'air et du climat.

5.4.3.2. *Régulation de la composition des océans*

La composition de l'eau de mer dépend de la composition des matériaux du plancher océanique (nodules, encroûtements, roches plutoniques, composés volatils...) et les processus d'adsorption des éléments chimiques de l'eau de mer par les argiles pélagiques océaniques (Li, 1991).

Les systèmes hydrothermaux des dorsales médio-océaniques, notamment, sont connus pour leur rôle dans la régulation de la chimie des océans et des sédiments (Kadko, 1996). Les ions H^+ , le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone émis par les cheminées hydrothermales influent sur la solubilité des carbonates et des sulfures de métaux (Cruse and Seewald, 2001). Les réactions à l'interface entre les sédiments et l'eau de mer sont influencées par la richesse des sédiments en matière organique qui détermine la capacité des micro-organismes à remobiliser le fer, le manganèse et le zinc. La dégradation de la matière organique crée des conditions réductrices riches en sulfures qui favorisent la précipitation des métaux dissous comme le cuivre. La température reste un facteur de régulation important de ces mécanismes (Cruse and Seewald, 2001). L'abondance des composés organiques (alcane, alcène, benzène, toluène) dans les fluides dépend également de la dégradation thermique de la matière organique contenue dans les sédiments (Cruse and Seewald, 2010). Les réactions entre l'eau de mer et le basalte du plancher océanique peuvent être considérées comme un paramètre géochimique stabilisant la composition de l'océan au regard des variations causées à long terme par les changements climatiques et tectoniques (Edmond and Von Damm, 1992). Notamment, la dissolution continue du verre basaltique libère des cations divalents qui régulent à leur tour la minéralisation du dioxyde de carbone dans les basaltes, les fluides s'alcalinisent conduisant, selon les modèles de chemins réactionnels, au piégeage des métaux lourds présents dans l'eau de mer par les (oxy)hydroxydes de fer et la calcite (Flaathen, 2009). D'après les modèles cinétiques, les ions SO_4^{2-} augmentent la vitesse de dissolution de basalte à pH acide mais pas à pH basique. De plus, le sulfate de sodium et les sulfates ralentissent la précipitation de la calcite aux pH typiques de sa précipitation en subsurface.

Une seule étude, dans le bassin Indien Central, s'est intéressée au rôle des communautés microbiennes des nodules dans l'immobilisation des ions métalliques. Cet article conclut à la participation des micro-organismes dans l'immobilisation des métaux, régulée par la quantité de carbone organique et les concentrations en métaux disponibles (Sujith et al, 2011).

Il y aurait peut-être un risque à long terme, à ce niveau, si les exploitations des champs de nodules devaient se multiplier et impacter de très grandes zones.

5.4.3.3. *Absorption et détoxification des éléments toxiques*

Les cheminées hydrothermales sont des environnements fortement enrichis en métaux lourds. Les communautés biologiques associées à ces systèmes doivent leur survie à leur capacité à excréter les éléments métalliques intracellulaires en excès ou à transformer les ions métalliques qui s'accumulent dans leurs tissus en composés moins toxiques, voire non toxiques (précipitation des métaux dans des vésicules lysosomiales, liaison avec les métallothionéines) (Rousse et al, 1998).

Les fluides hydrothermaux toxiques sont riches en sulfures. **Les bactéries sulfo-oxydantes qui oxydent l'hydrogène sulfuré en soufre, en thiosulfates ou en sulfates, beaucoup moins toxique, sont fréquemment associées aux espèces hydrothermales et participent à la détoxification de ce composé indispensable à leur survie.** Les espèces animales ont également développé d'autres stratégies que ces symbioses avec ces bactéries : hématines chez des polychètes et des échiuriens, organites capables d'oxyder les sulfures chez des échiuriens, qui fixent hémoglobines liant l'hydrogène sulfuré de manière réversible, par exemple (Minic et al, 2006).

On trouve aussi du mercure élémentaire en quantité variable dans les sédiments métallifères, les micronodules de ferromanganèse le long des dorsales, les encroûtements et les sulfures polymétalliques (Dekov, 2007; Stoffers, 1999). Certaines cheminées hydrothermales génèrent également en quantité du monométhylmercure (Lamborg et al, 2006).

Certaines archées et bactéries des sites hydrothermaux sont capables de réduire les ions mercure (Hg^{2+}) en mercure métallique Hg^0 , moins toxique et moins volatile (Dekov, 2007; Freedman et al, 2012; Vetriani et al, 2005; Crespo-Medina et al, 2009). En milieu aquatique, ces ions sont transformés en méthyl mercure et diméthylmercure par les bactéries sulfato-réductrices. Le méthyl mercure est la forme la plus toxique. Les données toxicologiques fournies par l'INERIS proviennent d'études sur la toxicité chronique du mercure et de ses dérivés. Ainsi, la plus forte concentration testée pour laquelle les effets observés ne sont pas significativement différents de 0 (NOEC), dans le cas du mercure inorganique, est comprise :

- pour les algues entre $0,9 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ (durées d'exposition au chlorure de mercure (II) testées de 3 à 33 jours);
- pour les micro-crustacés entre $0,07 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ (durées d'exposition au chlorure de mercure (II) et au nitrate de mercure (II) testées de 3 à 44 jours).
- pour les poissons entre $0,09 \mu\text{l.L}^{-1}$ et $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le chlorure de mercure (II) et le nitrate de mercure (II) (durées d'exposition de 14 jours à 60 jours).
- pour les organismes benthiques, elle est de 930mg.m^{-3} pour 28 jours.
- pour les bactéries, cyanophycées, macrophytes, protozoaires, mollusques, cœlentérés, entre $0,1 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $775 \mu\text{g.L}^{-1}$ (durées d'exposition au chlorure de mercure (II), sulfate de mercure (II) et nitrate de mercure (II) testées de 2 h à 112 jours).

Dans le cas du mercure organique, la NOEC est de $0,09 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les micro-crustacés pour 30 jours d'exposition au méthyl mercure; entre $0,07 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $19 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les poissons exposés au méthyl mercure et à l'hydroxyde méthylmercurique et entre $0,03 \mu\text{g.L}^{-1}$ et $14 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les bactéries, les protozoaires, les planaires et les mollusques (fiche de l'INERIS, consulté en 2013).

Le mercure ne s'élimine pas mais s'accumule tout au long de la chaîne alimentaire (Kádár et al, 2007), sous forme de méthyl-mercure. Ces micro-organismes jouent donc un rôle essentiel dans la détoxification et dans le cycle biogéochimique du mercure (Freedman et al, 2012).

Tableau 5-16 Quantité moyenne de mercure contenu dans les sédiments et les fluides hydrothermaux (Dekov, 2007).

Object and area of investigation	Content (ppm)
Metalliferous sediment, 21°S EPR	0.29
Fe–Mn micronodules, metalliferous sediment, 21°S EPR	22.2
Metalliferous sediment, SE Pacific Ocean	0.46 (A.B.) ^a
Metalliferous sediment, North EPR	2.12 (A.B.)
Metalliferous sediment, Atlantis II Deep, Red Sea	1.87 (A.B.)
Metalliferous sediment, Tethys Deep, Red Sea	0.19 (A.B.)
J ₃ –Q ₁ metalliferous sediment, Pacific Ocean	0.5 (A.B.)
J ₃ –Q ₁ metalliferous sediment, Atlantic Ocean	0.15 (A.B.)
Pg ₁ –N ₁ metalliferous sediment, Back-arc basins, Pacific Ocean	1.2 (A.B.)
Metalliferous sediment, 45°N Mid-Atlantic Ridge	0.41
Hydrothermal precipitate, Punta Mita, Pacific margin of Mexico	130.2
Hydrothermal Mn-oxides, La Victoria Knoll, California continental borderland	1.34
Hydrothermal Fe–Mn crusts, TAG area, Mid-Atlantic Ridge	1.04
Hydrothermal Fe–Mn crusts, FAMOUS area, Mid-Atlantic Ridge	0.15
Hydrothermal Fe–Mn crusts, Galapagos Ridge	0.15
Hydrothermal Fe–Mn crusts, Juan de Fuca Ridge	0.13
Hydrothermal fluids, Bahía Concepción, Gulf of California	0.54
Bottom seawater, FAMOUS area, Mid-Atlantic Ridge	0.07–1.10×10 ⁻⁷
Mid-ocean ridge basalts	0.02

^a A.B. = calculated on abiogenic basis.

La faune hydrothermale est également exposée à d'autres métaux lourds : cadmium, zinc, cuivre... Les mollusques et polychètes hydrothermaux possèdent des métallothionéines qui neutralisent les métaux sous une forme organique soluble. Ils semblent également capables d'accumuler les métaux sous forme inorganique (granules), plus stables dans le temps (Minic et al, 2006).

Le zinc et le cuivre peuvent également s'accumuler le long de la chaîne alimentaire au niveau des sites hydrothermaux (Colaco et al, 2006).

Tout l'enjeu est donc d'évaluer les risques de répercussion économique de la remobilisation de ces métaux (par la dispersion de particules) pour les pêcheries profondes et l'industrie agro-alimentaire.

5.4.4. Services culturels et sociaux

Les services culturels et sociaux correspondent à une grande variété de notions : l'offre d'emploi, les valeurs éducatives, être source d'inspiration, les valeurs esthétiques, favoriser la création de liens sociaux, les valeurs patrimoniales, la récréation et l'éco-tourisme...

Ces services sont plus difficiles encore à monétariser, car plus ou moins tangibles, exception faite du tourisme. Ainsi, l'Angleterre a estimé que sa biodiversité marine rapportait de 11 à 77 milliards de livres en loisirs et activités récréatives et ses valeurs cognitives et indirectes s'évaluaient respectivement à 317 millions de livres en 2002 et 0,5 à 1,1 milliards de livres en 2009 (Heip et al, 2009).

5.4.4.1. Tourisme

Le tourisme est une source de revenus non négligeable pour un grand nombre des populations vivant près de gisements de ressources minérales.

Cependant, les chantiers à nodules, de même que la plupart des sites hydrothermaux et des encroûtements cobaltifères, se trouvent à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de km des côtes (Cf. le chapitre 3), donc, il semble peu probable que ces mêmes sites aient un intérêt touristique.

Toutefois, la répartition des ressources minérales dans le sud-ouest du Pacifique indique que dans certains cas, les dépôts métallifères sont proches des îles.

Par exemple, Solwara 1 (site à sulfures hydrothermaux) est à 50 km de l'île principale de Papouasie Nouvelle-Guinée, mais cette distance est encore suffisamment importante pour que le tourisme maritime en Papouasie ne soit pas affecté directement par la présence des navires minéraliers dans la mer de Bismarck.

Autre exemple : en Polynésie, les activités nautiques (plongée, navigation de plaisance, découverte du milieu marin, etc.) représentent 64% des activités touristiques de la Polynésie. (Dossier de veille sectorielle Polynésie Française de l'Office du Tourisme, 2008) et les Tuamotu ont un rôle non négligeable puisque l'île Rangiroa, appartenant à cet archipel, est la quatrième île la plus visitée de Polynésie (22 846 touristes en 2006) (Dossier de veille

sectorielle Polynésie Française de l'Office du Tourisme, 2008). Toutefois, les principales activités touristiques restent confinées au lagon des Tuamotu. Des opérations minières à plusieurs dizaines de km au large ne devraient pas affecter le tourisme.

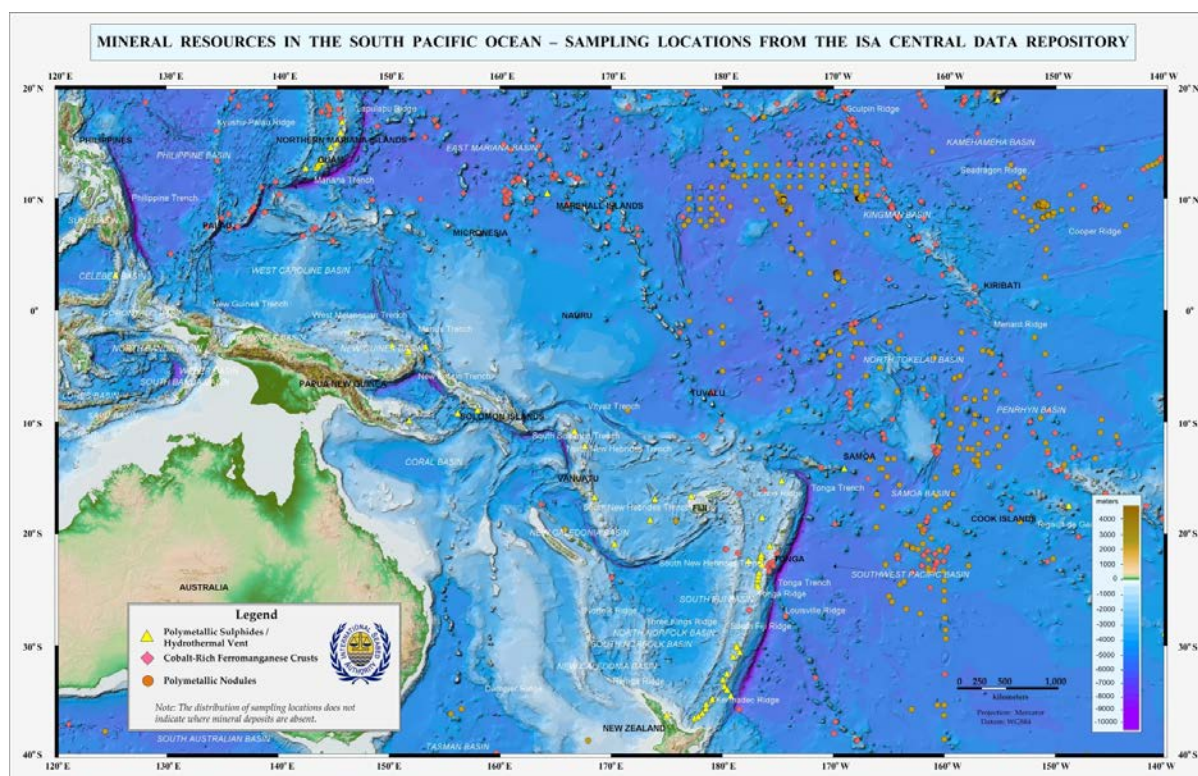


Figure 5-31 Localisation des ressources minérales du Pacifique (AIFM).

Par contre, les récifs d'Entrecasteaux (Nouvelle-Calédonie), où ont été échantillonnés des encroûtements cobaltifères (Lafoy et al, 1996), se visitent car ils abritent une importante population d'oiseaux marins, servent de site de reproduction et de ponte pour les tortues vertes et il est possible d'y faire de la plongée sous-marine.

Il est difficile de trouver des informations plus précises sur la localisation des zones échantillonnées par rapport aux îles habitées, dans la littérature blanche comme dans la littérature grise. Les auteurs en général précisent bien les profondeurs d'échantillonnage mais gardent confidentielle la localisation exacte des sites d'échantillonnage. De plus, dans la plupart des cas, le travail de prospection complet reste à faire.

Nous posons donc l'hypothèse suivante : **si des ressources minérales sont découvertes dans les zones à activité touristique marine, voici les pays dont l'économie pourrait souffrir :**

- Dans les TAAF, la prospection n'en est qu'à ses débuts. Toutefois, si les recherches devaient révéler la présence de ressources près des côtes, notons qu'à l'heure actuelle, le tourisme, récent, n'est pas encore un secteur très développé. Les archipels de Crozet, de Kerguelen et les îles Amsterdam et Saint-Paul peuvent être visités. La fréquentation des îles australes était estimée à 60 personnes par an en 2008 et rapportait un chiffre d'affaire d'environ 400 000 euros par an (Dossier de veille sectorielle des Terres Australes et Antarctiques Françaises de l'Office du tourisme, 2008).

- **Madère**, dont l'économie repose principalement sur le tourisme (Ambassade de France, 2003)
- Les **îles Mariannes du Nord** sont composées de 14 îles. Le tourisme semble être bien développé (Bureau of Economic Analysis, US Department of Commerce, 2012). L'économie de ces îles dépend tout particulièrement du tourisme haut de gamme (Site du Commonwealth of the Northern Mariana Islands – CNMI, consulté en 2013). Les activités touristiques se déclinent notamment en activités sportives : **voilier, yacht, snorkelling ou plongée** (Site du CNMI). Ce secteur emploie 10% de la population active (Site du Centre International de Recherche Scientifique – CIRIS, consulté en 2013).
- Le tourisme est également une des principales sources de revenus annuels de l'**île de Guam**, représentant jusqu'à 60% des revenus du gouvernement et 26% de l'emploi. En 2010, on a comptabilisé 1,2 millions de touristes pour l'année.
- Le tourisme est devenu la principale ressource de l'**état Hawaïen** depuis 30 ans (Encyclopédie Universalis en ligne, consultée en 2013). Par exemple, en 2005, on a comptabilisé plus de 7 millions de visiteurs ayant passé au moins une nuit dans l'île.
- Les nodules ont été trouvés dans le nord et le sud du bassin de Penrhyn, à l'est du plateau Manihiki, ainsi qu'à l'ouest et au sud de Rarotonga (ZEE des **îles Cook**). Le tourisme est encore peu développé aux îles Penrhyn. La principale activité en mer proposée est la pêche sportive dans le lagon et l'observation des baleines. Manihiki reçoit plus de revenus du tourisme car le lagon de cet atoll est célèbre pour ses perles noires et la visite de l'île est proposée par les agences de voyage. Les encroûtements cobaltifères sont également été localisés sur un mont sous-marin du plateau Manihiki dans la ZEE des îles Cook et sur le plateau Manihiki en dehors de la ZEE des îles Cook.
- La ZEE des îles de la Ligne (**Kiribati**) contient également des encroûtements cobaltifères, ainsi que le bassin Pacifique Central au voisinage des îles Phoenix. Il semble que dans la ZEE des îles de la Ligne, les encroûtements soient associés aux îles et aux récifs. La réserve marine des îles Phoenix, classée par l'UNESCO est la plus grande réserve marine existante. Le développement touristique de Kiribati est relativement récent mais participe déjà de manière importante à l'économie du pays.
- Les deux types de ressources ont également été trouvés dans la ZEE des îles Ellice (**Tuvalu**), et dans la ZEE des **îles Marshall** (Cronan et Hodkinson, 1991 et 1993), ainsi qu'à l'ouest de la **Tasmanie** (Exon, 1997).
- Les **Samoa** et le **Vanuatu** comptent également beaucoup sur le tourisme (40% du PIB pour le Vanuatu) et il est en développement à **Niue**.

Si des exploitations devaient avoir lieu dans les mêmes eaux que celles où circulent les bateaux de pêche sportive et les croisiéristes, la vue des énormes bateaux minéraliers et des bateaux de transport auraient probablement un impact négatif sur le tourisme des îles.

De manière plus prévisible, la construction à terre d'usines de traitement des métaux risque d'affecter négativement le tourisme.

5.4.4.2. *Ecotourisme autour des cétacés et des requins*

Il semble s'agir d'une activité particulièrement répandue dans le Pacifique. C'est un service-double, à la fois générateur d'argent en lui-même comme n'importe quelle activité touristique, mais avec une forte valeur de « bien-être ». C'est pourquoi nous le traitons séparément du tourisme général.

Nombreux sont les sites d'agences touristiques et les témoignages personnels qui considèrent que nager avec les baleines est une expérience « très forte », « exceptionnelle », « un rêve », etc... Les baleines fascinent les hommes par leur gigantisme et leurs capacités cognitives et sociales qui les rapprochent des humains. Elles sont très présentes dans l'imaginaire occidental, car mentionnées dans la Bible et des légendes (légende de Saint Brendan, histoires de marins depuis le 19^e siècle), et à travers des œuvres à succès comme « Moby Dick » de Herman Melville qui a marqué des générations de lecteurs depuis sa parution en 1851 ou la baleine de « Pinocchio » de Carlo Collodi, écrit en 1881.

Elles tiennent également une place importante dans la religion et le folklore de nombreuses autres cultures : culte de la baleine au Vietnam (centre du Vietnam, le long des côtes), chez les Maori, chez les Tonguiens (Kessler and Harcourt, 2012), chez les Polynésiens, chez les Inuits, chez les Lofoten (travaux de Régis Boyer et Benjamin Guérif)... Toutes les sociétés qui ont longtemps vécu de la chasse à la baleine et cherchent aujourd'hui à les protéger.

Les dauphins également, par leur comportement amical et leur intelligence fascinent les hommes. Ils font l'objet de nombreux contes et légendes dans le monde entier et ont toujours été vus de manière positive. Ils sont d'ailleurs fréquemment évoqués dans des ouvrages pour enfants, des séries télévisées ou des campagnes publicitaires. **Ces références peuvent paraître anecdotiques, néanmoins, elles sont symptomatiques de la manière dont les consciences peuvent être marquées.**

Les cétacés sont très appréciés dans notre société et leur image génèrent beaucoup de profit.

Or, dans tous les océans, un certain nombre de canyons sous-marins abritent des dauphins et des baleines (Kenney and Winn, 1987; Waring et al, 2001). On trouve le genre *Delphinus* en Méditerranée, à proximité de la Nouvelle-Zélande et dans la baie de Californie, entre autres. Le grand dauphin Indo-Pacifique (*Tursiops spp*), en particulier, vit dans la zone pélagique (Bearzi, 2005). Les eaux de la Nouvelle-Zélande abritent également jusqu'à 2 000 m de profondeur le lagénorhynque obscur (*Lagenorhynchus obscurus*).

Les populations de baleines à bec communes du canyon Gully, le plus grand de l'Atlantique du Nord (entre 1 000 et 3 000 m de profondeur), ont fait l'objet de plusieurs études (Gowans and Whitehead, 1995; Hooker and Bairds, 1999; Hooker, Whitehead and Gowans, 1999). Cette espèce plonge en général à grande profondeur, de 800 à 1 400 m de profondeur (site de l'association caritative Marine Animal Response Society, consulté en 2013). Ce canyon n'est pas connu pour receler des gisements mais c'est un des exemples les plus connus de canyon sous-marin profond colonisé par des baleines. Les populations de baleines des canyons de Monterey, dans le golfe de Californie, et des Aléoutes dans le golfe de l'Alaska (Shelden et al, 2005) ont également été bien étudiées. Le canyon de Monterey est très fréquenté par les baleines bleues, notamment (Schoenherr, 1991). Monterey et la baie adjacente des Farallones abritent encore des marsouins de Dall, répartis sur le talus continental à des profondeurs variées et des dauphins de Risso, ainsi que des baleines à bosse vers les 1 000 m de

profondeur (Yen et al, 2004). On y trouve également des pinnipèdes (lions de mer et phoques), des albatros aux pieds noirs et des tortues luth (lesquelles descendent jusqu'à 1 000 m de profondeur) (Santora et al, 2012). Dans le canyon des Aléoutes, des baleines franches du Pacifique (*Eubalaena japonica*) ont été capturées jusqu'à 2 000 m de profondeur au niveau de la pente continentale dans la mer de Béring et au-delà de 2 500 m dans le golfe de l'Alaska.

Les dorsales, également, sont largement fréquentées par les mammifères marins. Ainsi, on trouve principalement au niveau de la dorsale médio-atlantique (Doksaeter et al, 2008) :

- le globicéphale noir (*Globicephala melas*), et la baleine-pilote (*Globicephala macrorhynchus*),
- le dauphin commun à bec (*Delphinus delphis*),
- le dauphin à flancs blancs de l'Atlantique (*Lagenorhynchus acutus*),
- et le dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*).

Les baleines-pilotes et les dauphins à flancs blancs ont été observés plutôt au nord, au-delà de la zone de fracture de Charlie Gibbs et les dauphins bleu et blanc plutôt au sud, vers les Açores. Ces cétacés se nourrissent, entre autres, de *Benthoosema glaciale* (poisson téléostéen), *Lampanyctus macdonaldi* (sorte de poisson-lanterne), de dragon-boa (*Stomias boa ferox*) et de poisson-vipère de Sloane ou chauliode de Sloane (*Chauliodus sloani*) classiquement et plus récemment de céphalopodes : *Gonatus sp.* et *Teuthowenia megalops* (genres de calmars) ainsi que d'autres poissons et calmars mésopélagiques (à une profondeur définie dans la publication de Doksaeter comme supérieure à 1 000 m).

De nombreuses autres espèces de cétacés se rencontrent aussi sur la dorsale médio-atlantique : la baleine bleue (*Balenoptera musculus*), le rorqual commun (*Balenoptera physalus*), la baleine à bosse (*Megaptera novaengliae*), le rorqual boréal (*Balenoptera borealis*), le petit rorqual (*Balenoptera acutorostrata*), le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*), les baleines à bec (*Mesoplodon ssp.*) et l'orque ou épaulard (*Orinus orca*) (Doksaeter et al, 2008; Skov et al, 2008). Ces observations ont été faites pendant la première campagne MAR-ECO en 2004 (Doksaeter et al, 2008).

On trouve également, par exemple, le petit rorqual de l'Antarctique (*Balenoptera bonaerensis*) au niveau de la Ride de Maud, dans l'Océan Austral, (Brandt et al, 2011). C'est une zone où la bathymétrie est très hétérogène, variant de 1 600 à 5 000 m (Muench et al, 2001). Brandt et al ont même détecté des petits rorquals ainsi que des oiseaux (pétrels des neiges et sternes arctiques) au niveau d'un mont sous-marin au sud de la marge continentale dans l'Est de la Mer de Weddell, ainsi que quelques petits rorquals et quelques phoques crabiers (*Lobodon carcinophagus*) dans la zone abyssale de la Mer de Weddell.

Les monts sous-marins attirent eux aussi de nombreuses espèces parmi lesquelles les requins, les baleines, les dauphins, les tortues, les oiseaux et les pinnipèdes. (Maxwell et al, 2012). Ces animaux viennent profiter de l'abondante productivité primaire et de l'importante biomasse présente au niveau des monts sous-marins. Ces monts se situent à des profondeurs entre 400 et 1 600 m. Parmi les pinnipèdes, on retrouve le phoque crabier (*Lobodon carcinophagus*) en Antarctique, l'otarie à fourrure du Nord (*Callorhinus ursinus*) dans le Pacifique Nord-Est, le phoque moine hawaïen (*Monachus schauinslandi*) au niveau des dorsales dans les eaux hawaïennes et l'éléphant de mer du sud (*Mirounga leonina*) (Maxwell et al, 2012). Certaines espèces d'oiseaux de mer peuvent descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur à la recherche de nourriture, par exemple des pétrels de Cook et des albatros aux pieds noirs ont été observés sur les pentes (entre 750 m et 1 000 m de profondeur) et au sommet (500-600 m de profondeur) du guyot Fieberling, dans le Pacifique Nord-Est (Haney et al, 1995).

La ZEE calédonienne a une grande importance pour de nombreuses espèces migratrices : zone de transit pour les baleines à bosse (Garrigue et al, 2010), notamment, zone de reproduction pour les dauphins tout comme pour le globicéphale tropical, le grand cachalot (Gabrié et al, 2008), pour les thonidés, etc. Les baleines nagent dans plusieurs directions, jusqu'aux monts sous-marins Antigonía à 1 000 m de profondeur (Garrigue et al, 2010). Il y a des mouvements migratoires entre la Nouvelle-Calédonie et la Nouvelle-Zélande, avec l'Est de l'Australie (Garrigue et al, 2000 et 2002) et jusqu'aux îles Cook (Clapham et al, 2007).

On y trouve encore des phoques communs, des lions de mer, des éléphants de mer, des otaries à fourrure du Nord, otaries de Steller... Les pinnipèdes sont une des attractions préférées des touristes.

Il y a également des tortues-luth, des tortues bâtardes, des tortues caouannes, des tortues vertes, des tortues imbriquées, des baleines grises, des baleines bleues, des rorquals communs, des baleines à bosse, des dauphins, des marsouins du golfe de Californie...

L'otarie à fourrure du Nord, le marsouin du golfe de Californie et la tortue-luth, par exemple, sont aujourd'hui des espèces menacées.

Des baleines à bosse ont également été observées dans les eaux des Tonga, Vanuatu, îles Cook et Polynésie Française (Garrigue et al, 2002).

On voit clairement par cette rapide description non exhaustive que ces animaux descendent à de grandes profondeurs, avec le risque d'être affectés notamment par les déchets du traitement des minerais des sulfures polymétalliques que les industriels se proposent de rejeter vers les 1 000 m de profondeur, en particulier dans le cadre d'une exploitation des encroûtements cobaltifères au niveau des monts sous-marins et des dorsales.

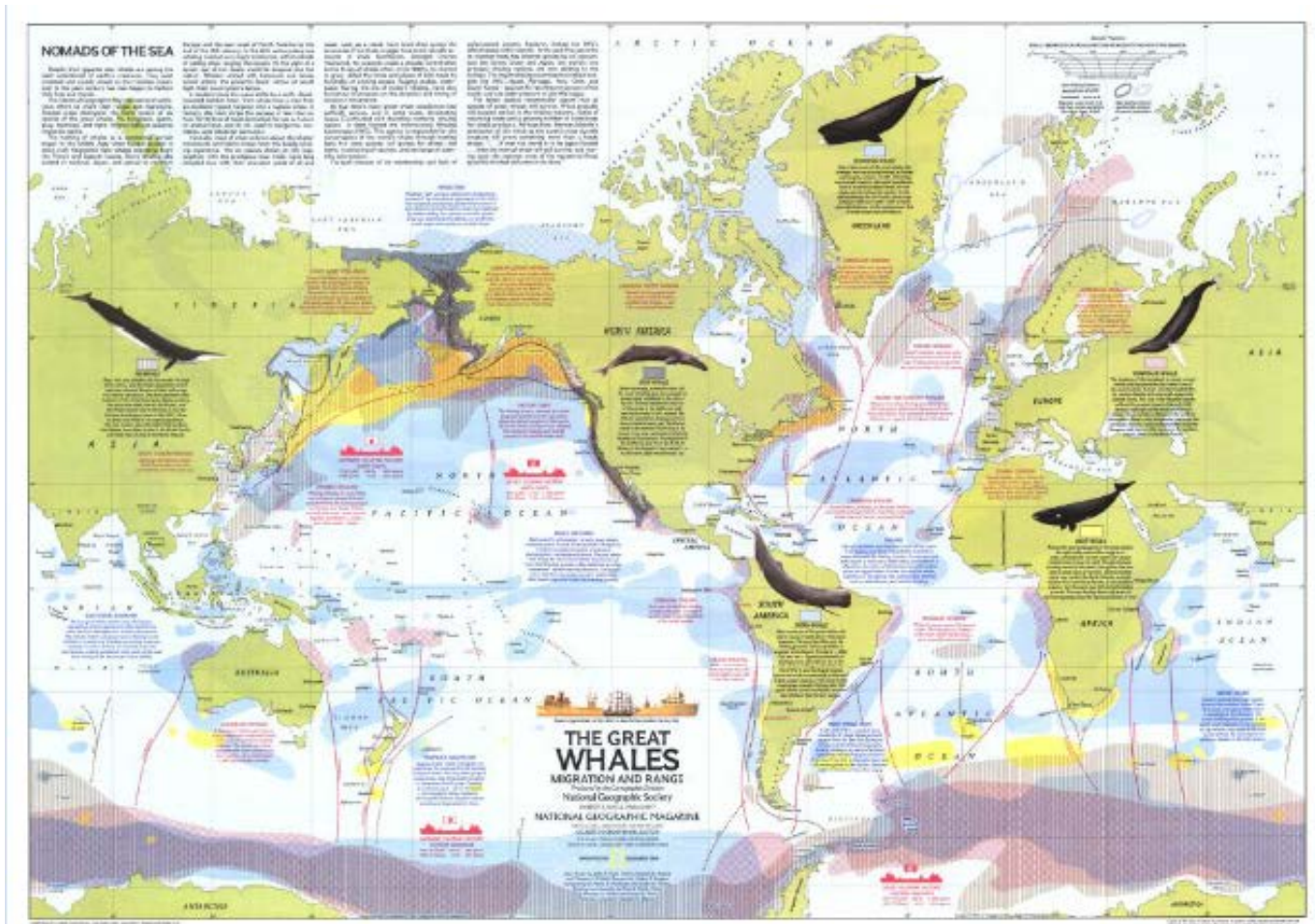


Figure 5-32 Carte de repérage des grandes baleines et de leurs routes migratoires (National Geographic, 1976).

Le tourisme lié à l’observation des baleines et plus généralement des cétacés est passé de 4 à 13 millions de touristes de 1991 à 2008, participant ainsi à l’économie de 119 pays. Il a généré au total 2,1 milliards de dollars US en 2008 (O’Connor et al, 2009) et a créé 13 000 emplois (Cisneros-Montemayor et al, 2010). En fait ces chiffres concernent l’observation des cétacés en général, et non uniquement les baleines (Cisneros-Montemayor et al, 2010). Les impacts environnementaux engendrés par l’exploitation des ressources minérales marines profondes présentent potentiellement un risque pour cette économie.

Tableau 5-17 Revenus et emplois générés par l'observation des baleines à l'échelle mondiale (O'Connor et al, 2009).

Region	Whale watchers		Regional AAGR	Number of countries		2008 Direct Expenditure millions	2008 Total Expenditure millions
	1998	2008		1998	2008		
Africa and Middle East	1,552,250	1,361,330	-1.3%	13	22	\$31.7	\$163.5
Europe	418,332	828,115	7.1%	18	22	\$32.3	\$97.6
Asia	215,465	1,055,781	17.2%	13	20	\$21.6	\$65.9
Oceania, Pacific Islands and Antarctica	976,063	2,477,200	9.8%	12	17	\$117.2	\$327.9
North America	5,500,654	6,256,277	1.3%	4	4	\$566.2	\$1,192.6
Central America and Caribbean	90,720	301,616	12.8%	19	23	\$19.5	\$53.8
South America	266,712	696,900	10.1%	8	11	\$84.2	\$211.8
GLOBAL TOTAL:	9,020,196	12,977,218	3.7%	87	119	\$872.7	\$2,113.1

Region	Number of jobs supported by whale watching	Number of whale watchers per employee
Africa and Middle East	1,065	1,060
Europe	794	867
Asia	2,191	1,078
Oceania and the Pacific Islands	1,868	543
North America	6,278	750
Central America and Caribbean	393	2,051
South America	615	1,272
GLOBAL	13,205	1,183

Country	Whale watchers in 2008	Percentage of total global whale watchers
USA	4,899,809	38%
Australia	1,635,374	13%
Canada	1,165,684	9%
Canary Islands	611,000	5%
South Africa	567,367	4%
New Zealand	546,445	4%
China (Mainland)	307,000	2%
Argentina	244,432	2%
Brazil	228,946	2%
Scotland	223,941	2%
TOTAL	10,506,620	81%
GLOBAL TOTAL	12,977,218	100%

Concernant le Pacifique Sud, la Polynésie Française, la Nouvelle Calédonie, la Nouvelle Zélande, les Fidji, les Tonga, les Samoa, Niue, les îles Cook et l’Australie sont très impliquées dans l’observation des baleines à bosses, notamment (Schaffar and Garrigue, 2007).



Figure 5-33 Pays dont l’économie bénéficie de l’observation des baleines (pays en noir) (O’Connor et al, 2009).



Figure 5-34 Localisation des sites d’observation des baleines (Whale Watching Web, 2013).

Cisneros-Montemayor et coll. (2010) ont réalisé des calculs supplémentaires sur les données de Simon O'Connor et ont estimé que, compte-tenu de la croissance rapide de cette activité touristique, l'observation des baleines pouvait potentiellement rapporter jusqu'à 2,5 milliards de dollars et soutenir jusqu'à 19 000 emplois. Cependant, nous n'avons pas trouvé confirmation de ces estimations dans la littérature scientifique. Le rapport de Simon O'Connor et de ses coll., commandé par le Fonds International pour la Protection des Animaux, semble être le seul document de référence économique cité dans les articles scientifiques ultérieurs.

Pour les états du Pacifique, cette activité est particulièrement lucrative. Par exemple, en 2006, l'observation des baleines a représenté 15% des revenus d'origine étrangère (Kessler et al, 2013) et cela n'a fait qu'augmenter depuis.

Tableau 5-18 Evolution temporelle du nombre de touristes venus observer les baleines dans le Pacifique (O'Connor et al, 2009).

Country	Number of whale watchers		Growth between 1998 and 2008
	1998	2008	
American Samoa	Minimal	Minimal	0%
Antarctica	2,503	45,520	33.7%
Australia	734,962	1,635,374	8.3%
Cook Islands	Minimal	3,989	31.9%
Federated States of Micronesia	230	Minimal	0%
Fiji	Minimal	Minimal	0%
French Polynesia	Minimal	6,442	38.4%
Guam	4,000	221,155	49.4%
Midway	289	Minimal	0%
New Caledonia	1,695	6,222	13.9%
New Zealand	230,000	546,445	9%
Niue	50	290	19.2%
Palau	Minimal	Minimal	0%
Papua New Guinea	Minimal	644	9.9%
Samoa	Minimal	778	12%
Solomon Islands	Minimal	537	7.9%
Tonga	2,334	9,804	15.4%
REGIONAL TOTAL	976,063	2,477,200	9.8%

L'observation des baleines en 2008 a aussi fait venir 221 155 touristes à Guam et 45 520 touristes en Antarctique.

O'Connor et coll. (2009) ont analysé plus finement les gains générés par l'observation des baleines. Il reporte ainsi la participation de cette activité à l'économie d'un certain nombre de pays. Les touristes venus observer les baleines ont dépensé en 2008 un peu plus de 56,5 millions aux îles Canaries, 7,67 millions aux Açores, un peu plus de 7,47 millions à Madère, presque 36,84 millions de dollars en Antarctique, 509 238 dollars aux îles Cook, un peu plus d'1,4 millions en Polynésie Française, un peu plus d'1,3 millions en Nouvelle-Calédonie, presque 32,7 millions à Guam, presque 80,92 millions en Nouvelle-Zélande, 44 169 dollars à Niue, 24 159 dollars en Papouasie Nouvelle-Guinée, 19 851 dollars aux Samoa, 38 923 dollars aux îles Salomon, un peu plus de 2,11 millions aux Tonga, 131,4 millions de dollars à Hawaii et un peu plus de 5,9 millions à l'archipel japonais d'Ogasawara, qui longe la fosse Izu-Bonin.

Les requins, eux aussi, suscitent l'engouement des touristes, en raison de leur image fascinante de prédateurs. Cisneros-Montemayor et coll. (2013) ont écrit récemment un article sur l'observation des requins et ils ont relevé que les espèces attirant le plus les touristes étaient :

- le grand requin blanc (*Carcharodon carcharias*) qui évolue jusqu'à 1 280 m dans l'Atlantique, l'Océan Indien et le Pacifique (y compris en Australie, au Japon, à Hawaii, en Nouvelle-Calédonie, en Nouvelle-Zélande et dans les eaux des îles Marshall);
- le requin-baleine (*Rhincodon typus*) qui fréquente les eaux depuis la surface jusqu'à 700 m dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien, notamment Hawaii, du Japon à l'Australie et la Mer Rouge (sédiments métallifères);
- le requin-tigre, que l'on trouve jusqu'à 370 m de profondeur dans l'Atlantique, le Pacifique et l'Indo-Pacifique (Hawaii, Polynésie française, Nouvelle-Zélande, archipels des Revillagigedo et des Galápagos, Mer Rouge, entre autres);
- le requin-renard (*Alopias sp.*) qui vit jusqu'à 550-730 m dans l'Atlantique et le Pacifique selon les espèces;
- le requin pèlerin (*Cetorhinus maximus*) qui fréquente les eaux de l'Atlantique Ouest du Canada jusqu'à la Floride, dans l'Atlantique Nord, en particulier dans la Mer de Barents, les eaux du Pacifique du Japon à la Nouvelle-Zélande et de l'Alaska au Chili, jusqu'à 2 000 m de profondeur;
- le requin-coraïl (*Triaenodon sp.*), requin de récif mais qu'on trouve jusqu'à 330 m de profondeur;
- le requin-ange, le requin-marteau, le requin des Galápagos, le requin gris de récif, la raie-manta et les Dasyatidées (à moins de 300 m de profondeur).

On trouve encore de nombreuses autres espèces de requins qui fréquentent des eaux assez profondes :

- le requin féroce (*Odontaspis ferox*) évolue habituellement de la surface à 880 m et descend jusqu'à 2 000 m de profondeur dans les eaux de Madère, de la Nouvelle Zélande, d'Hawaii et de la baie de Californie, entre autres;
- le requin-lutin (*Mitsukurina owstoni*) va jusqu'à 1 300 m dans les canyons et au niveau des monts sous-marins de l'Atlantique, de l'Océan Indien et du Pacifique, (Madère et Nouvelle-Zélande, entre autres);
- le requin-lézard (*Chlamydoselachus anguineus*) évolue entre 120 et 1 280 m habituellement, et peut aller jusqu'à 1 570 m dans l'ouest de l'Océan Indien, le Pacifique (du Japon à la Nouvelle-Zélande et de la Californie au Nord du Mexique) et dans l'Atlantique Est;
- le requin à pointes blanches (*Carcharhinus albimarginatus*) se retrouve jusqu'à 800 m de profondeur dans l'ouest de l'Océan Indien (y compris la Mer Rouge) et le Pacifique (du Japon à l'Australie et la Polynésie française, la baie de Californie, l'archipel des Revillagigedo, les Galápagos...);
- le requin bleu (*Prionace glauca*) descend jusqu'à 1 000 m dans l'Atlantique et le Pacifique (dont la Nouvelle-Calédonie et la Nouvelle-Zélande);
- le requin dormeur du Pacifique (*Somniosus pacificus*) évolue entre la surface et 2 000 m de profondeur dans le nord du Pacifique;
- le requin du Groenland (*Somniosus microcephalus*) évolue entre la surface et 2 200 m dans le Nord de l'Atlantique et l'Océan Arctique;
- le requin mako (*Isurus oxyrinchus*) se trouve jusqu'à 740 m dans l'Atlantique et le Pacifique (dont Hawaii, la Nouvelle-Zélande et le sud des îles Aléoutes);

- le requin-taupe commun (*Lamna nasus*) jusqu'à 740 m dans l'Atlantique, le Pacifique, l'Océan Indien et l'Antarctique (dont précisément l'ouest de la Mer de Barents, la Nouvelle-Zélande, les Kerguelen) et le requin taupe du Pacifique (*Lamna ditropis*) jusqu'à 650 m dans le nord du Pacifique, notamment la baie de Californie;
- le requin soyeux (*Carcharhinus falciformis*) évolue jusqu'à 4 000 m dans l'Atlantique et le Pacifique (dont Madère, la Mer Rouge, la baie de Californie et la Nouvelle-Zélande, Hawaii, les îles Phoenix, les îles de la Ligne);
- le requin griset (*Hexanchus griseus*) évolue habituellement entre la surface et 1 100 m mais descend jusqu'à 2 500 m de profondeur dans l'Atlantique et le Pacifique (y compris la Nouvelle-Zélande, Hawaii et la baie de Californie);
- le requin perlon (*Heptranchias perlo*) descend jusqu'à 1 000 m et vit dans l'Atlantique, l'Océan Indien et le Pacifique Ouest et Sud-est;
- le requin babosse jusqu'à 810 m dans l'Atlantique, l'ouest de l'Océan Indien et le centre du Pacifique;
- on trouve encore des requins-scies jusqu'à 310-430 m dans l'Océan Indien (FishBase).

L'observation des requins est une industrie relativement récente. On comptait en 2011 un total de 376 exploitants écotouristiques, répartis en 83 endroits correspondant à 8 régions géographiques dans le monde : 1) Etats-Unis; 2) Amérique Centrale et du Sud; 3) les grandes Caraïbes (y compris les Bahamas; 4) l'Europe; 5) l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient; 6) l'Afrique du Sud et de l'Est (y compris les Seychelles et Madagascar); 7) l'Asie et l'Indonésie et 8) l'Océanie dont la Papouasie Nouvelle-Guinée, l'Australie, la Nouvelle Zélande et les îles du Pacifique Sud (Gallagher et al, 2011).

On sait, par exemple, que pour les Palaos, le seul sanctuaire pour requins a rapporté 8% du PIB du pays et aux Fidji, la plongée avec les requins a rapporté ainsi au total environ 42,2 millions de dollars US en 2011 (Vianna et al, 2011).

L'observation des requins rapporte actuellement environ 314 millions de dollars par an dans le monde, soutient plus de 10 000 emplois et a intéressé 590 000 touristes. Ce secteur pourrait doubler au cours des 20 prochaines années (Cisneros-Montemayor et al, 2013).



Figure 5-35 Sites d'observation des requins inclus dans l'étude de Cisneros-Montemayor et al, 2013. Les cercles noirs indiquent les sites pour lesquels on dispose de données économiques et les cercles blancs les sites pour lesquels il n'y a pas de données économiques disponibles.

Les îles Fidji, les Palaos, les îles Marshall, Tokelau, Guam et les îles Mariannes du Nord, dans le Pacifique, les Maldives dans l'Océan Indien, le Honduras et les Bahamas, dans l'Atlantique ont tous créé un sanctuaire pour les requins et choisi d'abandonner la pêche aux requins (Brunnschweiler, 2010).

Tableau 5-19 Localisations des sites d'observation des requins (par pays, dans l'ordre alphabétique) avec les données disponibles sur les dépenses faites par les touristes venus observer les requins par an (seules les données disponibles sont incluses, les évaluations ne sont pas prises en compte) par Cisneros-Montemayor et al, 2013.

Site	Shark watching expenditures	Shark landed value
Australia ^{1,2,3}	23,313	10,714
Bahamas ^{4,5}	82,267	0.1
Belize ⁶	361	24
Costa Rica ⁷	5,950	2,924
Egypt ⁵	139	366
Fiji ⁸	223	
French Polynesia ⁹	5,404	220
Honduras ⁵	144	
Indonesia ^{3,5}	4,058	68,030
Maldives ^{10,11}	11,334	525
Micronesia ³	4,000	
Mexico ^{5,12,13}	12,412	21,523
Palau ^{3,14}	20,346	
Philippines ¹⁵	226	5,648
Seychelles ¹⁵	3,470	14
South Africa ^{16,17}	6,074	478
Spain ¹⁸	24,544	44,437
Thailand ¹⁹	4,200	12,362
United Kingdom ⁵	32	14,534
USA ^{5,20}	6,355	17,662
<i>Total</i>	214,852	199,469

Toutes les valeurs sont par années, en milliers de dollars américains, au taux de change de 2011.

Il est impossible de projeter les gains obtenus d'un lieu à l'autre parce que la fréquentation touristique ne tient pas uniquement à la présence des requins mais aussi au confort, aux conditions de transport et de logement et à bien d'autres services en surface, sans compter que cette présence n'est pas égale pour toutes les espèces de requins.

Cependant, la synthèse des différentes études menées jusqu'à maintenant peut donner un aperçu de cette forme de tourisme relativement lucrative. Ainsi, 76 000 plongées d'observation de requins ont rapporté aux Maldives 2,3 millions de dollars américains en 1996. Cette contribution au PIB national en 2010 a été estimée supérieure à 30%. Au Bahamas, les activités avec les requins ont rapporté 78 millions de dollars américains en un an. En Australie, 8 000 à 10 000 personnes viennent pour cela (Catlin et al, 2010) et aux Seychelles, les touristes sont prêts à payer entre 30 et 900 dollars américains pour observer les requins et les baleines (Gallagher et al, 2011).

Ces espèces, dans leur environnement naturel, soutiennent des activités récréatives variées et des intérêts esthétiques tels que la pêche touristique, le "snorkelling", et la photographie sous-marine (Gallagher et al, 2011) tandis que l'éco-tourisme véhicule les valeurs marketing de « naturel » et de « retour aux sources », devenant ainsi de plus en plus populaire.

Tableau 5-20 Bénéfices annuels estimés générés par l'observation des requins, par région; Dépenses en dollars américains, au taux de 2011; emplois à temps plein (Cisneros-Montemayor et al, 2013).

Region	Expenditure (1,000s USD)	Shark	
		watchers (1,000s)	Employment
Africa	14,465	34	567
East Africa	7,550	3	331
North Africa	840	0.4	38
South Africa	6,075	31	198
Americas	171,246	198	6,819
Caribbean	123,642	107	5,303
Central America	19,078	37	1,001
North America	15,405	43	138
South America	13,121	11	377
Asia	30,539	261	1,132
East Asia	3,187	2	79
South-east Asia	10,020	20	215
South Asia	6,075	237	717
West Asia	3,219	2	121
Europe	28,315	39	528
Western Europe	28,315	39	528
Oceania	69,785	58	1,625
Australia & New Zealand	39,908	29	267
Melanesia, Micronesia, Polynesia	29,877	29	1,358
<i>Total</i>	314,352	590	10,671

L'observation des cétacés et des requins est une industrie touristique en plein essor qui participe grandement à la prospérité d'un grand nombre de pays, notamment les îles du Pacifique, de l'Atlantique et de l'océan Indien. Or un nombre non négligeable de ces espèces fréquente les eaux profondes, dans la zone des 800-1 000 m et même bien au-delà, où elles deviennent vulnérables aux rejets des déchets miniers, voire aux procédés miniers eux-mêmes. Il reste cependant difficile d'évaluer l'impact d'activités minières sur ces populations, certaines étant par ailleurs déjà menacées par d'autres activités anthropiques.

5.4.4.3. *Le tourisme d'aventure en eaux profondes*

Un cas de ce type de tourisme a été reporté aux Açores : des vaisseaux de recherche ont embarqué un petit nombre de touristes en 2002 pour les emmener voir des sites hydrothermaux. Les touristes sont restés un mois sur le vaisseau de recherche russe *R.V. Akademik Keldysh*, et ont été conduits sur différents sites hydrothermaux près des Açores pour \$20,000-\$55,000. Les taxes incluaient une participation comme observateur dans trois vaisseaux scientifiques submersibles Mir, sur différents sites parmi lesquels Snake Pit, TAG, Broken Spur, Lost City and Lucky Strike. Les scientifiques russes sont aussi connus pour emmener des touristes sur le site Rainbow. Au début, il s'agissait pour les scientifiques russes d'obtenir des revenus supplémentaires pour leurs recherches mais **ce sont maintenant de véritables plongées à but touristique qui sont organisées par des sociétés comme Deep Ocean Expeditions LLC**. L'ampleur de ce type de tourisme, par contre, parfois confondu avec la recherche scientifique, est difficilement chiffrable (CBD, 2007).

5.4.4.4. Héritage historique et patrimoine de l'humanité

Attirant l'intérêt pour ses réserves de sulfures polymétalliques au niveau de la Ride des Galápagos, l'archipel des Galápagos revêt surtout une grande importance à la fois pour sa biodiversité elle-même et pour son rôle dans l'histoire des sciences, en tant que sujet d'étude de Darwin, ayant conduit à l'écriture de « De l'Origine des espèces ». Le parc national des Galápagos et la réserve marine des Galápagos sont classés patrimoine mondial par l'UNESCO (Castrejon et al, 2012). Le taux d'endémisme y est très fort.

Une station de recherche : la station Charles Darwin, comprenant un laboratoire de biologie marine y a été construite. Pour reprendre la description de l'UNESCO, « *les Galápagos sont considérées comme « un musée vivant et une vitrine de l'évolution »* » (site de l'UNESCO, consulté en 2013). Il existe en outre une fondation internationale à but non lucratif, la Fondation Charles Darwin pour les îles Galápagos qui, au travers des projets scientifiques, œuvre pour la préservation de la biodiversité aux Galápagos depuis 1959. Cette fondation a également un rôle de support auprès du gouvernement de l'Équateur.

Le golfe de Californie, situé au Nord-Est du Mexique, est également protégé. Il s'agit d'une zone soumise à une forte activité sismique (tremblements de terre réguliers, d'amplitude variant entre 5 et 7 sur l'échelle de Richter) et aux tourbillons.

L'UNESCO décrit ainsi le patrimoine du golfe de Californie : « *Le site comprend 244 îles, îlots et zones côtières situés dans le golfe de Californie au Nord-Est du Mexique. La mer de Cortez et ses îles sont considérées comme un laboratoire naturel pour la recherche en matière de spéciation. De plus, presque tous les grands processus océanographiques à l'œuvre dans les océans de la planète sont représentés sur le site, lui donnant une importance sans commune mesure pour l'étude. Le site est d'une beauté naturelle remarquable et offre un paysage spectaculaire d'îles au relief accidenté composé de hautes falaises et de plages de sable, qui contrastent avec le cadre désertique qui s'y reflète et les eaux environnantes turquoise. Le site abrite 695 espèces de plantes vasculaires, plus que dans tout autre site marin et insulaire de la Liste du patrimoine mondial. Il est également exceptionnel du point de vue du nombre d'espèces de poissons : 891, dont 90 endémiques. De plus, le site héberge 39 % du nombre total d'espèces de mammifères marins et un tiers du nombre total des espèces de cétacés de la Terre. »*

L'archipel d'Ogasawara a également été nommé au patrimoine mondial de l'humanité en 2011.

Il en est de même pour les récifs d'Entrecasteaux, qui font partie des six lagons de Nouvelle-Calédonie classés au patrimoine mondial de l'UNESCO.

La valeur sociale de ces sites est due à l'intégrité des écosystèmes et à leur pérennisation. A cause des répercussions sur la chaîne alimentaire tout au long de la colonne d'eau et le problème de rejet des déchets en surface ou à 1 000 m de profondeur, une exploitation minière, même profonde, paraît difficilement compatible avec le maintien de ce service.

Par ailleurs, une partie de la province à nodules Clarion-Clipperton est protégée par l'Autorité Internationale des Fonds (site de l'AIFM, consulté en 2013).

Certains champs hydrothermaux ont également été déclarés zones protégées. Par exemple, le champ hydrothermal Endeavour, depuis 2003, est la première zone de protection marine du Canada (Ministère Pêche et Océan Canada, consulté en 2013). Autre exemple : les champs

hydrothermaux Lucky Strike et Menez Gwen, ainsi que le mont sous-marin Sedlo font partie de l'aire marine protégée des Açores, créée en 2006 (Réseau OSPAR, Cf. chapitre 6).

5.4.4.5. *Paléoclimatologie*

L'étude des communautés benthiques profondes a permis de mettre en évidence la relation entre des phénomènes climatiques ou ayant lieu à la surface de la mer et les densités de populations de certaines espèces. Par exemple, Heip et coll. (2009) se sont intéressés plus particulièrement à la plaine abyssale de Porcupine, dans l'Atlantique, à 4 850 m de profondeur. Ils développent ainsi l'exemple de la relation entre la variabilité des cycles de productivité et l'Oscillation Nord Atlantique (phénomène atmosphérique et océanique). Ces oscillations induisent des changements dans la biologie des couches supérieures de l'océan et dans l'exportation de la matière organique de la zone euphotique au plancher marin. Ces variations dans la quantité et la qualité de la nourriture entraînent une succession d'accroissements et de déclin soudains de la population chez certaines espèces comme les holothuries, les foraminifères ou d'autres petits animaux benthiques.

Les encroûtements cobaltifères ne sont pas les seuls à pouvoir être utilisés comme archives paléo-océanographiques (cf. le Chapitre 2). Les récifs de coraux tropicaux massifs, qui semblent pouvoir vivre plusieurs siècles, peuvent aussi apporter des informations, en tant qu'enregistrements des variations climatiques océaniques. Plus précisément, ce sont **les squelettes des coraux froids qui ont un fort potentiel en paléoclimatologie**. Toutefois, cet usage est limité par leur distribution géographique. Les variations climatiques sont « enregistrées » dans les cercles de croissance du corail. Les informations fournies par l'étude des coraux froids contribuent à la compréhension du changement du climat global et pourraient aider à prédire son évolution dans l'avenir (CBD, 2007).

Les éponges siliceuses (Hexactinellides), que l'on trouve associées aux coraux profonds (on trouve certaines de ces éponges jusqu'à 650 m de profondeur), **peuvent également servir d'indicateurs** : une étude des squelettes des éponges dans le bassin intérieur de Howe Sound en Colombie Britannique, a mis en évidence l'existence des stress climatiques passés (Leys et al, 2004).

L'avancée des recherches dans ce domaine est donc directement liée à la qualité et à la stabilité des terrains d'études et leur destruction pourrait conduire à une perte irréversible d'informations capitales pour avancer dans la compréhension de l'évolution du climat.

5.4.4.6. Recherche en biologie évolutive et en écologie des milieux extrêmes

Les bactéries piézophiles des fosses océaniques possèdent des caractéristiques très particulières et intéressantes pour l'étude des origines de la vie et de son évolution. Les chercheurs s'intéressent notamment à l'exploration des mécanismes d'adaptation aux fortes pressions.

Les micro-organismes ne sont pas les seuls à présenter un intérêt pour les biologistes de l'évolution et les paléobiologistes : on trouve aussi dans les grandes profondeurs marines quelques fossiles vivants : le requin-lézard qui vit jusqu'à 1 500 m de profondeur dans l'Atlantique et le Pacifique, les crinoïdes (holothuries, étoiles de mer, nombreuses dans les plaines abyssales notamment)... **Les fossiles vivants apportent des informations exceptionnelles sur les espèces disparues.**

La Nouvelle-Calédonie, en particulier abrite un certain nombre de ces « espèces-reliques » : le poisson-échasse *Bathypterois* sp., vivant entre 250 et 5 150 m selon espèces (la plupart évoluant entre 1 000 et 3 000-5 000 m), (FishBase consulté en 2013; Grandperrin et al, 1997), et qui a aussi une importance culturelle, le crinoïde *Gymnochrinus richeri* vivant à plus de 500 m de profondeur et dont on a isolé des molécules aux propriétés antivirales contre le virus de la dengue (Laurent, 1999), les crevettes *Pandalidae*, *Plesionika*, (on trouve aussi des espèces en Polynésie françaises et aux Canaries, entre autres) la *Plesionika narval*, par exemple vit entre 10 et 900 m de profondeur (Bay-Nouailhat, 2010) et d'autres espèces de *Plesionika* ont été pêchées à plus de 600 m de profondeur (Crosnier, 1986)..., la *Neoglypha neocaledonica*, rarissime, (un seul individu capturé) a été trouvé entre 350 et 530 m de profondeur sur la pente d'un mont sous-marin, le banc Capel (Richer de Forges, 2006), le nautilaire, vivant à 400 m de profondeur et qu'on trouve aussi aux Fidji, les éponges siliceuses, etc...

Tableau 5-21 Thématiques des recherches menées sur les micro-organismes piézophiles (Abe et Horikoshi, 2001).

Organisms	Optimal growth conditions	Investigations
Psychrophilic piezophiles		
<i>Colwellia hadaliensis</i> BNL-1	75–94 MPa at 2°C	Physiology
<i>Moritella japonica</i> DSK1	50 MPa at 15°C	Physiology
<i>Moritella yayanosii</i> DB21MT-5	80 MPa at 10°C	Membrane lipids
<i>Photobacterium profundum</i> SS9	28 MPa at 9°C	Gene expression, membrane protein, membrane fatty acid
<i>Photobacterium profundum</i> DSJ4	10 MPa at 10°C	Physiology
<i>Shewanella benthica</i> strains	50–70 MPa at 10–15°C	Physiology, gene expression, membrane fatty acid
<i>Shewanella violacea</i> DSS12	30 MPa at 8°C	Gene expression respiratory system
Other unidentified strains	41–62 MPa at 3°C	Physiology
Thermophilic piezophiles		
<i>Methanococcus igneus</i>	51 MPa at 90°C ^c	Pressure stabilization of hydrogenase
<i>Methanococcus jannaschii</i>	75 MPa at 86 and 90°C, 51 MPa at 90°C ^c	Pressure stabilization of hydrogenase, Methanogenesis
<i>Palaeococcus ferrophilus</i> DMJ	30 MPa at 84°C	Physiology
<i>Pyrococcus abyssi</i> GE5	20–40 MPa at 73–112°C ^c	Protein synthesis
<i>Pyrococcus furiosus</i>	45 MPa at 107.5°C ^c	Pressure stabilization of GDH and DNA polymerase
<i>Pyrococcus</i> sp. ES4	45 MPa at 111°C ^c	Pressure stabilization of DNA polymerase
<i>Pyrococcus</i> sp. GB-D	20 MPa at 103°C ^c	Physiology
<i>Thermococcus aggregans</i> TY	20 MPa at 75°C	Physiology
<i>Thermococcus barophilus</i> MP	40 MPa at 85°C	Physiology
<i>Thermococcus guaymasensis</i> TYS	20 and 35 MPa at 85°C	Physiology
<i>Thermococcus peptonophilus</i> OG1	45 MPa at 90 and 95°C	Physiology
<i>Thermococcus</i> sp. ES1	22 MPa at 91°C ^d , 22 MPa at 103°C ^d	Physiology
<i>Thermosipho japonicus</i> IHB1	20 MPa at 73°C	Physiology
<i>Thermotoga maritima</i>	51 MPa at 95°C ^c	Pressure stabilization of GAPDH
<i>Thermus aquaticus</i>	45 MPa at 100°C ^c	Pressure stabilization of DNA polymerase
Mesophilic piezophiles^b		
<i>Desulfovibrio profundus</i> 500-1	15 MPa at 30°C	Sulfate reducing activity
<i>Pseudomonas</i> sp. BT1	10 MPa at 30°C, 20 MPa at 37°C	Membrane fatty acid
<i>Pseudomonas</i> sp. MS300	60 MPa at 25°C	Production of α -maltotetrahydrolase

^aOrganisms whose optimal growth pressures have not been determined are also included.

^bPiezophiles whose optimal growth temperatures at 20–37°C are tentatively termed as mesophilic piezophiles.

^cExaminations were performed under the indicated conditions.

^dThe condition is not optimal for growth but piezophily was exhibited.



Figure 5-36 *Bathypterois* sp. (30 cm), photographié par 2 013 m de profondeur dans le Bassin des Loyauté (Grandperrin et al, 1997).

Les monts sous-marins de la Ride de Norfolk et de celle des Loyauté présentent un fort taux d'endémisme et une faune très diversifiée. Des études propres aux monts sous-marins de la Ride de Norfolk, en particulier, illustrent cet endémisme avec la mise en évidence de 61% d'espèces nouvelles sur 1 619 espèces échantillonnées et citent des exemples d'espèces plus ou moins vulnérables, comme les éponges calcaires, possédant une longévité de plusieurs siècles mais aussi une croissance extrêmement lente (1cm/siècle). **Toutes ces espèces d'intérêt sont donc très vulnérables.**

Les espèces associées aux conditions physiques et chimiques des grandes profondeurs ont fourni aux biologistes des modèles uniques pour mieux comprendre les adaptations du vivant en conditions extrêmes et en comprendre les mécanismes. Les grands fonds offrent en effet toute une gamme d'habitats caractérisés par de fortes températures, des degrés élevés d'acidité, de toxicité (sulfure et métaux), de fortes teneurs en CO₂ (hypercapnie) et de faibles teneurs en oxygène (hypoxie). Ces adaptations se reflètent dans leurs biomolécules, telles que celles qui forment leurs matrices extracellulaires (collagène), leurs systèmes enzymatiques ou encore les hémoglobines. Ces biomolécules servent de modèles pour de s approches de synthèse de molécules et matériaux d'intérêt commercial ou de biotechnologie. Ces adaptations concernent également les associations spécifiques, notamment les nombreuses symbioses bactériennes dont la régulation par l'hôte pose des questions et dont l'intérêt potentiel en domaine médical est identifié. Un peptide antimicrobien aux propriétés prometteuses dans la lutte contre les souches multirésistantes a ainsi été extrait d'un annélide hydrothermal. Les écosystèmes profonds associés aux ressources minérales, eux-mêmes, font intervenir des processus originaux dont la connaissance dépasse le cadre de ces environnements particuliers. La fixation de CO₂ par chimiosynthèse à partir du sulfure d'hydrogène, mise en évidence dans ces écosystèmes où elle domine la production primaire, apparaît aujourd'hui comme un processus-clé du cycle du carbone océanique ou encore de la mitigation des impacts de phénomènes d'anoxie en zone côtière. Les connaissances acquises grâce à la mobilisation de nouvelles méthodes de biologie moléculaire sur les processus qui sont associés aux transformations biogéochimiques des métaux commencent à éclairer les mécanismes qui s'opèrent dans milieux plus complexes, comme les milieux littoraux pollués. Les écosystèmes associés à des conditions environnementales extrêmes constituent eux-mêmes des modèles pour mieux comprendre les effets de stress multiples sur les communautés d'organismes, les contraintes sur l'établissement de la biodiversité dans les environnements soumis à des perturbations.

Enfin, les réseaux de monts sous-marins ou de zones hydrothermales actives et inactives offrent des habitats fragmentés particulièrement pertinents pour l'étude de l'établissement des patrons de diversité génétique et de la connectivité des métacommunautés marines.

5.4.4.7. *Recherches sur l'origine de la vie et en astrophysique/astrobiologie*

Les sites hydrothermaux sont également étudiés dans le cadre des recherches sur les origines de la vie (Westall et al, 2002; Armstrong et al, 2012; Sousa et al, 2013), **sur l'abiogenèse** (Martin et al, 2008; Howe, 2009) **ou encore sur les possibilités d'une vie extraterrestre** (Seckbach, 2000), **sur des planètes supposées présenter des conditions environnementales similaires à celles des sites hydrothermaux** (Howe, 2009).

D'après Armstrong et coll. (2010) dans leur rapport pour HERMIONE, certains scientifiques avancent l'idée que le développement de la vie au niveau des cheminées hydrothermales reflète ce qu'a pu être celui de la vie sur Terre, soutenant la théorie que la vie a débuté autour des sources chaudes sous-marines.

D'autres scientifiques favorisent la théorie de l'« Eden hyperthermophile », selon laquelle la vie s'est développée dans les deux types d'environnements : hydrothermal et non hydrothermal. Dans les deux cas, les systèmes hydrothermaux semblent avoir joué un rôle-clé dans le développement de la vie sur Terre et dans la différenciation d'un ancêtre commun entre bactéries et archées. De nos jours, ces espèces peuvent être différenciées par la séquence de leur ARN ribosomal. L'analyse moléculaire a révélé que l'arbre phylogénétique des archées a émergé dans un domaine de vie différent de celui des bactéries et des eucaryotes, prouvant ainsi l'importance des sources hydrothermales dans sa phylogénie et son évolution. L'évidence géologique a montré que la vie est apparue sur Terre il y a au moins 3,5 milliards d'années, comme le démontrent des traces d'activité photosynthétique datant de 3,8 milliards d'années. Par comparaison, les micro-organismes sulfato-réducteurs, typiques des écosystèmes des sources hydrothermales remontent jusqu'à 3,47 milliards d'années. L'activité microbienne des sources hydrothermales daterait de 3,235 milliards d'années.

Les eaux profondes ont aussi fourni un espace pour la diversification des organismes eucaryotes en les protégeant des rayons UV, cause de lésions dans les molécules d'ADN. Dans les tapis microbiens marins profonds actuels, les relations symbiotiques entre procaryotes et eucaryotes ont permis à ces derniers de surmonter les conditions anoxiques de leur milieu et de se diversifier. Ces symbioses sont importantes à la lumière de l'augmentation des habitats appauvris en oxygène à cause des activités humaines (dits « zones mortes ») et pourraient jouer un rôle crucial dans le maintien de certains processus dans les océans, tels que les cycles des nutriments.

Il est évident que la vie photosynthétique en conditions oxygéniques et anoxygéniques comme la vie non-photosynthétique a existé autour des cheminées hydrothermales depuis plus de 3 milliards d'années.

Les techniques de biologie moléculaire ont aussi montré que la vie chimiosynthétique a précédé la vie photosynthétique sur les sites hydrothermaux.

Le rôle des cheminées hydrothermales, en regard des études sur l'origine de la vie, pourrait nécessiter leur préservation, en raison de leur importance emblématique et scientifique (Armstrong et al, 2012).

La modélisation thermodynamique de la synthèse organique s'est largement concentrée sur les systèmes hydrothermaux profonds. Quand l'eau de mer se mélange aux fluides hydrothermaux, des gradients redox s'établissent, ce qui peut servir de source d'énergie pour la formation de biomolécules et de composés organiques à partir d'un matériel de départ inorganique. Les transferts d'énergie, variant selon le type de roche-hôte, permettent les processus biotiques et abiotiques. Les scénarios biogéochimiques évaluent l'énergétique de la synthèse organique dans les systèmes hydrothermaux actuels et les environnements supposés de la Terre primitive. Des études montrent de manière constante et répétée que la formation

de composés organiques et de biomolécules relativement simples peut être exergonique dans les conditions existant dans les systèmes hydrothermaux (Amend et al, 2013).

Les sites hydrothermaux ne sont pas les seuls environnements marins profonds à intéresser les astrobiologistes.

Les sites de serpentinisation riches en hydrogène apparaissent comme une autre alternative. En effet, le processus de serpentinisation crée des conditions fortement réductrices et produit des fluides fortement enrichis en hydrogène et en méthane. Quelques micro-organismes sont capables d'exploiter ces composés pour créer de l'énergie et produire de la biomasse. Ces sites soutiennent ainsi le développement de communautés biologiques basées sur une énergie chimique plutôt que photosynthétique. **L'abondance d'énergie chimique et les conditions favorables à la synthèse organique font des serpentinites un bon candidat comme site de l'apparition de la vie sur terre, ainsi qu'une cible prioritaire dans la recherche sur la vie hors de notre système solaire** (Schulte et al, 2006; McCollom et Seewald, 2013).

Par extension, les astrobiologistes s'intéressant à la possibilité qu'il existe une vie sur Mars se sont également inspirés des systèmes hydrothermaux (Horneck, 2000; Cousins et al, 2013).

De même, **d'autres astrobiologistes s'interrogeant sur une vie possible sur la lune Europe, s'intéressent, eux, aux bassins profonds** présentant des conditions environnementales extrêmes similaires à celles de ce satellite de Jupiter (par exemple, la Fosse des Mariannes (Marion et al, 2003)).

Les astrophysiciens s'intéressent également aux grandes profondeurs. Un des projets européens majeurs dans ce domaine est le projet Antares, un télescope sous-marin destiné à étudier les neutrinos (dossier de presse du CNRS, 2003), par 2 500 m de fond en Méditerranée (Deschamps et al, 2003).

5.4.4.8. Les milieux marins profonds, source d'inspiration pour des activités créatrices

La faune des milieux marins profonds a également suscité une activité créatrice qui ne cesse de se développer et de s'élargir.

On y retrouve, bien sûr, des expositions, des documentaires, des illustrations scientifiques et des œuvres littéraires scientifiques ou bien de vulgarisation scientifique mais aussi beaucoup d'œuvres de fiction : des livres pour enfants, des bandes dessinées, des romans... (banque de données WorldCat.org, Fnac, Amazon).

Plus anecdotiquement, les milieux marins profonds ont inspiré également, parfois, des supports inattendus tels que de la musique (un enregistrement des sons du volcan sous-marin Loihi près d'Hawaii et de chant des baleines, « Nā koholā o Lō'īhi » (Whales of Lō'īhi), paru en 2003, un album de rock « Créatures des abysses » du groupe Zenzile, paru en 1997)... et même 3 attractions Disney et un jeu vidéo inspirés de l'œuvre de Jules Verne « 20 000 lieues sous les mers ».

Des espèces emblématiques font partie des cultures locales comme en Nouvelle-Calédonie et en Nouvelle-Zélande. Ainsi, par exemple, on les retrouve sur des timbres.

Quelques artistes y puisent aussi leur inspiration, comme l'artiste vannier new-yorkais Doug Johnston, par exemple, avec son œuvre nommé « Riftia » (site de la marque Totokaelo, consulté en 2013), ou des peintres, comme John Meszaros (site officiel de l'artiste, consulté en 2013). Ces deux derniers artistes se sont inspirés de la biodiversité des sites hydrothermaux actifs.

5.4.4.9. Conclusion

Que ce soit donc au niveau du patrimoine, de la recherche ou de la culture, l'exploitation minière en milieu marin profond risque d'avoir un impact certain, avec, dans certains cas, des implications financières notables et des conséquences sur les avancées scientifiques non négligeables, même si ces conséquences restent difficilement chiffrables à l'heure actuelle.

5.5. Conséquences économiques possibles

A l'heure actuelle, les études d'impacts environnementaux restent circonscrites aux impacts fonctionnels sur l'environnement. Or le bon fonctionnement des écosystèmes et l'état des divers types d'environnement déterminent la qualité et la valeur des services qu'ils rendent à la société humaine. Une baisse de qualité/rendement des services est fortement susceptible d'avoir des conséquences économiques importantes. **La méthodologie d'évaluation des conséquences économiques des impacts environnementaux reste cependant encore à mettre en place et à systématiser.**

Les impacts environnementaux risquant d'avoir des conséquences économiques sont liés à une atteinte de la biodiversité, sont généralement indirects et agissent en synergie avec des impacts environnementaux liés à d'autres activités anthropiques.

Les services les plus susceptibles d'être impactés sont la pêche et le tourisme.

La pêcherie d'eau profonde (à partir de 400 m de profondeur) est la plus susceptible d'être impactée, et ce à plusieurs niveaux :

1) **Par la destruction de l'habitat des espèces pêchées ou de leurs proies.**

En effet, la plupart des poissons d'eau profonde ont un faible taux de reproduction et sont déjà relativement peu nombreux. La perte de leur habitat ou une trop forte déstabilisation du réseau trophique dont ils dépendent peut amener une diminution significative des stocks. **Or, selon son ampleur, la réduction de ces stocks pourrait entraîner une flambée du prix des espèces raréfiées, d'où une baisse de la consommation de ces espèces pour des raisons économiques et donc une perte de revenus pour les pêcheurs à moyen, voire long terme. Si cet état de fait devait se prolonger, cela pourrait même atteindre le secteur de l'emploi, très problématique dans certaines régions.**

2) **Par une augmentation d'éléments toxiques (métaux lourds...) dans l'organisme, rendant les espèces pêchées impropres à la consommation humaine et animale.**

L'augmentation des éléments toxiques dans la chaîne alimentaire pourrait être due :

- soit à une perte importante des micro-organismes qui participent à la régulation des cycles biogéochimiques et à la détoxification des flux

d'éléments métalliques ou toxiques (arsenic, cadmium, mercure...), perte importante au point d'avoir un impact significatif sur ces cycles.

- soit à la pollution générée par le rejet de grandes quantités de sédiments et d'eau des grands fonds riche en métaux lourds.

- 3) Le rejet des sédiments, eaux de fond et débris de minerai à diverses hauteurs de la colonne d'eau hauteurs est également susceptible de modifier les écosystèmes locaux, sans que l'on puisse en prévoir les conséquences sur les communautés animales à ces hauteurs.

Par ailleurs, certaines industries minières semblent n'avoir pas encore écarté la possibilité de rejeter leurs déchets miniers en surface ou jusqu'à 200 m de profondeur. Des pêcheries plus classiques pourraient être alors touchées.

Les études menées sur le rejet des déchets miniers dans les eaux de surface montrent que les effets sont très variés et difficiles à prévoir. Par exemple, le rejet des eaux et sédiments profonds riches en nutriments stimulerait plutôt la productivité primaire locale dans les eaux de surface, mais **il est difficile de prévoir quelles espèces pourront en tirer profit, quelle sera la nouvelle composition de la communauté locale et quelles conséquences cela aura sur les écosystèmes adjacents, y compris ceux dont font partie des espèces consommables par l'Homme.** Des conséquences positives pourraient apparaître, comme un accroissement des populations à valeur commerciale, mais des impacts négatifs sont aussi à envisager, si des espèces telles que les algues, les méduses... prolifèrent, privant les espèces commerciales de leur nourriture.

De plus, l'effet des rejets miniers sur des populations commerciales peu profondes semble avoir été très peu étudié. Dans un rapport bibliographique de 1984, Matsumoto rapporte les résultats d'une publication de 1978 (Barry, 1978), sur les réactions de thons albacores et de thonines orientales en captivité face à un nuage de particules de boue profonde de la région DOMES. Sur un temps court et pour des turbidités allant de 9 à 59 mg/L, les réactions varient. Soit les poissons contournent le nuage, soit ils passent au travers (seuil de turbidité de 2,7-4,7 mg/L pour le thon albacore et seuil de 2,68-6,8 mg/L pour la thonine orientale). Ils arrivent à se nourrir, même quand la turbidité atteint jusqu'à 11,2 mg/L. Cependant, à plus de 4mg/L, certains animaux arrêtaient de se nourrir pour « tousser ». Barry avait toutefois posé la réserve suivante sur son travail : le comportement de poissons élevés en captivité ne serait pas forcément celui de poissons sauvages, potentiellement moins tolérants à la turbidité mais aux capacités de détection des nuages de particules différentes. Matsumoto a ensuite compilé les données de la littérature de l'époque sur les effets sur les larves de thon et d'orphie, au niveau des sites DOMES. Il en ressort que les larves sont plus sensibles aux particules en suspension que les adultes et ont plus de difficultés à se nourrir et à respirer. La baisse de clarté occasionnée par la présence des particules fines pourrait gêner les larves de thonidés dans leur recherche de nourriture, mais il se peut que cette gêne soit compensée par la puissance de nage des larves, leur bonne vision et leur stratégie de prédation. Un brusque et important changement de salinité et de concentration en oxygène dissous, par contre, pourrait être plus dommageable, par expérience sur d'autres espèces dans d'autres circonstances (Matsumoto, 1984). Dans le cas de la région DOMES, il n'y a pas grande différence de salinité et d'oxygène dissous entre les eaux du fond et les eaux de surface, Matsumoto a donc conclu que les larves de thon ne souffriraient pas de ce paramètre. Toutefois, les bateaux-supports, pour produire l'eau potable indispensable à l'équipage, utilisent des stations de dessalement, ils sont donc susceptible de rejeter de la saumure en quantité importante. Cela pourrait causer des malformations chez les embryons de poissons et causer une mortalité qu'il reste à évaluer. Les larves de poisson sont également, d'une manière générale, très sensibles aux variations de

température, surtout les chocs thermiques. La perte en poissons a été calculée dans le cas d'une opération minière de 300 jours, avec une production annuelle de 1,5 tonnes de nodules et où les eaux sales seraient rejetées à 5 m au-dessous de la surface et se répandraient dans une zone d'1 m de large pour 1 m de profondeur sur une distance de 89,4 km de long : le nombre de larves affectées par le choc thermique s'élèverait à près de 50 000 larves de thon listao et de l'ordre de 15 000 larves de thon albacore (à raison de 0,89 larves de thon listao et 0,3 larves de thon albacores par m³ d'eau de surface). Cependant, 80% des larves sont condamnées à mourir de causes naturelles, quoi qu'il arrive. Les thons listao et albacores survivants potentiellement impactés par les rejets miniers dans les eaux de surface ne représenteraient alors qu'environ 0,64% et 0,16% respectivement des prises annuelles des deux espèces (pour le Pacifique Est). C'est pourquoi, dans ces conditions, l'impact sur les pêcheries thonières a été considéré comme négligeable. **L'impact de l'exploitation minière sur les stocks pélagiques dépend donc beaucoup de la présence ou non des zones de frai au-dessus des sites d'exploitation et de la profondeur de rejet des sédiments et eaux sales.** Matsumoto évoque encore la possibilité que les minéraliers, avançant lentement, attirent autour d'eux les bancs de thons, augmentant alors le nombre de larves touchées par les impacts environnementaux de l'opération minière. Un système air-lift, en outre, pourrait présenter des risques de sursaturation des gaz. La sursaturation des gaz provoque chez les poissons des pathologies diverses, souvent létales, comme l'embolie gazeuse. Rappelons cependant que ces données et ces conclusions datent d'il y a presque 30 ans et s'appliquent à une technologie particulière. Le volume des rejets varie en fonction du système minier utilisé et il n'est pas certain que le déversement se fasse dans les eaux de surface, mais plutôt à des profondeurs moyennes ou à proximité des sites d'extraction. Le raisonnement exposé dans les publications de référence et le rapport de la FAO lui-même nécessitent donc une réactualisation et une réévaluation, avant de pouvoir entériner cette hypothèse d'innocuité.

Le tourisme est le deuxième grand secteur économique susceptible d'être impacté, de manière négative, par une exploitation industrielle des ressources marines profondes.

- 1) **L'observation des baleines, des dauphins, ou des requins risque de souffrir directement de l'exploitation minière** dans les zones à encroûtements ou à sulfures polymétalliques, entre 300 et 2 000 m, en raison des vibrations générées, des impacts sur le réseau trophique ou plus simplement parce que chassés de leur habitat. **Cela pourrait représenter un manque à gagner considérable, en particulier pour les îles du Pacifique et de l'Atlantique.**
- 2) **Le tourisme d'aventure dans les grandes profondeurs, pour des raisons évidentes de sécurité, serait impossible dans les zones exploitées et verrait son développement bridé.**
- 3) Enfin, **les infrastructures des minéraliers et la pollution en surface risquent d'entraver certaines activités touristiques** (les croisières, par exemple) au large des îles possédant des gisements proches de leurs côtes. Or dans le cas d'un certain nombre d'îles du Pacifique et de l'Atlantique, notamment, le tourisme est le pilier de l'économie.

Ces exploitations risquent aussi de disputer l'espace aux câbles sous-marins de télécommunication ou de transport d'énergie qui relient les continents entre eux, et dont le réseau est particulièrement dense dans l'Atlantique et le Pacifique. Les réseaux à proximité des exploitations pourraient être endommagés, avec des répercussions économiques

importantes en cas de rupture des communications ou d'arrêt d'approvisionnement en énergie. En effet, les interventions de réparation sont délicates à de telles profondeurs. La probabilité d'une perturbation du transport d'énergie et d'information via les réseaux de câbles sous-marins est moins forte que pour la pêche et le tourisme. Elle tient de l'accident. Cependant, si cet accident devait se produire, les conséquences économiques pourraient s'avérer considérables pour les populations concernées.

Les biotechnologies et la recherche sont également fortement concernées, non réellement en termes de gains existants, mais surtout en termes de gains à venir.

Il s'agit d'une privation de potentialités économiques et sociétales.

- Les organismes des grands fonds sont sources de nouvelles molécules ou permettent la compréhension de mécanismes en santé ou en toxicologie et le développement de nouveaux produits. De très nombreuses industries sont concernées par ces ressources potentielles : biotechnologiques, médicales, cosmétiques, de traitement des déchets...
- Du point de vue des activités de recherche scientifique, outre la destruction des écosystèmes ou des roches que l'on souhaite étudier, le matériel de forage pourrait également être source de pollution, sous la forme de débris ou de contamination biologique (Arico and Salpin, 2006; Leary, 2009). Cela est également valable pour les outillages d'extraction minière. **Une perte significative des habitats disponibles et le sur-échantillonnage des populations locales**, en particulier aux niveaux des amas de sulfures polymétalliques associés aux cheminées hydrothermales, vont probablement endommager les écosystèmes hydrothermaux (CBD, 2005 et 2008; Arico and Salpin, 2006; Leary, 2009), **limitant ainsi un certain nombre d'avancées scientifiques**. Or **non seulement la recherche peut être valorisée mais elle permet des avancées significatives de nos sociétés.**

Les activités de préservation de ces écosystèmes profonds exceptionnels et des écosystèmes connectés, au travers notamment d'aires marines protégées, contribuent également à l'économie : ce sont des investissements qui peuvent créer de l'emploi et des infrastructures. Les aires marines protégées permettent de conserver des opportunités économiques, d'en créer de nouvelles, d'améliorer des opportunités récréatives et de préserver des opportunités scientifiques et des valeurs culturelles (Sanchirico and Emerson, 2002; Joseph and Gunton, 2009). Elles sont susceptibles d'attirer les touristes et les chercheurs et participent au « bien-être » général, dans l'acception de la définition du service écosystémique. Le coût de leur mise en place et de leur gestion devra être évalué en regard de l'évaluation économique des services écosystémiques préservés.

Tous ces impacts économiques sont cumulatifs, mais ne sont pas susceptibles de se produire tous, et en toutes circonstances. Ils dépendent à la fois de la localisation précise des gisements (au sens industriel du terme), de l'organisation économique locale initiale, des services écosystémiques rendus localement et de l'ampleur des impacts environnementaux.

Les services écosystémiques sont difficilement monétarisables et les impacts environnementaux eux-mêmes, à l'heure actuelle, sont peu quantifiables. Par répercussion, il est donc encore difficile de chiffrer les conséquences économiques de ces impacts environnementaux.

Il nous est simplement possible, actuellement, d'établir des scénarii à partir de connaissances scientifiques et économiques parcellaires, auxquels manque encore une validation par les faits.

Une meilleure connaissance des services écosystémiques rendus par chacun des milieux associés à des ressources est nécessaire pour permettre de réaliser une analyse coûts-bénéfices des impacts environnementaux.

Notons toutefois qu'il existe un autre aspect économique possible : celui du coût de la restauration des écosystèmes. Il s'agit ici d'une question d'actualité, qui apparaît donc encore peu dans la littérature scientifique. Cet aspect est développé ultérieurement dans le chapitre 6 de la présente expertise.

L'évaluation économique des écosystèmes marins profonds et la simulation de conséquences d'activités humaines sur ces milieux (exploitation des ressources minérales, des hydrates de gaz, des hydrocarbures...) sont des thématique nécessitant d'être développées mais ce premier bilan permet d'ores et déjà de soulever les points sensibles et les risques majeurs à anticiper.

Acronymes

ADN	Acide DésoxyriboNucléique
AIFM	Autorité Internationale des Fonds Marins (équivalent à ISA et ISBA)
ATESEPP	Auswirkungen Technischer Eingriffe in das Ökosystem Tiefsee im Süd-Ost Pazifik vor Peru (Effects of Technical Interventions into the Ecosystem of the Deep Sea in the Southeast Pacific Ocean)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BIE	Benthic Impact Experiment
CCZ	Clarion-Clipperton Zone
CDB	Convention sur la Diversité Biologique
CHEMINI	CHEmical MINIaturized analyzer
CIRS	Centre International de Recherche Scientifique
CNMI	Commonwealth of the Northern Mariana Islands
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CPS	Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (Secretariat of the Pacific Community)
DIETS	Direct Impact Experiment on Seamount
DISCOL	Disturbance and Recolonization Experiment
DOMES	Deep Ocean Mining Environmental Study
DSSRS	Deep sea sediment Re-suspension System
EMF	Electromagnetic Field
EPS	ExoPolySaccharides
FAO	Food and agriculture organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture - ONUAA)
IEOM	Institut d'Emission d'Outre-Mer
ICES	International Council for the Exploration of the Sea (Conseil International pour l'Exploration de la Mer - CIEM)
Ifremer	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
INDEX	INDian Deepsea EXperiment
IOM	Inter Ocean Metal
IUCN	International Union for Conservation of Nature
JET	Japan Deep Sea Impact Experiment
KODOS	Korean Deep Ocean Study
LAMETA	Laboratoire Montpellierain d'Economie Théorique et Appliquée
LPS	LipoPolySaccharides
MAES	Mapping et assessment of ecosystems and their services
MC	Mesure Compensatoire
MEA	Millenium Ecosystem Assessment
MEF	Main Endeavour Field
MESEDA	Metalliferous Sediments Atlantis II Deep
MNHN	Museum National d'Histoire Naturelle
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODP	Ocean Drilling Program
OMA	Ocean Mining Associates (USA)
OMI	Ocean Mining Inc (USA)
PIB	Produit Interieur Brut
PNG	Papouasie Nouvelle Guinée
PVC	Polychlorure de Vinyle
ROV	Remotely Operated Vehicle

SEDEX	Sediment Dispersal Experiment
SOPAC	Secretariat Of the Pacific Community
TAAF	Terres Australes et Antarctiques Françaises
TAG	Trans-Atlantic Geotraverse.
TEEB	The Economics of Ecosystem and Biodiversity (Economie des écosystèmes et de la biodiversité)
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture)
US	United States
VET	Valeur Economique Totale (Total Economic Value - TEV)
ZEE	Zone Economique Exclusive
ZoNéCo	Zone économique de Nouvelle-Calédonie

Bibliographie

Abe, F. and K. Horikoshi (2001). "The biotechnological potential of piezophiles." *TRENDS in Biotechnology* 19(3): 102-108.

Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), site officiel consulté en 2013. Présentation du Parc naturel marin du Golfe du Lion <http://www.parc-marin-golfe-lion.fr/le-parc/le-perimetre-du-parc.html>

Agence Suédoise pour la Protection de l'Environnement. (2009). What's in the Sea for Me. Ecosystem Services Provided by the Baltic Sea and Skagerrak. Naturvardsverket. Stockholm, The Swedish Environmental Protection Agency 44.

Aguilar Soto, N., M. Johnson, P. T. Madsen, P. L. Tyack, A. Bocconcelli and J. Fabrizio Borsani (2006). "Does intense ship noise disrupt foraging in deep-diving cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*)?" *Marine Mammal Science* 22(3): 690-699.

Ahnert, A. and G. Schriever (2001). "Response of a byssal Copepoda Harpacticoida (Crustacea) and other meiobenthos to an artificial disturbance and its bearing on future mining for polymetallic nodules." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3779-3794.

Alibaba.com. Recherche réactualisée le 5 septembre 2013. http://www.alibaba.com/trade/search?SearchText=Giant+Squid&IndexArea=company_en&fsb=y

Althaus, F., A. Williams, T. Schlacher, R. Kloser, M. Green, B. Barker, N. Bax, P. Brodie and M. Schlacher-Hoenlinger (2009). "Impacts of bottom trawling on deep-coral ecosystems of seamounts are long-lasting." *Marine Ecology Progress Series* 397(279-294): 40.

Amakawa, H., J. Ingri, A. Masuda and H. Shimizu (1991). "Isotopic compositions of Ce, Nd and Sr in ferromanganese nodules from the Pacific and Atlantic oceans, the Baltic and Barents seas, and the gulf of Bothnia." *Earth and Planetary Science Letters* 105(4): 554-565.

Amann, H. (1985). "Development of ocean mining in the Red Sea." *Marine Mining*; 5:103-116.

Ambassade de France au Portugal – Missions économiques. (2003). Fiche de synthèse : "Les régions ultrapériphériques portugaises: Madère et les Açores." http://www.mcrit.com/rup/documentos/economiq_maderia.pdf

Amend, J. P., D. E. LaRowe, T. M. McCollom and E. L. Shock (2013). "The energetics of organic synthesis inside and outside the cell." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368(1622).

Amos, A. F. and O. A. Roels (1977). "Environment aspects of manganese nodule mining." *Marine Policy* 1(2): 156-163.

Amos, A. F., C. Garside, R. D. Gerard, S. Levitus, T. C. Malone, A. Z. Paul and O. A. Roels (1973). "Physical, chemical and biological oceanography of a manganese nodule province in the eastern equatorial Pacific Ocean and the impact upon it of deep-sea mining operations." *Transactions-American Geophysical Union* 54(4): 339-339.

Anderson, M. E. and H. Bluhm (1997). "Description of a new species of *Pachycara Zugmayer, 1911* from the abyssal south-eastern Pacific and redescription of *P. thermophilum*

Geistdoerfer, 1994, with a new key to the species." Transactions of the Royal Society of South Africa 51(1): 219-227.

Animal Diversity Web, consulté en 2013 http://animaldiversity.ummz.umich.edu/accounts/Dosidicus_gigas/

Animal Diversity Web, consulté en 2013 <http://animaldiversity.ummz.umich.edu/>

Anon. (2003). Ika Loloto o U vea mo Futuna, les poissons profonds de Wallis & Futuna. Division Ressources Marines du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique. http://www.peche.pf/IMG/pdf/115-Poissons_profonds_de_Wallis_et_Futuna.pdf

Anufriev, G. S. and B. S. Boltenkov (2007). "Ferromanganese nodules of the Baltic Sea: Composition, helium isotopes, and growth rate." Lithology and Mineral Resources 42(3): 240-245.

Arico, S. and C. Salpin (2005). "Bioprospecting of genetic resources in the deep seabed: scientific, legal and policy aspects." United Nations University—Institute of Advanced Studies, Yokohama, Japan 2005.

Armstrong, C. W., N. Foley, R. Tinch and S. van den Hove (2010). "Ecosystem goods and services of the deep sea." Deliverable D6 2: 68. http://www.pik-potsdam.de/news/public-events/archiv/alter-net/former-ss/2010/13.09.2010/van_den_hove/d6-2-final.pdf

Armstrong, C. W., N. S. Foley, R. Tinch and S. van den Hove (2012). "Services from the deep: Steps towards valuation of deep sea goods and services." Ecosystem Services.

Arrasate-López, M., V. M. Tuset, J. Santana, A. García-Mederos, O. Ayza and J. González (2012). "Fishing methods for sustainable shrimp fisheries in the Canary Islands (North-West Africa)." African Journal of Marine Science 34(3): 331-339.

Association des Directeurs & Responsables des Halles à Marées de France. Annuaire des criées. Consulté en août 2013. http://www.criees-france.com/index.php?id_site=1&id_page=5&option=annuaire&action=afficher_contenu

Atkins, M. S., M. A. Hanna, E. A. Kupetsky, M. A. Saito, C. D. Taylor and C. O. Wirsen (2002). "Tolerance of flagellated protists to high sulfide and metal concentrations potentially encountered at deep-sea hydrothermal vents." Marine Ecology Progress Series 226: 63-75.

Atmospheric Administration. Office of Ocean Minerals and Energy (1981). Deep seabed mining: final programmatic environmental impact statement, The Office.

Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). Cartes. Page consultée en 2013 <http://www.isa.org.jm/fr/scientific/exploration/maps>

Autorité Internationale des Fonds Marins. Prospects for International Collaboration in Marine Environmental Research to Enhance Understanding of the Deep Sea Environment. Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica, 29 July to 2 August 2002.

Autorité Internationale des Fonds Marins. Secteurs réservés. Page consultée en 2013 <http://www.isa.org.jm/fr/scientific/exploration/reserved>

Baco, A. R. and T. M. Shank (2005). Population genetic structure of the Hawaiian precious coral *Corallium lauense* (Octocorallia : Coralliidae) using microsatellites. Berlin, Springer-Verlag Berlin.

- Baco, A. R., A. M. Clark and T. M. Shank (2006). "Six microsatellite loci from the deep-sea coral *Corallium lauense* (Octocorallia : Coralliidae) from the islands and seamounts of the Hawaiian archipelago." *Molecular Ecology Notes* 6(1): 147-149.
- Bagarinao, T. (1992). "Sulfide as an environmental factor and toxicant: tolerance and adaptations in aquatic organisms." *Aquatic Toxicology* 24(1): 21-62.
- Barnett, B. and H. Yamauchi (1995). "Deep sea sediment resuspension system used for the Japan Deep Sea Impact Experiment." First (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Tokyo, Japan.
- Barry, M. and S. F. Center (1978). "Behavioral Response of Yellowfin Tuna, *Thunnus Albacares*, and Kawakawa, *Euthynnus Affinis*, to Turbidity.", Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory, Deep Ocean Mining Environmental Study.
- Baturin, G. N. and V. T. Dubinchuk (2009). "Composition of Ferromanganese Nodules from Riga Bay (Baltic Sea)." *Oceanology* 49(1): 111-120.
- Bay-Nouailhat A. Description de *Plesionika narval*. 2010. <http://www.mer-littoral.org/24/plesionika-narval.php> consulté le 19 août 2013.
- Bearzi, M. (2005). "Dolphin sympatric ecology." *Marine Biology Research* 1(3): 165-175.
- Beaumont, N., M. Austen, S. Mangi and M. Townsend (2008). "Economic valuation for the conservation of marine biodiversity." *Marine Pollution Bulletin* 56(3): 386-396.
- Beaumont, N., M. Townsend, S. Mangi and M. Austen (2006). "Marine biodiversity: an economic valuation." A DEFRA report. Building the evidence base for a Marine Bill: 73.
- Bebianno, M., R. Company, A. Serafim, L. Camus, R. Cosson and A. Fiala-Médoni (2005). "Antioxidant systems and lipid peroxidation in *Bathymodiolus azoricus* from Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent fields." *Aquatic toxicology* 75(4): 354-373.
- Benedetti, L., E. Topp and V. Stella (1989). "A novel drug delivery system: microspheres of hyaluronic acid derivatives." *Biomedical and biotechnological advances in industrial polysaccharides*. New York, NY: Gordon and Breach: 27-33.
- Benjamin, M. M. and A. Felmy (1981). "Trace metal exchange between ferromanganese nodules and artificial seawater." *Marine Mining* 3(1/2): 151-183.
- Bennett, S. A., E. P. Achterberg, D. P. Connelly, P. J. Statham, G. R. Fones and C. R. German (2008). "The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes." *Earth and Planetary Science Letters* 270(3): 157-167.
- Bennett, S. A., P. J. Statham, D. R. Green, N. Le Bris, J. M. McDermott, F. Prado, O. J. Rouxel, K. Von Damm and C. R. German (2011). "Dissolved and particulate organic carbon in hydrothermal plumes from the East Pacific Rise, 9 50' N." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 58(9): 922-931.
- Berkman, D. A. (2011a). "10. Drilling." In: *Field Geologists' Manual – Fifth Edition*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Monograph Series, No. 9: Carlton, Vic. 480 p.
- Berkman, D. A. (2011b). "6. Mining and Economic Geology." In: *Field Geologists' Manual – Fifth Edition*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Monograph Series, No. 9: Carlton, Vic. 480 p.

- Bharathi, L., B. Nagender Nath, B. Ingole, G. Parthiban, S. Matondkar, C. Raghukumar, N. Khadge, A. Valsangkar, A. Suryanarayana and S. Jai Sankar (2005). "Impacts on surface productivity during sediment dispersal experiment in Central Indian Basin." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(4): 315-330.
- Bharathi, L.P. and S. Nair (2005). "Rise of the dormant: Simulated disturbance improves culturable abundance, diversity, and functions of deep-sea bacteria of central Indian Ocean Basin." *Marine georesources & geotechnology* 23(4): 419-428.
- Bischoff James, L. (1979). "Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province." *Marine science (USA)*. v. 9.
- Bluhm, H. (1993). "Effects of deep-sea mining for manganese nodules on the abyssal megabenthic community." *Offshore Technology Conference*.
- Bluhm, H. (2001). "Re-establishment of an abyssal megabenthic community after experimental physical disturbance of the seafloor." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3841-3868.
- Bluhm, H., G. Schriever and H. Thiel (1995). "Megabenthic recolonization in an experimentally disturbed abyssal manganese nodule area." *Marine Georesources & Geotechnology* 13(4): 393-416.
- Boehlert, G. W. and A. B. Gill (2010). "Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development - A Current Synthesis." *Oceanography* 23(2): 68-81.
- Borowski, C. (2001). "Physically disturbed deep-sea macrofauna in the Peru Basin, southeast Pacific, revisited 7 years after the experimental impact." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3809-3839.
- Boschen, R., A. Rowden, M. Clark and J. Gardner (2013). "Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies." *Ocean & Coastal Management* 84: 54-67.
- Bougault, H., J.-L. Charlou, Y. Fouquet, P. Appriou and P. Jean-Baptiste (1993). "L'hydrothermalisme océanique." *Mémoires de la Société géologique de France* 163: 99-111.
- Bozzi, L., M. Milas and M. Rinaudo (1996). "Characterization and solution properties of a new exopolysaccharide excreted by the bacterium *Alteromonas* sp. strain 1644." *International journal of biological macromolecules* 18(1): 9-17.
- Bozzi, L., M. Milas and M. Rinaudo (1996). "Solution and gel rheology of a new polysaccharide excreted by the bacterium *Alteromonas* sp. strain 1644." *International journal of biological macromolecules* 18(1): 83-91.
- Brandt, A., U. Bathmann, S. Brix, B. Cisewski, H. Flores, C. Göcke, D. Janussen, S. Krägefsky, S. Kruse and H. Leach (2011). "Maud Rise—a snapshot through the water column." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 58(19): 1962-1982.
- Brockett, T. and C. Z. Richards (1994). "Deep-sea mining simulator for environmental-impact studies." *Sea Technology* 35(8): 77-82.
- Brouwer, R., L. Brander, O. Kuik, E. Papyrakis and I. Bateman (2013). A synthesis of approaches to assess and value ecosystem services in the EU in the context of TEEB. Final Report. VU University Amsterdam: Institute for Environmental Studies.
- Brunn, S. D. (2011). *Engineering Earth: The Impacts of Megaengineering Projects*, Springer.

- Brunnschweiler, J. M. (2010). "The Shark Reef Marine Reserve: a marine tourism project in Fiji involving local communities." *Journal of Sustainable Tourism* 18(1): 29-42.
- Buesseler, K. O., S. C. Doney, D. M. Karl, P. W. Boyd, K. Caldeira, F. Chai, K. H. Coale, H. J. W. de Baar, P. G. Falkowski, K. S. Johnson, R. S. Lampitt, A. F. Michaels, S. W. A. Naqvi, V. Smetacek, S. Takeda and A. J. Watson (2008). "Environment - Ocean iron fertilization - Moving forward in a sea of uncertainty." *Science* 319(5860): 162-162.
- Bureau of Economic Analysis, US Department of Commerce. (2012). The Bureau Of Economic Analysis (Bea) Releases Estimates Of Gross Domestic Product By Industry, Compensation By Industry, And Detailed Consumer Spending For The Commonwealth Of The Northern Mariana Islands. News Release
- Cain, S. D., L. C. Boles, J. H. Wang and K. J. Lohmann (2005). "Magnetic orientation and navigation in marine turtles, lobsters, and molluscs: Concepts and conundrums." *Integrative and Comparative Biology* 45(3): 539-546.
- Campbell, A. C., J. M. Gieskes, J. E. Lupton and P. F. Lonsdale (1988). "Manganese geochemistry in the Guaymas Basin, Gulf of California." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52(2): 345-357.
- Canals, M., P. Puig, X. D. de Madron, S. Heussner, A. Palanques and J. Fabres (2006). "Flushing submarine canyons." *Nature* 444(7117): 354-357.
- Carter, L. (2009). *Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World*, UNEP World Conservation Monitoring System.
- Cartwright, S. and Tuqiri, S. (2004). Draft. Outline SAP II Project: National Project Preparation Reports.
- Castrejón, M. and A. Charles (2012). "Improving fisheries co-management through ecosystem-based spatial management: The Galápagos Marine Reserve." *Marine Policy*. 38:235-245
- Catlin, J., R. Jones, T. Jones, B. Norman and D. Wood (2010). "Discovering wildlife tourism: A whale shark tourism case study." *Current Issues in Tourism* 13(4): 351-361.
- Centre International de Recherche Scientifique – CIRS. Fiche des îles Mariannes du Nord <http://www.cirs.net/Pays/paysFR.php?nom=Mariannes%20du%20Nord>
- CGDD. (2013). Communication personnelle le 6 décembre 2013.
- Chan, A. T. and G. C. Anderson, G. C. (1981). "Environmental Investigation of the Effects of Deep-Sea Mining on Marine Phytoplankton and Primary Productivity in the Tropical Eastern North Pacific Ocean." *Marine Mining* 3(1): 121-149.
- Chang, S. K., Y. C. Yang and N. Iwasaki (2013). "Whether to employ trade controls or fisheries management to conserve precious corals (Coralliidae) in the Northern Pacific Ocean." *Marine Policy* 39: 144-153.
- Charlou, J. L., J. P. Donval, P. JeanBaptiste and A. Dapoigny (1996). "Gases and helium isotopes in high temperature solutions sampled before and after ODP Leg 158 drilling at TAG hydrothermal field (26 ° N, MAR)." *Geophysical Research Letters* 23(23): 3491-3494.
- Charmasson, S., P.-M. Sarradin, A. Le Faouder, M. Agarande, J. Loyer and D. Desbruyères (2009). "High levels of natural radioactivity in biota from deep-sea hydrothermal vents: a preliminary communication." *Journal of environmental radioactivity* 100(6): 522-526.

Chaurand, P. (2006). Apport de la cristallographie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous-produits d'aciérie), Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III.

Chung, J. S. (2002). Deep seabed mining environment: Preliminary engineering and environmental assessment, International Society of Offshore and Polar Engineers. [http://www.isopec.org/publications/proceedings/ISOPE_OMS/ijope-wksp-SpecialRept-medres\(7-19-02\).pdf](http://www.isopec.org/publications/proceedings/ISOPE_OMS/ijope-wksp-SpecialRept-medres(7-19-02).pdf)

Cisneros-Montemayor, A. M., M. Barnes, D. Al-Abdulrazzak, E. Navarro-Holm and U. R. Sumaila (2013). "Global economic value of shark ecotourism: Implications for conservation." Fisheries Centre Working Paper 4(2012): 04.

Cisneros-Montemayor, A., U. R. Sumaila, K. Kaschner and D. Pauly (2010). "The global potential for whale watching." Marine Policy 34(6): 1273-1278.

Clapham, P., C. Garrigue, N. Hauser, Y. Geyer and A. Zerbini (2007). "Movements of satellite-monitored humpback whales from New Caledonia and the Cook Islands.", " Paper SC/60/SH34 presented to the IWC Scientific Committee.

Clark, M. (2011). Fauna of Cobalt-rich Ferromanganese Crust Seamounts: Report, Internat. Seabed Authority.

CNMI (Commonwealth of the Northern Mariana Islands). "Une économie diversifiée." <http://www.cnmiguide.com/fr/finance-entreprise> et Guide CNMI- découvrir les Iles Mariannes du Nord. <http://www.cnmiguide.com/index.html>.

CNRS (2003). Dossier de presse "Inauguration de la station Antares le 18 novembre 2003 à l'Institut Michel Pacha, La Seyne-sur-Mer." 2003. http://www.in2p3.fr/presse/communiqués/archives/2003/10_antares.htm

CNRS, (2013). "Prospective mer. Une prospective de l'Institut Ecologie et Environnement»." Les cahiers Prospectives. N°4-Mai 2013.

CNRS, site de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) – Environnement-Actualités Océan-Littoral- «Des cascades sous-marines aux effets spectaculaires» 16 novembre 2006. <http://www.insu.cnrs.fr/environnement/ocean-littoral/des-cascades-sous-marines-aux-effets-spectaculaires>

Colaco, A., P. Bustamante, Y. Fouquet, P. M. Sarradin and R. S errao-Santos (2006). "Bioaccumulation of Hg, Cu, and Zn in the Azores triple junction hydrothermal vent fields food web." Chemosphere 65(11): 2260-2267.

Collins, P. C., P. Croot, J. Carlsson, A. Colaço, A. Grehan, K. Hyeong, R. Kennedy, C. Mohn, S. Smith and H. Yamamoto (2013). "A primer for the Environmental Impact Assessment of mining at seafloor massive sulfide deposits." Marine Policy 42: 198-209.

Company, R., A. Serafim, R. Cosson, A. Fiala-Medioni, D. R. Dixon and M. J. Bebianno (2007). "Adaptation of the antioxidant defence system in hydrothermal-vent mussels (*Bathymodiulus azoricus*) transplanted between two Mid-Atlantic Ridge sites." Marine Ecology-an Evolutionary Perspective 28(1): 93-99.

Company, R., A. Serafim, R. Cosson, A. Fiala-Médioni, D. R. Dixon and M. J. Bebianno (2007). "Adaptation of the antioxidant defence system in hydrothermal-vent mussels (*Bathymodiulus azoricus*) transplanted between two Mid-Atlantic Ridge sites." Marine Ecology 28(1): 93-99.

- Company, R., H. Felicia, A. Serafim, A. J. Almeida, M. Biscoito and M. J. Bebianno (2010). "Metal concentrations and metallothionein-like protein levels in deep-sea fishes captured near hydrothermal vents in the Mid-Atlantic Ridge off Azores." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 57(7): 893-908.
- Compte-rendu du Sénat du 14 nov.2012. La zone économique exclusive des outre-mer : quels enjeux ? Audition de M. Rémi Galin, chef du bureau des ressources minérales, et de Mme Odile Gauthier, directrice de l'eau et de la biodiversité, Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie. <http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20121112/outremer.html>
- Conférence donnée par Alexis Templeton, A. (2013). Conférence donnée au Museum National d'Histoire Naturelle à Paris, le 5 juin 2013.
- Contreira-Pereira, L., M. Yücel, D. Omanovic, J.-P. Brulport and N. Le Bris (2013). "Compact autonomous voltammetric sensor for sulfide monitoring in deep sea vent habitats." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 80: 47-57.
- Convention on Biological Diversity (CBD). (2005). *Marine and Coastal Biological Diversity. Status and Trends of, and threats to, deep seabed genetic resources beyond national jurisdiction, and identification of technical options for their conservation and sustainable use.* Note by the Executive Secretary. UNEP/CBD/SBSTTA/11/11. 22 July 2005.
- Convention on Biological Diversity (CBD). 2008. *Synthesis and Review of the Best Available Scientific Studies on Priority Areas for Biodiversity Conservation in Marine Areas beyond the Limits of National Jurisdiction.* Technical Series n°37.
- Convention on the Biological Diversity. (2007). *Options for preventing and mitigating impacts of some activities on selected seabed habitats.*
- Cosson, R. (1996). "La bioaccumulation des éléments minéraux chez le vestimentifère *Riftia pachytila* (Jones): bilan des connaissances." *Oceanologica acta* 19(2): 163-176.
- Cosson, R. P., E. Thiebaut, R. Company, M. Castrec-Rouelle, A. Colaco, I. Martins, P. M. Sarradin and M. J. Bebianno (2008). "Spatial variation of metal bioaccumulation in the hydrothermal vent mussel *Bathymodiolus azoricus*." *Marine Environmental Research* 65(5): 405-415.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill and J. Paruelo (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *nature* 387(6630): 253-260.
- Cousins, C. R., I. A. Crawford, J. Carrivick, M. Gunn, J. Harris, T. Kee, M. Karlsson, L. Carmody, C. Cockell and B. Herschy (2013). "Glaciovolcanic hydrothermal environments in Iceland and implications for their detection on Mars." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 256: 61-77.
- Crespo-Medina, M., A. D. Chatziefthimiou, N. S. Bloom, G. W. Luther III, D. D. Wright, J. R. Reinfelder, C. Vetriciani and T. Barkay (2009). "Adaptation of chemosynthetic microorganisms to elevated mercury concentrations in deep-sea hydrothermal vents." *Limnology and Oceanography* 54(1): 41.
- Cronan, D. S. and R. A. Hodkinson (1991). "An evaluation of manganese nodules and cobalt-rich crusts in South-Pacific exclusive economic zones. 2. nodules and crusts in an adjacent to the EEZ of the Phoenix Islands." *Marine Mining* 10(4): 267-284.

- Cronan, D. S. and R. A. Hodkinson (1993). "An evaluation of manganese nodules and cobalt-rich crusts in South-Pacific exclusive economic zones .3. nodules and crusts in the EEZ of Tuvalu (Ellice Islands)." *Marine Georesources & Geotechnology* 11(2): 153-174.
- Cronan, D. S., R. A. Hodkinson and S. Miller (1991). "Manganese nodules in the EEZS of island countries in the Southwestern Equatorial Pacific." *Marine Geology* 98(2-4): 425-435.
- Cronan, D., R. Hodkinson, S. Miller and L. Hong (1991). "An evaluation of manganese nodules and cobalt-rich crusts in south-pacific exclusive economic zones nodules and crusts in and adjacent to the EEZ of the Cook Islands (the Aitutaki-Jarvis Transect). 1." *Marine Mining* 10(1): 1-28.
- Crosnier, A. (1986). "Crevettes de la famille des Pandalidae récoltées durant ces dernières années en Polynésie française. Description de *Plesionika chacei* et *P. carsini* spp. nov." *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 4eme série, section A* 8: 361-377.
- Cruse, A. M. and J. S. Seewald (2001). "Metal mobility in sediment-covered ridge-crest hydrothermal systems: Experimental and theoretical constraints." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65(19): 3233-3247.
- Cruse, A. M. and J. S. Seewald (2010). "Low-molecular weight hydrocarbons in vent fluids from the Main Endeavour Field, northern Juan de Fuca Ridge." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(21): 6126-6140.
- Dancette, R. (2008). *La biodiversité et les impacts de la recherche aux champs hydrothermaux main endeavour et mothra de la Zone de Protection Marine des sources hydrothermales d'Endeavour (EHVMPA)*. Mémoire. Montréal (Québec, Canada), Université du Québec à Montréal, Maîtrise en Sciences de l'Environnement.
- Dancette, R. J., SK. (2007). Report on biodiversity and research impacts at Main Endeavour and Mothrafields -Endeavour hydrothermal Vents Marine Protected Area (EHVMPA). Pour le Ministère des Pêches et des Océans du Canada (MPO). fil 03060079. Remis à Kevin Conley, Ocean Project Coordinator. Pacific Biological Station, Nanaimo, British Columbia.
- Dekov, V. M. (2007). "Native Hg-liq in the metalliferous sediments of the East Pacific Rise (21 ° S)." *Marine Geology* 238(1-4): 107-113.
- Deming, T. J. (1999). "Mussel byssus and biomolecular materials." *Current opinion in chemical biology* 3(1): 100-105.
- Denègre, J. (2013). Conférence privée donnée le 25 janvier 2013 à l'équipe-projet de l'ESCo "Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes".
- Denman, K. L. (2008). "Climate change, ocean processes and ocean iron fertilization." *Marine Ecology Progress Series* 364: 219-225.
- Deschamps, A., Y. Hello, P. Charvis, M. Dugué, V. Bertin, P. Valdy, A. Le Van Suu and D. Real (2003). "Broadband seismometer at 2500m depth in the Mediterranean Sea." EGS-AGU-EUG Joint Assembly.
- Description des îles Galápagos <http://whc.unesco.org/fr/list/1>
- D'Hondt, S., B. B. Jørgensen, D. J. Miller, A. Batzke, R. Blake, B. A. Cragg, H. Cypionka, G. R. Dickens, T. Ferdeman and K.-U. Hinrichs (2004). "Distributions of microbial activities in deep seafloor sediments." *Science* 306(5705): 2216-2221.
- Dick, G. J., B. G. Clement, S. M. Webb, F. J. Fodrie, J. R. Bargar and B. M. Tebo (2009). "Enzymatic microbial Mn (II) oxidation and Mn biooxide production in the Guaymas Basin deep-sea hydrothermal plume." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(21): 6517-6530.

Dick, G. J., Y. E. Lee and B. M. Tebo (2006). "Manganese (II)-oxidizing *Bacillus* spores in Guaymas Basin hydrothermal sediments and plumes." *Applied and environmental microbiology* 72(5): 3184-3190.

Direction des ressources marines et minières-Pu Fa'ahotu moana. Site et synthèse des résultats ECOTAP (Etude du Comportement des Thonidés par l'Acoustique et la Pêche), consulté en 2013. <http://www.pecche.pf/>

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Alsace. (2013). Méthode des coûts évités, méthode des coûts de remplacements, méthode des coûts substitués. <http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/methode-des-couts-evites-methode-a1703.html>

Document unique de programmation de Wallis et Futuna pour le 10^{ème} Fonds Européen de Développement (2013).

Doksæter, L., E. Olsen, L. Nøttestad and A. Fernö (2008). "Distribution and feeding ecology of dolphins along the Mid-Atlantic Ridge between Iceland and the Azores." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55(1): 243-253.

Doug Johnston. « Riftia ». Site de la marque Totokaelo <https://art-object.totokaelo.com/store/products/doug-johnston/riftia/coralgraywhite>

du Castel, V. (2005). "La mer de Barents: vers un nouveau "grand jeu"?" Institut français des relations internationales.

Dunk, R. M. and R. A. Mills (2006). "The impact of oxic alteration on plume-derived transition metals in ridge flank sediments from the East Pacific Rise." *Marine geology* 229(3): 133-157.

Dupont, J., Y. Lafoy, G. Pautot, R. Le Suavé, D. Cluzel, F. Missegue, R. Grandperrin, C. Hénin, M. Voisset and L. D. Saint Omer (1995). "Etude morphostructurale de la zone sud des rides Nouvelle Calédonie et Loyauté (Zone économique exclusive de Nouvelle-Calédonie, Pacifique Sud-Ouest)." *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 320: 211-218.

EC21, Global B2B Marketplace. Recherche réactualisée le 5 septembre 2013. http://supplier.ec21.com/Giant_Squid.html et http://supplier.ec21.com/Giant_Squid.html?pageNum=1&countryCd=&company_type=1&premium=N

ECO2. "Sites de stockage du CO₂." Consulté le 10 décembre 2013. <http://www.eco2-project.eu/storage-sites.html>

Edmond, J. M. and K. L. Vondamm (1992). "Hydrothermal activity in the deep-sea - intractable problems and lots of questions." *Oceanus* 35(1): 76-81.

Edmonds, H., C. German, D. Green, Y. Huh, T. Gamo and J. Edmond (1996). "Continuation of the hydrothermal fluid chemistry time series at TAG, and the effects of ODP drilling." *Geophysical research letters* 23(23): 3487-3489.

Encyclopédie Universalis. Hawaii. Page consultée en 2013 <http://www.universalis.fr/encyclopedie/hawaii/>

Ericsson. Site officiel de la compagnie consulté en 2013. Page de présentation du réseau de câbles sous-marins à fibre optique. http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/submarine-fiber-optic-cables?nav=fgb_101_275|fgb_101_254|fgb_101_273

Exon, N. F. (1997). "Ferromanganese crust and nodule deposits from the continental margin south and west of Tasmania." *Australian Journal of Earth Sciences* 44(5): 701-710.

FAO <http://www.fao.org/fishery/topic/16204/en>

FAO 2007-2013. "Marine Protected Areas as a Tool for Fisheries Management. Marine protected areas in the high seas." FI Project Websites. In: *FAO Fisheries and Aquaculture Department* [online]. Rome. Updated 26 April 2007. [Cited 06 October 2013]. <http://www.fao.org/fishery/topic/16204/en>

FAO 2010-2013. "Fisheries and Aquaculture topics." Deep-sea fisheries. Topics Fact Sheets. In: *FAO Fisheries and Aquaculture Department* [online]. Rome. Updated 8 April 2013. [Cited 06 October 2013]. <http://www.fao.org/fishery/topic/4440/en>

FishBase <http://www.fishbase.org/search.php?lang=French>

Flaathen, T. K. (2009). "Étude de l'interaction eau-basalte lors de l'injection de CO₂." , Université Paul Sabatier-Toulouse III.

Foell, E., H. Thiel and G. Schriever (1990). "DISCOL: a long-term, large-scale, disturbance-recolonization experiment in the abyssal eastern tropical South Pacific Ocean." Offshore Technology Conference.

Fouquet, Y. and D. Lacroix (2012). Les ressources minérales marines profondes: Etude prospective à l'horizon 2030, Editions Quae.

Fourmanoir, P. (1977). Pêche profonde en Nouvelle-Calédonie et aux Loyauté. Neuvième Conférence technique Régionale des Pêches, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

François, O., Pascal, N., Meral, P. (2012). Analyse Coûts-Bénéfices des mesures de gestion des récifs coralliens et mangroves : Revue méthodologique. Rapport Final.

Freedman, Z., C. Zhu and T. Barkay (2012). "Mercury resistance and mercuric reductase activities and expression among chemotrophic thermophilic Aquificae." *Applied and environmental microbiology* 78(18): 6568-6575.

Fukushima, T. (1995). "Overview" Japan Deep-Sea Impact Experiment= JET." In *Proceedings of 1st ISOPE-ocean mining symposium 1995*; 47-53). Tsukuba, Japan, International Society for Offshore and Polar Engineers.

Fukushima, T. and Imajima, M. (1997). "A study of a macrobenthos community in a deep-sea impact." *Proceedings of International Symposium on Environmental Studies for Deep-Sea Mining*, Tokyo, Japan: 331 - 336.

Fukushima, T., Y. Shirayama and E. Kuboki (2000). "The characteristics of deep-sea epifaunal megabenthos community two years after an artificial rapid deposition event." *Publications-Seto Marine Biological Laboratory* 39(1): 17-28.

Gabriel, C., A. Cros, C. Chevillon, A. Downer, C. Garrigue, P. Laboute, M. Kulbicki, C. Payri, B. Richer de Forges and J. Spaggiari (2005). Analyse écorégionale marine de Nouvelle-Calédonie, Atelier d'identification des aires de conservation prioritaires-Nouméa, 10-11 août 2005. Rapport d'atelier.

Gallagher, A. J. and N. Hammerschlag (2011). "Global shark currency: the distribution, frequency, and economic value of shark ecotourism." *Current Issues in Tourism* 14(8): 797-812.

- García-Gómez, M., S. Huerta-Ochoa, O. Loera-Corral and L. Prado-Barragán (2009). "Advantages of a proteolytic extract by *Aspergillus oryzae* from fish flour over a commercial proteolytic preparation." *Food Chemistry* 112(3): 604-608.
- Gardères J. (2013). L'éponge *Suberites domuncula*: modèle marin d'études fondamentales et biotechnologiques. Séminaire de l'Unité MCAM du vendredi 11 octobre 2013 à Paris, MNHN.
- Garnier, R. (2005). "Toxicité du plomb et de ses dérivés." *EMC-Toxicologie-pathologie* 2(2): 67-88.
- Garrigue, C., A. Aguayo, V. Amante-Helweg, C. Baker, S. Caballero, P. Clapham, R. Constantine, J. Denking, M. Donoghue and L. Flórez-González (2002). "Movements of humpback whales in Oceania, South Pacific." *Journal of Cetacean Research and Management* 4(3): 255-260.
- Garrigue, C., A. N. Zerbini, Y. Geyer, M.-P. Heide-Jørgensen, W. Hanaoka and P. Clapham (2010). "Movements of satellite-monitored humpback whales from New Caledonia." *Journal of Mammalogy* 91(1): 109-115.
- Garrigue, C., Forestell, P., Greaves, J., Gill, P., Naessig, P., Patenaude, N. M., and Baker C. S. (2000). "Migratory movement of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) between New Caledonia, East Australia and New Zealand." *Journal of Cetacean Research and Management* 2:111-115.
- Gena, K. (2013). "Deep Sea Mining of Submarine Hydrothermal Deposits and its Possible Environmental Impact in Manus Basin, Papua New Guinea." *Procedia Earth and Planetary Science* 6: 226-233.
- Gill, A.B. (2005). "Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone". *Journal of Applied Ecology*, 42: 605-615.
- Godfrey, L. V., D. C. Lee, W. F. Sangrey, A. N. Halliday, V. J. M. Salters, J. R. Hein and W. M. White (1997). "The Hf isotopic composition of ferromanganese nodules and crusts and hydrothermal manganese deposits: Implications for seawater Hf." *Earth and Planetary Science Letters* 151(1-2): 91-105.
- Goldberg, D. S., T. Takahashi and A. L. Slagle (2008). "Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(29): 9920-9925.
- Gómez-Baggethun, E. and R. de Groot (2010). "Natural capital and ecosystem services: the ecological foundation of human society." *Issues in Environmental Science and Technology* 30: 731058-700105.
- Gonzalez, F. J., L. Somoza, T. Torres, J. E. Ortiz, R. Lunar, J. Martínez-Frías, T. Medialdea and R. Leon (2010). "Thermogenic hydrocarbons in Fe-Mn nodules from the Gulf of Cadiz: A new tool for oil and gas exploration." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 74(12): A347-A347.
- González, F., L. Somoza, R. Lunar, J. Martínez-Frías, J. Martín Rubí, T. Torres, J. Ortiz and V. Díaz del Río (2007). "Fe-Mn nodules associated with hydrocarbon seeps: A new discovery in the Gulf of Cadiz (eastern central Atlantic)." *Episodes* 30 (3), 187-196.
- González, F., L. Somoza, R. Lunar, J. Martínez-Frías, J. Martín Rubí, T. Torres, J. Ortiz, V. Díaz del Río, L. Pinheiro and V. Magalhães (2009). "Hydrocarbon-derived ferromanganese nodules in carbonate-mud mounds from the Gulf of Cadiz: mud-breccia sediments and clasts as nucleation sites." *Marine Geology* 261(1): 64-81.

Gordon, J. (2001). "Deep-water fisheries at the Atlantic Frontier." *Continental Shelf Research* 21(8): 987-1003.

Gouvernement de Kiribati. Site de l'office du tourisme. <http://www.kiribatitourism.gov.ki/>

Gouvernement de Nouvelle-Zélande- Ministère du Commerce, de l'Innovation et de l'Emploi. Key tourism Statistics, 2013. <http://www.med.govt.nz/sectors-industries/tourism/pdf-docs-library/key-tourism-statistics/key-tourism-statistics.pdf>

Gouvernement de Nouvelle-Zélande- Ministère du Commerce, de l'Innovation et de l'Emploi. Sondages réalisés auprès des touristes étrangers. Site consulté en 2013 <http://www.med.govt.nz/sectors-industries/tourism/tourism-research-data/international-visitor-survey>

Gouvernement de Nouvelle-Zélande-Ministère du Développement Economique. (2007). "Bioprospecting : Harnessing Benefits for New Zealand : A policy framework discussion." 2007. <http://www.med.govt.nz/sectors-industries/natural-resources/pdf-docs-library/biodiscovery/bioprospecting-harnessing-benefits-for-new-zealand.pdf>

Gouvernement de Nouvelle-Zélande-Ministère pour l'Environnement. (2005). "Offshore Options: Managing environmental effects in New Zealand's Exclusive Economic Zone." 2005. <http://www.mfe.govt.nz/publications/oceans/offshore-options-jun05/offshore-options-jun05.pdf>

Gowans, S. and H. Whitehead (1995). "Distribution and habitat partitioning by small odontocetes in the Gully, a submarine canyon on the Scotian Shelf." *Canadian Journal of Zoology* 73(9): 1599-1608.

Grandperrin, R., B. Richer de Forges, J. Auzende, E. Bouniot, L. Durand Saint-Omer, C. Habault, C. Hénin, P. Laboute, Y. Lafoy and J. Rivaton (1997). Ressources marines de Nouvelle-Calédonie: le programme ZoNéCo= Marine resources of New Caledonia: the ZoNéCo programme.

Greco, R. M., J. A. Iacono and H. P. Ehrlich (1998). "Hyaluronic acid stimulates human fibroblast proliferation within a collagen matrix." *Journal of cellular physiology* 177(3): 465-473.

Grehan, A., R. Long, B. Deegan and M. Ó Cinneide (2003). "The Irish Coral Task Force and Atlantic Coral Ecosystem Study: Report on Two Deep-Water Coral Conservation Stakeholder Workshops Held in Galway in 2000 and 2002." <http://oar.marine.ie/bitstream/10793/234/1/No%2011%20%20Marine%20Environment%20and%20Health%20Series.pdf>

Groupe Adrien. Site consulté en 2013. "Produits à base d'encornet géant." http://www.adrien.fr/web/p937_produits-a-base-de-calamar-geant-pota.html

Gubbay, S. (2000): Offshore Directory. Review of a selection of habitats, communities and species of the North-East Atlantic. WWF UK, 77 pp.

Gubbay, S. and W. Germany (2003). Seamounds of the North-East Atlantic, Oasis, Hamburg & WWF Germany.

Guezennec, J. (2002). "Deep-sea hydrothermal vents: a new source of innovative bacterial exopolysaccharides of biotechnological interest?" *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 29(4): 204-208.

- Guezennec, J. (2004). "Les bactéries des sources hydrothermales profondes a l'origine de nouvelles molécules bioactives?" *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 5(3).
- Gulin, S. B., Y. G. Artemov, V. N. Egorov and D. B. Evtushenko (2013). "The Dnepr Canyon: evidence for a continuous submarine channel link between the outer shelf and the deep-sea basin of the northwestern Black Sea." *Geo-Marine Letters* 33(4): 319-324.
- Gutnick, D. and H. Bach (2000). "Engineering bacterial biopolymers for the biosorption of heavy metals; new products and novel formulations." *Applied microbiology and biotechnology* 54(4): 451-460.
- Halfar, J. and R. M. Fujita (2007). "Danger of deep-sea mining." *Science* 316(5827).
- Hamon, P.-Y. (1972). "Le Sebaste, *Sebastes marinus* sp. Lieux de pêche, biologie, exploitation du Nord-ouest." *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes* 36(3): 337-352. <http://archimer.ifremer.fr/doc/1972/publication-2058.pdf>
- Haney, J., L. Haury, L. Mullineaux and C. Fey (1995). "Sea-bird aggregation at a deep North Pacific seamount." *Marine Biology* 123(1): 1-9.
- Hannah L. (2012) Deep Sea Minerals in the Pacific Islands Region. Pacific Islands Tax Administrators Association 12 September 2012, Tarawa SOPAC 2012.
- Hasselström, L. (2008). Tourism and recreation industries in the Baltic Sea area—How are they affected by the state of the marine environment. Naturvårdsverket/Swedish Environmental Protection Agency, Report 5878. <http://www.stockholmresiliency.org/download/18.5004bd9712b572e3de6800016209/Tourism+and+recreation+industries+in+the+Baltic+Sea+area.pdf>
- Heip, C., H. Hummel, P. van Avesaath, W. Appeltans, C. Arvanitidis, R. Aspden, M. Austen, F. Boero, T. Bouma and G. Boxshall (2009). *Marine biodiversity and ecosystem functioning*. Printbase, Dublin, Ireland.
- Hire, C. C., H. C. Genuino, S. L. Suib and D. H. Adamson (2013). "Titania Condensation by a Bio-Inspired Synthetic Block Copolymer." *Chemistry of Materials* 25(10): 2056-2063.
- Hlawatsch, S., C. D. Garbe-Schonberg, F. Lechtenberg, A. Manceau, N. Tamura, D. A. Kulik and M. Kersten (2002). "Trace metal fluxes to ferromanganese nodules from the western Baltic Sea as a record for long-term environmental changes." *Chemical Geology* 182(2-4): 697-709.
- Hooker, S. and R. W. Baird (1999). "Observations of Sowerby's beaked whales, *Mesoplodon bidens*, in the Gully, Nova Scotia." *Canadian Field-Naturalist* 113(2): 273-277.
- Hooker, S. K. and H. Whitehead (2002). "Click characteristics of northern bottlenose whales (*Hyperoodon ampullatus*)." *Marine Mammal Science* 18(1): 69-80.
- Hooker, S. K., H. Whitehead and S. Gowans (1999). "Marine protected area design and the spatial and temporal distribution of cetaceans in a submarine canyon." *Conservation Biology* 13(3): 592-602.
- Hooker, S. K., H. Whitehead and S. Gowans (2002). "Ecosystem consideration in conservation planning: energy demand of foraging bottlenose whales (*Hyperoodon ampullatus*) in a marine protected area." *Biological Conservation* 104(1): 51-58.
- Horneck, G. (2000). "The microbial world and the case for Mars." *Planetary and Space Science* 48(11): 1053-1063.

Howe, A. (2009). "Deep-sea hydrothermal vent fauna: evolution, dispersal, succession and biogeography." *Macalester Reviews in Biogeography* 1(1): 6.

http://ec.europa.eu/europeaid/where/octs_and_greenland/documents/signed-spd-wf-10th-edf_en.pdf

Humphris, S. E., P. M. Herzig, D. J. Miller, J. C. Alt, K. Becker, D. Brown, G. Brugmann, H. Chiba, Y. Fouquet, J. B. Gemmell, G. Guerin, M. D. Hannington, N. G. Holm, J. J. Honnorez, G. J. Iturrino, R. Knott, R. Ludwig, K. Nakamura, S. Petersen, A. L. Reysenbach, P. A. Rona, S. Smith, A. A. Sturz, M. K. Tivey and X. Zhao (1995). "The internal structure of an active sea-floor massive sulfide deposit." *Nature* 377(6551): 713-716.

Hyun, J.-H. (2006). "Resource-limited heterotrophic prokaryote production and its potential environmental impact associated with Mn nodule exploitation in the northeast equatorial pacific." *Microbial ecology* 52(2): 244-252.

I N E R I S - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques (2010). Mercure et ses dérivés. Dernière mise à jour : 20/09/2010

Iborra Martín, J. (2008). "La Pêche à Madère." Département thématique Politiques structurelles et de Cohésion du Parlement Européen. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2008/408947/IPOL-PECH_NT\(2008\)408947_FR.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2008/408947/IPOL-PECH_NT(2008)408947_FR.pdf)

ICES, C. (2012). Report of the Working Group on the Biology and Assessment of Deep-Sea Fisheries Resources.

IEOM (2012a). Rapport annuel 2012 I EOM Polynésie française. http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2012_polynesie_francaise.pdf

IEOM (2012b). Rapport annuel 2012 I EOM Nouvelle-Calédonie. http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2012_nouvelle-caledonie.pdf

IEOM (2012c). Rapport annuel 2012 I EOM Wallis et Futuna. http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2012_wallis-et-futuna.pdf

Ifremer. (2012) Dossier d'actualité "Pêches en eaux profondes dans les eaux européennes : expertise et travaux menés par l'Ifremer, 23 juillet 2012" <http://wwz.ifremer.fr/institut/Les-ressources-documentaires/Medias/Dossiers-d-actualite/Peche-en-eaux-profondes>

Ifremer. (2012). Article sur l'utilisation des grands fonds dans le traitement des déchets. "La mer, lieu de stockage ou décharge ?" Mise à jour le 09 j anvier 2012 http://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-enjeux/Les-applications/Traitement-des-dechets

Ifremer. (2012). Article sur les ressources biologiques des grands fonds, applications en biotechnologie, section enzymes. Mise à jour le 24 février 2012. http://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-enjeux/Les-applications/Ressources-biologiques/La-biotechnologie/Les-enzymes

Ifremer. (2012). Article sur les ressources biologiques des grands fonds, section « pêche profonde ». Mise à jour le 24 février 2012. http://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-enjeux/Les-applications/Ressources-biologiques/La-peche

Ifremer. (2013). Dossier d'actualité « Le point sur les pêches profondes dans les eaux européennes (dossier) - juin 2013 » <http://wwz.ifremer.fr/peche/content/download/71009/929328/file/Le%20point%20sur%20les%20pêches%20profondes%20dans%20les%20eaux%20européennes.pdf>

- Ifremer. (2013). Les fiches. Par pêcheries. "Mer de Barents" <http://wwz.ifremer.fr/peche/Les-fiches/Par-pecheries/Mer-de-Barents>
- Ingole, B., N. Goltekar, S. Gonsalves and Z. Ansari (2005). "Recovery of deep-sea meiofauna after artificial disturbance in the Central Indian Basin." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(4): 253-266.
- Ingole, B., S. Pavithran and Z. A. Ansari (2005). "Restoration of deep-sea macrofauna after simulated benthic disturbance in the Central Indian Basin." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(4): 267-288.
- Ingole, B., Z. Ansari, S. Matondkar and N. Rodrigues (1999). "Immediate response of meio and macrobenthos to disturbance caused by a benthic disturber." Proc. III Ocean Mining Symp. (Goa, India, November 8–10) 1999; 191–194.
- Ingole, B., Z. Ansari, V. Rathod and N. Rodrigues (2001). "Response of deep-sea macrobenthos to a small-scale environmental disturbance." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3401-3410.
- Ingri, J. (1985). "Geochemistry of ferromanganese concretions in the Barents Sea." *Marine geology* 67(1): 101-119.
- INSEE. Prix moyens mensuels de vente au détail en métropole – boudrie (lotte) en tranches (1 kg), mise à jour du 14 août 2013 <http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/bsweb/serie.asp?idbank=000641405>
- IUCN (2009). "Deep-water fisheries." http://www.iucn.org/about/work/programmes/marine/marine_our_work/marine_governance/eamounts/about_deep_water_fisheries/
- Ivanov, V. V. and G. I. Shapiro (2005). "Formation of a dense water cascade in the marginal ice zone in the Barents Sea." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 52(9): 1699-1717.
- Ivanov, V. V., G. I. Shapiro, J. M. Huthnance, D. L. Aleynik and P. N. Golovin (2004). "Cascades of dense water around the world ocean." *Progress in Oceanography* 60(1): 47-98.
- Jankowski, J. and W. Zielke (1997). Data support for modelling of deep-sea mining impacts. Proceedings of the Seventh (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, Citeseer.
- Jobstvogt, N., N. Hanley, S. Hynes, J. Kenter and U. Witte (2013). "Twenty Thousand Sterling Under the Sea: Estimating the value of protecting deep-sea biodiversity." Stirling Economics Discussion Paper.
- John B, S. H., Phil J., Erich H., Peter C., Andrew S., Peter M., Ian L. (2010). "NAT005 Solwara 1 Offshore Production System Definition and Cost Study." Nautilus Minerals: 1-275.
- Jones, A. (2000). "Review of benthic impact experiments related to seabed mining." Offshore Technology Conference.
- Joos, F., J. L. Sarmiento and U. Siegenthaler (1991). "Estimates of the effect of Southern-Ocean iron fertilization on atmospheric CO₂ concentrations." *Nature* 349(6312): 772-775.
- Joseph, C. and T. I. Gunton (2009). Benefits of Marine Planning: An Assessment of Economic and Environmental Values, Marine Planning Research Report.

- Jost, C. (2010). "Jeux et enjeux géopolitiques et économiques dans le Pacifique nord-oriental." *Diplomatie-Affaires stratégiques et relations internationales*(13). http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/70/73/PDF/Diplomatie_Jost.pdf
- Journal de bord de la campagne MoMARSAT (2011). Site consulté en 2013 <http://www.ifremer.fr/momarsat2010/archives/11-07-08.htm>
- Julshamn, K., A. Mage, I. M. B. Tyssebotn and L. J. Saethre (2011). "Concentrations of Mercury and Other Toxic Elements in Orange Roughy, *Hoplostethus atlanticus*, from the Mid-Atlantic Ridge." *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 87(1): 70-73.
- Jumars, P. A. (1981). "Limits in Predicting and Detecting Benthic Community Responses to Manganese Nodule Mining." *MAR. MIN.* 3(1): 213-229.
- Jung, H.-S., C.-B. Lee, K.-S. Jeong and J.-K. Kang (1998). "Geochemical and mineralogical characteristics in two-color core sediments from the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, northeast equatorial Pacific." *Marine geology* 144(4): 295-309.
- Kádár, E., V. Costa and M. Segonzac (2007). "Trophic influences of metal accumulation in natural pollution laboratories at deep-sea hydrothermal vents of the Mid-Atlantic Ridge." *Science of the total environment* 373(2): 464-472.
- Kadko, D. (1996). "Radioisotopic studies of submarine hydrothermal vents." *Reviews of Geophysics* 34(3): 349-366.
- Kajitani, Y. (1997). Summary of the Japanese environmental study for manganese nodules development. Proceedings of the International Symposium on Environmental Studies for Deep Sea Mining, MMAJ, Tokyo, Japan.
- Kalmijn, A. J. (1971). "Electric sense of sharks and rays." *Journal of Experimental Biology* 55(2): 371-&.
- Kalmijn, A. J. and K. J. Rose (1978). "Sharks 6th sense." *Natural History* 87(3): 76-81.
- Kaye, J. Z. and J. A. Baross (2000). "High incidence of halotolerant bacteria in Pacific hydrothermal-vent and pelagic environments." *FEMS microbiology ecology* 32(3): 249-260.
- Kenney, R. D. and H. E. Winn (1987). "Cetacean biomass densities near submarine canyons compared to adjacent shelf/slope areas." *Continental Shelf Research* 7(2): 107-114.
- Kessler, M. and R. Harcourt (2012). "Management implications for the changing interactions between people and whales in Ha'apai, Tonga." *Marine Policy* 36(2): 440-445.
- Kessler, M., R. Harcourt and G. Heller (2013). "Swimming with whales in Tonga: Sustainable use or threatening process?" *Marine Policy* 39: 314-316.
- Khadge, N. and A. Valsangkar (2008). "Geotechnical characteristics of siliceous sediments from the Central Indian Basin." *Current Science* 94: 1570-1573p.
- Khripounoff, A., J.-C. Caprais, P. Crassous and J. Etoubleau (2006). "Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule fields of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5,000-m depth." *Limnology and oceanography* 51(5): 2033-2041.
- Klinck, H., D. K. Mellinger, K. Klinck, N. M. Bogue, J. C. Luby, W. A. Jump, G. B. Shilling, T. Litchendorf, A. S. Wood and G. S. Schorr (2012). "Near-real-time acoustic monitoring of beaked whales and other cetaceans using a Seaglider™." *PloS one* 7(5): e36128.
- Klinkhammer, G. P. and A. Hudson (1986). "Dispersal patterns for hydrothermal plumes in the southern Pacific using manganese as a tracer." *Earth Planet Sci. Lett.* 79: 241-249.

- Knowles, E., R. Wirth and A. Templeton (2012). "A comparative analysis of potential biosignatures in basalt glass by FIB-TEM." *Chemical Geology*.
- Konishi, Y., N. Saitoh, T. Ogi and Asme (2009). A new biohydrometallurgical method for processing of deep-sea mineral resources. New York, Amer Soc Mechanical Engineers.
- Koschinsky, A., C. Borowski and P. Halbach (2003). "Reactions of the heavy metal cycle to industrial activities in the deep sea: An ecological assessment." *International review of hydrobiology* 88(1): 102-127.
- Koslow, T. (2007). "The silent deep: the discovery, ecology and conservation of the deep sea." *Oceanography* 23(1): 228.
- Kotlinski, R. (1995). "InterOceanMetal Joint Organization: achievements and challenges." First ISOPE Ocean Mining Symposium, International Society of Offshore and Polar Engineers. Kotlinski, R. (1995). InterOceanMetal Joint Organization: achievements and challenges. Proc. 1st ISOPE Ocean Mining Symp., Tsukuba, Japan.
- Kotlinski, R. and G. Tkatchenko (1997). Preliminary results of IOM environmental research. Proceedings of the International Symposium on Environmental Studies for Deep Sea Mining, MMAJ, Tokyo, Japan.
- Krasko, A., B. Lorenz, R. Batel, H. C. Schroder, I. M. Muller and W. E. G. Muller (2000). "Expression of silicatein and collagen genes in the marine sponge *Suberites domuncula* is controlled by silicate and myotrophin." *European Journal of Biochemistry* 267(15): 4878-4887.
- Kudrass, H. (1984). "The distribution and reserves of phosphorite on the central Chatham Rise (Sonne-17 cruise 1981)." *Phosphorite Deposits on the Chatham Rise, New Zealand, Geologisches Jahrbuch Reihe D(65)*.
- Kumar, D., N. T. Savitri, R. Verma and T. C. Bhalla (2008). "Microbial proteases and application as laundry detergent additive." *Res J Microbiol* 3: 661-672.
- Kumasi B, U. T., Baje L. and Kumoru L (2012). "Decomposition of tuna length frequency data from port sampling in Papua New Guinea." Papua New Guinea National Fisheries Authority.
- Kumoru, L. (2007). "Catch information from the FAD-based domestic tuna purse seine fishery in Papua New Guinea [FT WP 8]." Pohnpei, Federated States of Micronesia: Western and Central Pacific Fisheries Commission. Scientific Committee Regular Session, Honolulu, Hawaii, USA, 13-24 August 2007, 3rd. 18 p.
- Laboratoire de recherche sur les requins du Canada. Consulté en 2013. Fiche d'*Etmopterus princeps*. <http://www.marinebiodiversity.ca/shark/french/rsagre.htm>
- Laboute, P. and R. Grandperrin (2000). "Poissons de Nouvelle-Calédonie." *Ichthyological Bulletin of the J. L. B. Smith Institute of Ichthyology* 7-520: 495
- Lafoy, Y., Van de Beuque, S., Perrier, J., Auzende, J.M. (1996). Synthèse des connaissances sur les potentialités en ressources minérales profondes de la Zone Economique Exclusive de Nouvelle-Calédonie, Rapport ZoNéCo.
- Lamborg, C. H., K. L. Von Damm, W. F. Fitzgerald, C. R. Hammerschmidt and R. Zierenberg (2006). "Mercury and monomethylmercury in fluids from Sea Cliff submarine hydrothermal field, Gorda Ridge." *Geophysical Research Letters* 33(17).

- Laurent, D. (1999). "Substances naturelles marines bioactives en Nouvelle-Calédonie, le bilan de 20 ans de recherches." IRD. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/doc34-05/010020257.pdf
- Laurienzo, P. (2010). "Marine polysaccharides in pharmaceutical applications: an overview." *Marine drugs* 8(9): 2435-2465.
- Le Monde (.2012). "Des déchets radioactifs français ont aussi été immergés dans l'Atlantique." 2012. http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/07/11/des-dechets-radioactifs-francais-ont-aussi-ete-immerges-dans-l-atlantique_1732418_3244.html
- Leary, D., M. Vierros, G. Hamon, S. Arico and C. Monagle (2009). "Marine genetic resources: a review of scientific and commercial interest." *Marine policy* 33(2): 183-194.
- Lehodey, P. and R. Grandperrin (1994). "Etude de la pêche et de la biologie de *Beryx splendens* en Nouvelle-Calédonie." *Lettres d'Information sur les Pêches*(71): 30-36.
- Lenoble, J. P. (1992). "Evaluation of existing knowledge on deep sea mining and some considerations on its potential environmental impacts." Rapport YUZHMOLOGIYA-PREUSSAG/THETIS-IFREMER/AFERNOD, 6OP, MAI 1992.
- Lenoble, J. P. (1996). "Les nodules polymétalliques: bilan de 30 ans de travaux dans le monde." *Chronique de la Recherche Minière* 524: 15-39.
- Levy, L. (2003). "Rapport n°1 : Identification génétique des populations ichtyologiques marines de *Beryx splendens* de la Zone Economique Exclusive de la Nouvelle-Calédonie." ZoNéCo 2003.
- Leys, S., K. Wilson, C. Holeton, H. Reisswig, W. Austin and V. Tunnicliffe (2004). "Patterns of glass sponge (Porifera, Hexactinellida) distribution in coastal waters of British Columbia, Canada." *Marine Ecology Progress Series* 283: 133-149.
- Li, Y.-H. (1991). "Distribution patterns of the elements in the ocean: A synthesis," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (11) : 3223-3240
- Liquete, C., C. Piroddi, E. G. Drakou, L. Gurney, S. Katsanevakis, A. Charef and B. Egoh (2013). "Current status and future prospects for the assessment of marine and coastal ecosystem services: a systematic review." *PloS one* 8(7): e67737.
- Loaec, M., R. Olier and J. Guezennec (1997). "Uptake of lead, cadmium and zinc by a novel bacterial exopolysaccharide." *Water Research* 31(5): 1171-1179.
- Lohmann, K. J. (1991). "Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea-turtles (*Caretta caretta*)." *Journal of Experimental Biology* 155: 37-49.
- Lorance, P. (2007). "Deep-sea fisheries resources and ecosystem." Policy Department Structural and Cohesion Policies- European Parliament's Committee on Fisheries IP/B/PECH/IC/2007-096. <http://www.ifremer.fr/peche/content/download/40527/553037/file/deepsea%20fisheries.pdf>
- Lurton, X. (2013). "Le rôle des risques sonores pour les mammifères marins, Protocole Ifremer pour les émissions sismiques. Ifremer: 24 pages.
- Lurton, X. and L. Antoine (2007). "Analyse des risques pour les mammifères marins liés à l'emploi des méthodes acoustiques en océanographie. Ifremer: 88pages.
- Luther, G. W., Glazer B. T., Ma S. F., Trouwborst R. E., Moore T. S., Metzger E., Kraiwa C., Waite T. J., Druschel G., Sundby B., Taillefert M., Nuzzio D. B., Shank T. M., Lewis B. L. and Brendel P. J. (2008). "Use of voltammetric solid-state (micro)electrodes for studying

- biogeochemical processes: Laboratory measurements to real time measurements with an in situ electrochemical analyzer (ISEA)." *Marine Chemistry* 108(3-4): 221-235.
- Maggiani, F. (2005). Mesures de pollution sonore. Rapport final Action A3 pour le Rapport intermédiaire Life LINDA, Période du 01/ 11/03 au 30/11/05, 40 pp http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&ep=file&fil=LINDA_rapport_finalA3.pdf
- Marcaillou, C. (2011). S erpentisation et production d'hydrogène en contexte de dorsale lente: Approche expérimentale et numérique, Université de Grenoble.
- Marie, B., B. Genard, J.-F. Rees and F. Zal (2006). "Effect of ambient oxygen concentration on activities of enzymatic antioxidant defences and aerobic metabolism in the hydrothermal vent worm, *Paralvinella grasslei*." *Marine biology* 150(2): 273-284.
- Marine Animal Response Society. Site officiel de l'association caritative consulté en 2013. Fiche de la baleine à bec commune. Mars 2007 http://www.marineanimals.ca/species/nbn_fr.html
- Marion, G. M., C. H. Fritsen, H. Eicken and M. C. Payne (2003). "The search for life on Europa: limiting environmental factors, potential habitats, and Earth analogues." *Astrobiology* 3(4): 785-811.
- Markussen, J. M. (1994). "Deep seabed mining and the environment: consequences, perceptions and regulations." HO Bergesen & G. Parmann, *Green Globe Yearbook of International Co-operation on Environment and Development 1994*: 31-39.
- Martin-Lecuyer, F. and O. Donard (1997). "Techniques de spéciation des métaux traces." *Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation 5(P3870)*: P3870. 3871-P3870. 3822.
- Martin, W., J. Baross, D. Kelley and M. J. Russell (2008). "Hydrothermal vents and the origin of life." *Nature Reviews Microbiology* 6(11): 805-814.
- Martins, I., R. P. Cosson, V. Riou, P.-M. Sarradin, J. Sarrazin, R. S. Santos and A. Colaço (2011). "Relationship between metal levels in the vent mussel *Bathymodiolus azoricus* and local microhabitat chemical characteristics of Eiffel Tower (Lucky Strike)." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 58(3): 306-315.
- Martins, I., V. Costa, F. Porteiro, A. Colaço and R. Santos (2006). "Mercury concentrations in fish species caught at Mid-Atlantic Ridge hydrothermal vent fields." *Marine Ecology Progress Series* 320: 253-258.
- Mathieu B. (2008). "Définition et analyse de la pêche dans les atolls." Site de l'IRD <http://www.com.univ-mrs.fr/IRD/atollpol/resatoll/peche/avepeche/locapech.htm#Home>
- Matsui T., K. Ogawa K. and T. Fukushima T. (1997). "A Distribution of Megafauna Two Years After a Deep Sea Impact." To be presented at International Symposium on Environmental Impact of Deep Sea Mining, Tokyo, Japan. Nov. 1997.
- Matsumoto, W.M. (1984). Potential impact of deep seabed mining on the larvae of tunas and billfishes, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Southwest Fisheries Center, Honolulu Laboratory.
- Matter, J. M. and P. B. Kelemen (2009). "Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation." *Nature Geoscience* 2(12): 837-841.
- Maxwell, S. M., J. J. Frank, G. A. Breed, P. W. Robinson, S. E. Simmons, D. E. Crocker, J. P. Gallo-Reynoso and D. P. Costa (2012). "Benthic foraging on seamounts: A specialized foraging behavior in a deep-diving pinniped." *Marine Mammal Science* 28(3): E333-E344.

Maxwell, S., H. Ehrlich, L. Speer and W. Chandler (2005). "Medicines from the deep: the importance of protecting the High Seas from bottom trawling." Natural Resources Defense Council, Issue Paper: 1-14.

McAllister, D. E. (1988). "Environmental, economic and social costs of coral reef destruction in the Philippines." *Galaxea* 7: 161-178.

McCollom, T. M. and J. S. Seewald (2013). "Serpentinites, Hydrogen, and Life." *Elements* 9(2): 129-134.

McGrail, B. P., H. T. Schaef, A. M. Ho, Y. J. Chien, J. J. Dooley and C. L. Davidson (2006). "Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 111(B12).

MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*, Washington (DC), Island Press 2005.

Mellado, G. G., E. Zubía, M. J. Ortega and P. J. López-González (2005). "Steroids from the Antarctic octocoral *Anthomastus bathyproctus*." *Journal of natural products* 68(7): 1111-1115.

Menezes, G. M., A. Rosa, O. Melo and M. R. Pinho (2009). "Demersal fish assemblages off the Seine and Sedlo seamounts (northeast Atlantic)." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(25): 2683-2704.

Merinero, R., R. L. unar, J. Martínez-Frías, L. Somoza and V. Díaz-del-Río (2008). "Iron oxyhydroxide and sulphide mineralization in hydrocarbon seep-related carbonate submarine chimneys, Gulf of Cadiz (SW Iberian Peninsula)." *Marine and Petroleum Geology* 25(8): 706-713.

Meszaros John. Site officiel consulté en 2013. <http://www.nocturnalsea.com/Deep%20Sea.html>

Micallef, A., J. J. Mountjoy, M. Canals and G. Lastras (2012). "Deep-Seated Bedrock Landslides and Submarine Canyon Evolution in an Active Tectonic Margin: Cook Strait, New Zealand. Submarine Mass Movements and Their Consequences.", Springer: 201-212.

Miljutin, D. M., M. A. Miljutina, P. M. Arbizu and J. Galéron (2011). "Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific)." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 58(8): 885-897.

Millennium Environmental Assessment (MEA). Site officiel consulté en 2013. <http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>

Minic, Z., V. Serre and G. Hervé (2006). "Adaptation des organismes aux conditions extrêmes des sources hydrothermales marines profondes." *Comptes Rendus Biologies* 329(7): 527-540.

Ministère de l'Artisanat, du Commerce et du Tourisme. Dossier de veille sectorielle des Terres Australes et Antarctiques Françaises de l'Office du tourisme, Le tourisme de A à Z, dossiers de veille sectorielle, (2008). <http://www.veilleinfotourisme.fr/le-tourisme-de-a-a-z-dossiers-de-veille-sectorielle--92226.kjsp>

Ministère de l'Artisanat, du Commerce et du Tourisme. Dossier de veille sectorielle Polynésie Française, de l'Office du Tourisme. Le tourisme de A à Z, dossiers de veille sectorielle, (2008). <http://www.veilleinfotourisme.fr/le-tourisme-de-a-a-z-dossiers-de-veille-sectorielle--92226.kjsp>

- Ministère de l'Économie et des Finances. Liste des dénominations commerciales. Mise à jour le 10 avril 2013. <http://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Poissons>
- Ministère des Affaires Étrangères, dossier sur les îles Marshall. Page consultée en 2013. http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/pays-zones-geo/iles-marshall/article/presentation-13386#sommaire_3
- Ministère des Outre-Mer (2012). Dépêche A.F.P. "Les terres australes françaises, au cœur des enjeux majeurs du X^e XI^e siècle" 02 no vembre 2012. <http://www.outre-mer.gouv.fr/outremer/galerie/?les-terres-australes-francaises-au-coeur-des-enjeux-majeurs-du-xxie.html>
- Ministère Pêche Océan Canada. Fiche du thon germon, page consultée en 2013. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/species-especes/aquatic-aquatique/north-pac-albacore-tuna-germon-thon-blanc-fra.htm>
- Ministère Pêche Océan Canada. Zone de Protection Marine, Champ hydrothermal Endeavour., page consultée en 2013. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/marineareas-zonesmarines/mpa-zpm/pacific-pacifique/endeavour-fra.htm>
- MNHN. Page d'accueil de la mission CEAMARC/Mers Australes, consultée en 2013. <http://mersaustrales.mnhn.fr/rubriques/voir/173>
- MNHN. Page de la mission CEAMARC/Mers Australes, section Chondrichthyens, consultée en 2013. <http://mersaustrales.mnhn.fr/rubriques/voir/174>
- Morato, T., C. Bulman and T. J. Pitcher (2009). "Modelled effects of primary and secondary production enhancement by seamounts on local fish stocks." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(25): 2713-2719.
- Morato, T., R. Watson, T. J. Pitcher and D. Pauly (2006). "Fishing down the deep." *Fish and fisheries* 7(1): 24-34.
- Mortensen, P. B., L. Buhl-Mortensen, A. V. Gebruk and E. M. Krylova (2008). "Occurrence of deep-water corals on the Mid-Atlantic Ridge based on MAR-ECO data." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 55(1-2): 142-152.
- Muench, R., J. Morison, L. Padman, D. Martinson, P. Schlosser, B. Huber and R. Hohmann (2001). "Maud Rise revisited." *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 106(C2): 2423-2440.
- Mukhopadhyay, R., S. D. Iyer and A. K. Ghosh (2003). "The Indian Ocean Nodule Field: petro-tectonic evolution and ferromanganese deposits." *Earth-Science Reviews* 60(1-2): 67-130.
- Müller, M., K. M. Handley, J. Lloyd, R. D. Pancost and R. A. Mills (2010). "Biogeochemical controls on microbial diversity in seafloor sulphidic sediments." *Geobiology* 8(4): 309-326.
- Muller, W. E. G., A. Boreiko, U. Schlossmacher, X. H. Wang, C. Eckert, K. Kropf, J. H. Li and H. C. Schroder (2008). "Identification of a silicatein(-related) protease in the giant spicules of the deep-sea hexactinellid *Monorhaphis chuni*." *Journal of Experimental Biology* 211(3): 300-309.
- Muller, W. E. G., K. P. Jochum, B. Stoll and X. H. Wang (2008). "Formation of giant spicule from quartz glass by the deep sea sponge *Monorhaphis*." *Chemistry of Materials* 20(14): 4703-4711.
- Natalio, F., E. Mugnaioli, M. Wiens, X. H. Wang, H. C. Schroder, M. N. Tahir, W. Tremel, U. Kolb and W. E. G. Muller (2010). "Silicatein-mediated incorporation of titanium into

spicules from the demosponge *Suberites domuncula*." *Cell and Tissue Research* 339(2): 429-436.

Nath, B. N., N. Khadge, S. Nabar, C. RaghuKumar, B. Ingole, A. Valsangkar, R. Sharma and K. Srinivas (2012). "Monitoring the sedimentary carbon in an artificially disturbed deep-sea sedimentary environment." *Environmental monitoring and assessment* 184(5): 2829-2844.

Nautilus Minerals Niugini Limited. (2008). *Environmental Impact Statement, Solwara I Project, Volume A, 7-28.*

New England Biolabs. Fiche produit de la Deep Vent_RTM DNA Polymerase. http://www.neb.ca/newlab_detail.php?id=M0258

New England Biolabs. Fiche produit de la Therminator DNA Polymerase. http://www.neb.ca/newlab_detail.php?id=M0261

New England Biolabs. Fiche produit de la Vent_RTM DNA Polymerase. http://www.neb.ca/newlab_detail.php?id=M0254

Newman, M. C., X. Xu, C. F. Cotton and K. R. Tom (2011). "High mercury concentrations reflect trophic ecology of three deep-water chondrichthyans." *Archives of environmental contamination and toxicology* 60(4): 618-625.

Nichols, C. A. M., J. Guezennec and J. P. Bowman (2005). "Bacterial exopolysaccharides from extreme marine environments with special consideration of the southern ocean, sea ice, and deep-sea hydrothermal vents: A review." *Marine Biotechnology* 7(4): 253-271.

Nicol, S., T. Lawson, K. Briand, D. Kirby, B. Molony, D. Bromhead, P. Williams, E. Schneiter, L. Kumoru and J. Hampton (2009). *Characterisation of the tuna purse seine fishery in Papua New Guinea. ACIAR Technical Reports Series(70).*

Nonaka, M. and K. Muzik (2009). "Recent harvest records of commercially valuable precious corals in the Ryukyu Archipelago." *Marine Ecology Progress Series* 397: 269-278.

Normandeau, E., T. Tricas and A. Gill (2011). *Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species. US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region, Camarillo, CA. OCS Study BOEMRE 9.*

Norse, E. A., S. Brooke, W. W. Cheung, M. R. Clark, I. Ekeland, R. Froese, K. M. Gjerde, R. L. Haedrich, S. S. Heppell and T. Morato (2012). "Sustainability of deep-sea fisheries." *Marine Policy* 36(2): 307-320.

Nygren, O. and C. Nilsson (1993). "Determination and speciation of chromium, copper and arsenic in wood and dust from CCA-impregnated timber." *Analisis* 21(2): 83-89.

O'Connor, S., R. Campbell, H. Cortez and T. Knowles (2009). *Whale Watching Worldwide: Tourism numbers, expenditures and economic benefits.*

Oebius, H. U., H. J. Becker, S. Rolinski and J. A. Jankowski (2001). "Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3453-3467.

Office Européen des Brevets. Site consulté en 2013. http://www.epo.org/about-us/office_fr.html

Ohkubo, S., and Yamazaki, T. (2003). *Summary of "Environmental Impact Research on Marine Ecosystem for Deep-sea Mining" Conducted by Metal Mining Agency of Japan. Cupertino: International Society Offshore & Polar Engineers.*

- Omidian, H., J. G. Rocca and K. Park (2005). "Advances in superporous hydrogels." *Journal of controlled release* 102(1): 3-12.
- Orange. Site officiel de la compagnie, consulté en août 2013. Description de l'activité câblière. Mise à jour le 16 juillet 2013. Consulté en août 2013. <http://www.orange.com/fr/reseaux/activites/activite-cabliere>
- Oschlies, A., W. Koeve, W. Rickels and K. Rehdanz (2010). "Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization." *Biogeosciences* 7(12): 4017-4035.
- Ozretich, R. J. (1981). "Dissolved components of discharge." *Mar. Mining* 3: 95-107.
- Ozturgut, E., Lavelle, J.W., Steffin, O. and Swift, S.A. (1980). "Environmental investigations during manganese nodule mining tests in the north equatorial Pacific in November 1978." NOAA Tech. Memo. ERL MESA-48, NOAA.
- Palanques, A., J. Diaz and M. Farran (1995). "Contamination of heavy metals in the suspended and surface sediment of the Gulf of Cadiz (Spain): the role of sources, currents, pathways and sinks." *Oceanologica Acta* 18(4): 469-477.
- Parlement Européen/ Observatoire Législatif. (2012). 2012/0179(COD) -19/07/2012 Document de base législatif. <http://www.europarl.europa.eu/oeil/popups/summary.do?id=1217319&l=fr&t=D>
- Parrish, F. A., K. Abernathy, G. J. Marshall and B. M. Buhleier (2002). "Hawaiian monk seals (*Monachus schauinslandi*) foraging in deep-water coral beds." *Marine Mammal Science* 18(1): 244-258.
- Parthiban, G. (2000). "Increased particle fluxes at the INDEX site attributable to simulated benthic disturbance." *Marine georesources & geotechnology* 18(3): 223-235.
- Pautot, G., M. Hoffert, A. M. Karpoff and A. Schaaf (1981). "Le bassin de tiki (pacifique Sud Central) : Relations entre composition-distribution des nodules et la morphologie du fond." *Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique*(289): 113-118.
- Peacock, C. L. and D. M. Sherman (2007). "Crystal-chemistry of Ni in marine ferromanganese crusts and nodules." *American Mineralogist* 92(7): 1087-1092.
- Pew Workshop – Design of Marine Protected Areas for Seamounts and the Abyssal Nodule Province in Pacific High Seas. Page consultée en 2013. http://www.soest.hawaii.edu/oceanography/faculty/csmith/MPA_webpage/MPAindex.html
- Pitcher, T. J., R. Watson, N. Haggan, S. Guénette, R. Kennish, U. R. Sumaila, D. Cook, K. Wilson and A. Leung (2000). "Marine reserves and the restoration of fisheries and marine ecosystems in the South China Sea." *Bulletin of Marine Science* 66(3): 543-566.
- PoissonFrais.fr. Site consulté en 2013. Fiche de la cardine <http://www.poissonfrais.fr/pages/les-poissons/les-poissons/cardine/index-55.html>
- Pôle Mer Bretagne « (2013). "ORCASAV : nouvelle technique de pêche à la légine, au bénéfice de l'environnement et de l'activité des armements." », Site consulté le 26 novembre 2013. <http://www.pole-mer-bretagne.com/orcasav.php>
- Poli, A., G. Anzelmo and B. Nicolaus (2010). "Bacterial exopolysaccharides from extreme marine habitats: production, characterization and biological activities." *Marine drugs* 8(6): 1779-1802.

Polynésie Française- Service de la Pêche. Synthèse des résultats ECOTAP (Etude du COmportement des Thonidés par l'Acoustique et la Pêche). Deux rapports. http://www.peche.pf/IMG/pdf/MONTAGE_ECOTAP_QXD.pdf et http://www.peche.pf/IMG/pdf/MONTAGE_ECOTAP_2.QXD.pdf

Polynésie Française-Direction des Ressources Marines. Pêche halieutique (hauturière) – production, section Volume répartition. <http://www.peche.pf/spip.php?rubrique223>

Poulton, S. W. and D. E. Canfield (2006). "Co-diagenesis of iron and phosphorus in hydrothermal sediments from the southern East Pacific Rise: Implications for the evaluation of paleoseawater phosphate concentrations." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70(23): 5883-5898.

Puig, P., M. Canals, J. Martín, D. Amblas, G. Lastras, A. Palanques and A. M. Calafat (2012). "Ploughing the deep sea floor." *Nature* 489(7415): 286-289.

Puscetdu, A., M. Mea, M. Canals, S. Heussner, X. Durrieu de Madron, A. Sanchez-Vidal, S. Bianchelli, C. Corinaldesi, A. Dell'Anno and L. Thomsen (2013). "Major consequences of an intense dense shelf water cascading event on deep-sea benthic trophic conditions and meiofaunal biodiversity." *Biogeosciences* 10(4): 2659-2670.

Radziejewska T, D. I., Galtsova VV, Kulangieva LV (2001). "Changes in genus-level diversity of meiobenthic free-living nematodes (Nematoda) and harpacticoids (Copepoda Harpacticoida) at an abyssal site following experimental sediment disturbance." *Proc IV ISOPE Ocean Mining Symp (Szczecin, Poland, September 23–27, 2001)*: 38-43.

Radziejewska, T. (2002). "Responses of Deep-Sea Meiobenthic Communities to Sediment Disturbance Simulating Effects of Polymetallic Nodule Mining." *International review of hydrobiology* 87(4): 457-477.

Radziejewska, T., J. Rokicka-Praxmayer and V. Stoyanova (2001). IO M BIE revisited: Meiobenthos at the IOM BIE site 5 years after the experimental disturbance. *Proc. 4th ISOPE Ocean Mining Symp., Szczecin, Poland*.

Raghukumar, C., P. Bharathi, Z. Ansari, S. Nair, B. Ingole, G. Sheelu, C. Mohandass, B. Nagender Nath and N. Rodrigues (2001). "Bacterial standing stock, meiofauna and sediment–nutrient characteristics: indicators of benthic disturbance in the Central Indian Basin." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3381-3399.

Rai, S. K. and A. K. Mukherjee (2010). "Statistical optimization of production, purification and industrial application of a laundry detergent and organic solvent-stable subtilisin-like serine protease (Alzwiprase) from *Bacillus subtilis* DM-04." *Biochemical Engineering Journal* 48(2): 173-180.

Ramirez-Llodra, E., P. A. Tyler, M. C. Baker, O. A. Bergstad, M. R. Clark, E. Escobar, L. A. Levin, L. Menot, A. A. Rowden and C. R. Smith (2011). "Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea." *PLoS One* 6(8): e22588.

Ravot, G., D. Buteux, O. Favre-Bulle, D. Wahler, T. Veit and F. Lefevre (2004). "Screening for thermostable esterases: from deep sea to industry." *Engineering in life sciences* 4(6): 533-538.

Reeburgh, W. S. (1997). "Figures summarizing the global cycles of biogeochemically important elements." *Bulletin of the Ecological Society of America* 78(4): 260-267.

Reeburgh, W. S. (2007). "Oceanic methane biogeochemistry." *Chemical Reviews* 107(2): 486-513.

- Reid, W., H. Mooney, A. Cropper, D. Capistrano, S. Carpenter, K. Chopra, P. Dasgupta, T. Dietz, A. Duraiappah and R. Hassan (2005). "Ecosystems and human well-being: synthesis." Millennium Ecosystem Assessment.
- Reyes, A., R. Kido and C. A. Moreno (2012). "Capture and maintenance of *Dissostichus eleginoides* to establish a broodstock group." *Latin American Journal of Aquatic Research* 40(4): 1066-1071.
- Richer de Forges, B. R. (2006). "Découverte en mer du Corail d'une deuxième espèce de glyphéide (Crustacea, Decapoda, Glypheoidea)." *Zoosystema* 28(1): 17-28.
- Roche Applied Science. Site consulté en 2013. Fiche produit de la Taq polymérase, GMP grade. <http://www.roche-applied-science.com/shop/en/fr/products/taq-dna-polymerase-gmp-grade>
- Rodhouse, P. G. (2005). "C2. Ressources mondiales en calmars." in *L'état des ressources halieutiques marines mondiales*. FAO: 190.
- Roth, S. E. and J. Dymond (1989). "Transport and settling of organic material in a deep-sea hydrothermal plume: evidence from particle flux measurements." *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 36(8): 1237-1254.
- Rousse, N., J. Boulegue, R. P. Cosson and A. Fiala-Medioni (1998). "Bioaccumulation of metals within the hydrothermal mytilidae *Bathymodiolus* sp. from the Mid-Atlantic Ridge." *Oceanologica Acta* 21(4): 597-607.
- Runge, J. A. (1988). "Should we expect a relationship between primary production and fisheries - The role of copepod dynamics as a filter of trophic variability." *Hydrobiologia* 167: 61-71.
- Rungis Note Hebdo Marée, semaine 30 du 22 /07/13 au 27/07/13 ; Rungis Marée Fraîche. Consulté le 26 juillet 2013 www.RNM.franceagrimer.fr
- Ruppel, C. (2011). "Supplementary Paper 4." MITEI Natural Gas Report: 1-25. http://mitei.mit.edu/system/files/Supplementary_Paper_SP_2_4_Hydrates.pdf
- Saito, M. A., A. E. Noble, A. Tagliabue, T. J. Goepfert, C. H. Lamborg and W. J. Jenkins (2013). "Slow-spreading submarine ridges in the South Atlantic as a significant oceanic iron source." *Nature Geoscience* 6(9): 775-779.
- Salles, J.-M. (2010). "Évaluer la biodiversité et les services écosystémiques: pourquoi, comment et avec quels résultats?" *Natures Sciences Sociétés* 18(4): 414-423.
- Salomidi, M., S. Katsanevakis, Á. Borja, U. Braeckman, D. Damalas, I. Galparsoro, R. Mifsud, S. Mirto, M. Pascual and C. Pipitone (2012). "Assessment of goods and services, vulnerability, and conservation status of European seabed biotopes: a stepping stone towards ecosystem-based marine spatial management." *Mediterranean Marine Science* 13(1): 49-88.
- Sanchirico, J. N. and P. M. Emerson (2002). *Marine protected areas: economic and social implications*, Resources for the Future Washington, DC.
- Sander, S. G. and A. Koschinsky (2011). "Metal flux from hydrothermal vents increased by organic complexation." *Nature Geoscience* 4(3): 145-150.
- Sander, S. G., A. Koschinsky, G. Massoth, M. Stott and K. A. Hunter (2007). "Organic complexation of copper in deep-sea hydrothermal vent systems." *Environmental Chemistry* 4(2): 81-89.

- Santelli, C. M. (2009). "BIOGEOCHEMISTRY Life in the deep sea." *Nature Geoscience* 2(12): 825-826.
- Santelli, C. M., B. N. Orcutt, E. Banning, W. Bach, C. L. Moyer, M. L. Sogin, H. Staudigel and K. J. Edwards (2008). "Abundance and diversity of microbial life in ocean crust." *Nature* 453(7195): 653-656.
- Santora, J. A., J. C. Field, I. D. Schroeder, K. M. Sakuma, B. K. Wells and W. J. Sydeman (2012). "Spatial ecology of krill, micronekton and top predators in the central California Current: implications for defining ecologically important areas." *Progress in Oceanography*.
- Sarradin, P.-M., M. Waeles, S. Bernagout, C. Le Gall, J. Sarrazin and R. Ri so (2009). "Speciation of dissolved copper within an active hydrothermal edifice on the Lucky Strike vent field (MAR, 37 N)." *Science of the Total Environment* 407(2): 869-878.
- Schaffar, A. et Garrigue, C. (2007). Etat des lieux de l'activité commerciale d'observation des baleines à bosse dans le Pacifique Sud. Rapport FFEM.
- Schoenherr, J. R. (1991). "Blue whales feeding on high concentrations of euphausiids around Monterey Submarine Canyon." *Canadian Journal of Zoology* 69(3): 583-594.
- Schriever, G. (2000). "Evaluation of results relevant to environmental considerations of polymetallic nodule mining based on the German ATESEPP project." *Offshore Technology Conference*.
- Schriever, G., A. Ahnert, C. Borowski and H. Thiel (1997). "Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation." *Metal Mining Agency of Japan, Tokyo*.
- Schulte, M., D. Blake, T. Hoehler and T. McCOLLOM (2006). "Serpentinization and its implications for life on the early Earth and Mars." *Astrobiology* 6(2): 364-376.
- Scott, S. (2001). "Deep ocean mining." *Geoscience Canada* 28(2).
- Seckbach, J. and A. Oren (2000). Extremophilic microorganisms as candidates for extraterrestrial life. *Proc SPIE*.
- Shapiro, G., J. Huthnance and V. Ivanov (2003). "Dense water cascading off the continental shelf." *Journal of Geophysical Research* 108(C12): 3390.
- Sharma, R. (2005). "Deep-sea impact experiments and their future requirements." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(4): 331-338.
- Sharma, R. (2011). "Deep-sea mining: Economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development." *Marine Technology Society Journal* 45(5): 28-41.
- Sharma, R., B. N. Nath and S. J. Sankar (2005). "Monitoring the impact of simulated deep-sea mining in Central Indian Basin." *Marine Georesources & Geotechnology* 23(4): 339-356.
- Shelden, K. E., S. E. Moore, J. M. Waite, P. R. Wade and D. J. Rugh (2005). "Historic and current habitat use by North Pacific right whales *Eubalaena japonica* in the Bering Sea and Gulf of Alaska." *Mammal Review* 35(2): 129-155.
- Shirayama, Y. and T. Fukushima (1997). "Responses of a Meiobenthos community to rapid resedimentation." *Proceedings, international symposium. environmental studies for deep-sea mining*: 187-196.

- Shirayama, Y., T. Fukushima, T. Matsui and E. Kuboki (2001). "The responses of deep-sea benthic organisms to experimental removal of the surface sediment." Proceedings of 4th ISOPE-ocean mining symposium.
- Shotton, R. (2005). C3. P êche en eaux profondes. In L'état des ressources halieutiques mondiales. <http://www.fao.org/docrep/009/y5852f/Y5852F10.htm#ch3.3>
- Siaosi, F., H.-W. Huang and C.-T. Chuang (2012). " Fisheries development strategy for developing Pacific Island Countries: Case study of Tuvalu." *Ocean & Coastal Management* 66: 28-35.
- Skov, H., T. Gunnlaugsson, W. Budgell, J. Horne, L. Nøttestad, E. Olsen, H. Søliland, G. Víkingsson and G. Waring (2008). "Small-scale spatial variability of sperm and sei whales in relation to oceanographic and topographic features along the Mid-Atlantic Ridge." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55(1): 254-268.
- Smith, C., Bennet, B. and Brumsicle, S. (1988). "Assessment of benthic faunal sensitivity to rapid sediment burial at DOMES Site C. " I. Final Report to NOAA/OME, Univ. Washington, Seattle, WA. 1988; 14 pp.
- Smith, D. and A. Flegal (1989). "Elemental concentrations of hydrothermal vent organisms from the Galapagos Rift." *Marine Biology* 102(1): 127-133.
- Söderqvist, T. and L. Hasselström (2008). The economic value of ecosystem services provided by the Baltic Sea and Skagerrak. Existing information and gaps of knowledge. Report 5874. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5874-6.pdf>
- Sousa, F. L., T. Thiergart, G. Landan, S. Nelson-Sathi, I. A. Pereira, J. F. Allen, N. Lane and W. F. Martin (2013). "Early bioenergetic evolution." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368(1622).
- SRK Consulting. (2011). NI 43-101 Technical Report 2011 PNG, Tonga, Fidji, Solomon Islands, New Zealand, Vanuatu and the ISA. NAT008_Nautilus_NI_43-101_Technical Report_2011_REV0.
- Statoil, site officiel de la compagnie. Activités d'exploration et de production en Norvège consulté en 2013. <http://www.statoil.com/en/OurOperations/ExplorationProd/ncs/Pages/SnohvitNewEnergyHistoryInTheNorth.aspx>
- Stoffers, P., M. Hannington, I. Wright, P. Herzig and C. De Ronde (1999). "Elemental mercury at submarine hydrothermal vents in the Bay of Plenty, Taupo volcanic zone, New Zealand." *Geology* 27(10): 931-934.
- Stone, R. (2006). "Coral habitat in the Aleutian Islands of Alaska: depth distribution, fine-scale species associations, and fisheries interactions." *Coral reefs* 25(2): 229-238.
- Sujith, P., A. Das, B. S. Mourya and P. Loka Bharathi (2011). "Immobilisation of manganese, cobalt and nickel by deep-sea-sediment microbial communities." *Chemistry and Ecology* 27(3): 189-206.
- Sumerel, J. L., W. J. Yang, D. Kisailus, J. C. Weaver, J. H. Choi and D. E. Morse (2003). "Biocatalytically templated synthesis of titanium dioxide." *Chemistry of Materials* 15(25): 4804-4809.
- Sutherland, I. (1996). "Products of primary metabolism." Reed G (Eds *Biotechnology*. Weinheim, Germany: VCH: 613-657.

Swallow, B. M., J. K. Sang, M. Nyabenge, D. K. Bundotich, A. K. Duraiappah and T. B. Yatich (2009). "Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in the Lake Victoria basin of East Africa." *Environmental science & policy* 12(4): 504-519.

TAAF. Site consulté en 2013. Article « "Caractéristiques et présentation des enjeux." » <http://www.taaf.fr/Caracteristiques>

TAAF. Site consulté en 2013., Article sur la pêche dans les îles Eparses <http://anciensite.taaf.fr/spip/spip.php?article118>

TAAF. Site consulté en 2013., Article sur la pêche dans les Subantarctiques. http://anciensite.taaf.fr/rubriques/peche/pecheSubantarctiques/pecheSubantarctiques_caracteristiques.htm

Talpalar, A. and Y. Grossman (2005). "Sonar versus whales: noise may disrupt neural activity in deep-diving cetaceans." *Undersea Hyperb. Med* 32: 135-139.

Taylor, J. E., J. Hardner and M. Stewart (2009). "Ecotourism and economic growth in the Galápagos: an island economy-wide analysis." *Environment and Development Economics* 14(02): 139-162.

Tebo, B. M., J. R. Bargar, B. G. Clement, G. J. Dick, K. J. Murray, D. Parker, R. Verity and S. M. Webb (2004). "Biogenic manganese oxides: properties and mechanisms of formation." *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 32: 287-328.

Technip, site officiel de la compagnie, consulté en 2013. Navires et installations industrielles. 2013. <http://www.technip.com/fr/activite/navires-et-installations-industrielles/navires>

Templeton, A. S., E. Knowles, D. Eldridge, B. W. Arey, A. Dohnalkova, S. M. Webb, B. Bailey, B. M. Tebo and H. Staudigel (2009). "A seafloor microbial biome hosted within incipient ferromanganese crusts." *Nature Geoscience* 2(12): 872-876.

Templeton, A. S., H. Staudigel and B. M. Tebo (2005). "Diverse Mn (II)-oxidizing bacteria isolated from submarine basalts at Loihi Seamount." *Geomicrobiology Journal* 22(3-4): 127-139.

Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), site officiel. Gestion de pêcheries durables- Ressources halieutiques – Généralités. <http://anciensite.taaf.fr/spip/spip.php?article160>

Thiel, H. (2001). "Evaluation of the environmental consequences of polymetallic nodule mining based on the results of the TUSCH Research Association." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(17): 3433-3452.

Thiel, H. (2003). "Anthropogenic impacts on the deep sea." *Ecosystems of the World*: 427-472.

Thiel, H. and G. Schriever (1989). "Cruise report DISCOL 1, SONNE-cruise 61." Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universität Hamburg.

Thiel, H. and G. Schriever (1990). "Deep-sea mining, environmental impact and the DISCOL project." *Ambio*. Stockholm 19(5): 245-250.

Thiel, H., E. Foell and G. Schriever (1991). "Potential environmental effects of deep sea mining." Report Nt 26.

Thiel, H., H. Weikert and L. Karbe (1986). "Risk assessment for mining metalliferous muds in the deep Red Sea." *Ambio* 15(1).

- Tilot, V. (1992). La structure des assemblages megabenthiques d'une province à nodules polymétalliques de l'océan Pacifique tropical Est. Thèse de doctorat. Université de Brest, France.
- Tilot, V. (2006). Biodiversité et distribution de la méga faune. Écosystème de nodules polymétalliques de l'océan Pacifique Est Équatorial. Technical Series – Commission Océanographique Intergouvernementale, Paris, UNESCO/IOC. IOC Technical Series 69: 1-62.
- Toner, B., S. Fakra, S. Manganini, C. Santelli, M. Marcus, J. Moffett, O. Rouxel, C. German and K. Edwards (2009). "Deep-sea hydrothermal iron (II) in stable association with organic carbon in plume particles." *Nature Geoscience* 2(3): 197-201.
- Trick, C. G., B. D. Bill, W. P. Cochlan, M. L. Wells, V. L. Trainer and L. D. Pickell (2010). "Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(13): 5887-5892.
- Trueblood, D. (1993). "US Cruise report for BIE II." NOAA Technical Memorandum NOS OCRM 4.
- Trueblood, D. D. and E. Ozturgut (1997). "The benthic impact experiment: A study of the ecological impacts of deep seabed mining on abyssal benthic communities." *Proceedings of the 7th ISOPE Conference*. Honolulu, Hawaii.
- Tsounis, G., S. Rossi, R. Grigg, G. Santangelo, L. Bramanti and J. M. Gili (2010). The exploitation and conservation of precious corals. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, Vol 48. R. N. Gibson, R. J. A. Atkinson and J. D. M. Gordon. Boca Raton, Crc Press-Taylor & Francis Group. 48: 161-211.
- Tsurusaki, K. (1997). "Concept and basic design of the plume discharge." *International Symposium on Environmental Studies for Deep-Sea Mining*, Tokyo (Japan).
- Uda, K., Y. Komeda, H. Koyama, K. Koga, T. Fujita, N. Iwasaki and T. Suzuki (2011). "Complete mitochondrial genomes of two Japanese precious corals, *Paracorallium japonicum* and *Corallium konojoi* (Cnidaria, Octocorallia, Coralliidae): Notable differences in gene arrangement." *Gene* 476(1-2): 27-37.
- UNEP World Conservation Monitoring Centre, Census of Marine Life on Seamounts . Data Analysis Working Group. (2006). "Seamounts, deep-sea corals and fisheries: vulnerability of deep-sea corals to fishing on seamounts beyond areas of national jurisdiction.", NEP/Earthprint.
- UNESCO. Site consulté en 2013. Liste du patrimoine mondial. <http://whc.unesco.org/fr/list/>
- Urgeles, R., M. Canals, J. Baraza, B. Alonso and D. Masson (1997). "The most recent megalandslides of the Canary Islands: El Golfo debris avalanche and Canary debris flow, west El Hierro island." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 102(B9): 20305-20323.
- Valsangkar, A. (2005). "First phase monitoring studies of simulated benthic disturbance delineating movement of fine particles in the Central Indian Basin." *Marine Georesources and Geotechnology* 23(4): 357-371.
- Van den Hove, S. and V. Moreau (2007). *Deep-sea Biodiversity and Ecosystems: A Scoping Report on Their Socio-economy, Management and Governanace*, UNEP/Earthprint.
- Van Dover, C. (2000). *The ecology of deep-sea hydrothermal vents*, Princeton University Press.

- Vanney, J.-R., M. Rio, M. Roux and H. Guérin (1992). "Morphologie sous-marine particulière liée à des circulations hydrothermales sur la ride des Loyauté (Nouvelle-Calédonie, SW Pacifique)." *Bulletin de la Société Géologique de France, Huitième Série* 163(3): 255-262.
- Ventosa, A. and J. Nieto (1995). "Biotechnological applications and potentialities of halophilic microorganisms." *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 11(1): 85-94.
- Ventosa, A., J. J. Nieto and A. Oren (1998). "Biology of moderately halophilic aerobic bacteria." *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 62(2): 504-544.
- Vetriani, C., Y. S. Chew, S. M. Miller, J. Yagi, J. Coombs, R. A. Lutz and T. Barkay (2005). "Mercury adaptation among bacteria from a deep-sea hydrothermal vent." *Applied and environmental microbiology* 71(1): 220-226.
- Vianna, G., J. Meeuwig, D. Pannell, H. Sykes and M. Meekan (2011). "The socio-economic value of the shark-diving industry in Fiji." University of Western Australia, Australian Institute of Marine Science 26. <http://marineecologyFidji.com/useful-info/Fidji-shark-sanctuary/>
- Vice-rectorat de Nouvelle-Calédonie – Direction Générale des enseignements. Page de présentation de la Nouvelle-Calédonie, section Economie, consultée en 2013. Mise à jour le 13 février 2012. <http://www.ac-noumea.nc/sitevr/spip.php?article115>
- Vuillemin, R., Le Roux D., Dorval P., Bucas K., Sudreau J. P., Hamon M., Le Gall C. and Sarradin P. M. (2009). "CHEMINI: A new in situ CHEMical MINIaturized analyzer." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 56(8): 1391-1399.
- Wagner, D., D. G. Luck and R. J. Toonen (2012). "The biology and ecology of black corals (Cnidaria: Anthozoa: Hexacorallia: Antipatharia)." *Advances in Marine Biology, Vol 63*. M. Lesser. San Diego, Elsevier Academic Press Inc. 63: 67-132.
- Wallace, D., C. Law, P. Boyd, Y. Collos, P. Croot, K. Denman, P. Lam, U. Riebesell, S. Takeda and P. Williamson (2010). "Ocean fertilization: A scientific summary for policy makers."
- Waring, G., T. Hamazaki, D. Sheehan, G. Wood and S. Baker (2001). "Characterization of beaked whale (Ziphiidae) and sperm whale (Physeter macrocephalus) summer habitat in shelf-edge and deeper waters off the northeast US." *Marine Mammal Science* 17(4): 703-717.
- Watson, A. J., P. W. Boyd, S. M. Turner, T. D. Jickells and P. S. Liss (2008). "Designing the next generation of ocean iron fertilization experiments." *Marine Ecology Progress Series* 364: 303-309.
- Watson, R. A. and T. Morato (2013). "Fishing down the deep: Accounting for within-species changes in depth of fishing." *Fisheries Research* 140: 63-65.
- Weaver, P., A. Benn, P. Arana, J. Ardron, D. Bailey, K. Baker, D. Billett, M. Clark, A. Davies and P. Durán Muñoz (2011). The impact of deep-sea fisheries and implementation of the UNGA Resolutions 61/105 and 64/72. Report of an international scientific workshop, National Oceanography Centre, Southampton, 45 pp, Southampton.
- Westall, F., A. Brack, B. Barbier, M. Bertrand and A. Chabin (2002). "Early Earth and early life: an extreme environment and extremophiles-application to the search for life on Mars." *Exo-Astrobiology* 518: 131-136.
- Whale Watching Web, université d'Helsinki (2013). Sites d'observation des cétacés dans le monde. 2013. <http://www.helsinki.fi/~lauhakan/whale/whalemap.html>

- Wheat, C., R. A. Feely and M. J. Mottl (1996). "Phosphate removal by oceanic hydrothermal processes: An update of the phosphorus budget in the oceans." *Geochimica et cosmochimica acta* 60(19): 3593-3608.
- Widder, E., B. Robison, K. Reisenbichler and S. Haddock (2005). "Using red light for in situ observations of deep-sea fishes." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52(11): 2077-2085.
- Williams, A., T. A. Schlacher, A. A. Rowden, F. Althaus, M. R. Clark, D. A. Bowden, R. Stewart, N. J. Bax, M. Consalvey and R. J. Kloser (2010). "Seamount megabenthic assemblages fail to recover from trawling impacts." *Marine Ecology* 31(s1): 183-199.
- Wilson, G. D. (1990). "Manganese Nodule Mining Impact Studies: RUM 3--R/V New Horion Cruise" Quagmire II": 23 April-17 May 1990: Post Cruise Report". University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography.
- Wiltschko, R. & Wiltschko, W. (1995). "Magnetic Orientation in Animals". Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Witherell, D. and C. Coon (2000). "Protecting gorgonian corals off Alaska from fishing impacts." *Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science*: 117-115.
- Yen, P. P., W. J. Sydeman and K. D. Hyrenbach (2004). "Marine bird and cetacean associations with bathymetric habitats and shallow-water topographies: implications for trophic transfer and conservation." *Journal of Marine Systems* 50(1): 79-99.
- Yooseph, S., G. Sutton, D. B. Rusch, A. L. Halpern, S. J. Williamson, K. Remington, J. A. Eisen, K. B. Heidelberg, G. Manning and W. Li (2007). "The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: expanding the universe of protein families." *PLoS biology* 5(3): e16.

Chapitre 6

Préservation de l'environnement et gestion des impacts

Pilote scientifique :
Pierre-Marie Sarradin

Contributeurs :
Claude Augris
Frederico Cardigos
Antoine Carlier
Coralie Coumert
Kim Juniper
Marc Le Boulluec
Harold Levrel
Lenaick Menot
Marie Morineaux
Sylvain Pioch
Benjamin Ponge
Pierre-Marie Sarradin
Laure Simplet
Julie Tourolle

Table des matières du chapitre 6

Chapitre 6. Préservation de l'environnement et gestion des impacts	762
6.1. Introduction	762
6.2. Analyse bibliographique	763
6.3. Analyse des mesures réglementaires de la préservation de l'environnement	763
6.3.1. Développement du droit maritime pour la réglementation en haute mer	763
6.3.2. Le principe de précaution	764
6.3.3. Les zones d'intérêt écologique et biologique	767
6.3.4. Natura 2000 en milieu profond	768
6.3.4.1. La légitimité du réseau Natura 2000 pour les milieux profonds et le large	768
6.3.4.2. Les habitats des milieux profonds	769
6.3.4.3. Les espèces au large	769
6.3.4.4. Les espèces d'oiseaux au large	769
6.3.4.5. L'intérêt d'une zone Natura 2000, gouvernance et gestion intégrée	769
6.3.4.6. Les limites du réseau Natura 2000	770
6.3.4.7. Les liens avec d'autres conventions	770
6.3.5. La Directive-Cadre « Stratégie Milieu Marin »	771
6.3.5.1. Quelques rappels	771
6.3.5.2. Les contraintes de l'application de la DCSMM en milieu profond	772
6.3.6. Implication de la communauté scientifique	775
6.3.6.1. Groupe de Dinard	775
6.3.6.2. Deep Ocean Stewardship initiative	775
6.3.6.3. Programme international de forages océaniques scientifiques IODP	776
6.3.7. Les codes de conduite	780
6.3.7.1. Code de conduite InterRidge	780
6.3.7.2. Ordre des Géologues du Québec	781
6.3.7.3. Code environnemental de l'International Marine Minerals Society	781
6.3.7.4. Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM)	783
6.3.7.5. Society of Economic Geologists (SEG)	783
6.3.7.6. Conclusion	783

6.3.8. La nécessité d'une gestion intégrée – l'exemple d'OSPAR en haute mer	784
6.3.9. Les aires de protection marines en milieu profond	785
6.3.9.1. Critères de désignation	786
6.3.9.2. Enjeux de gestion	786
6.3.9.3. Le champ hydrothermal Endeavour : une zone de protection marine pour la recherche scientifique	786
6.3.9.4. Exemple de la zone protégée des Açores	798
6.3.10. Forces et faiblesses du plan de gestion environnementale de la zone Clarion-Clipperton	808
6.4. Stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux - quelques exemples	810
6.4.1. Introduction	810
6.4.2. Contexte	811
6.4.2.1. Les granulats marins	811
6.4.2.2. Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé	812
6.4.2.3. La pêche profonde	813
6.4.2.4. L'offshore pétrolier profond	814
6.4.3. Réglementation	814
6.4.3.1. Introduction	814
6.4.3.2. Les granulats marins	815
6.4.3.3. Les énergies marines renouvelables : cas de l'éolien posé	816
6.4.3.4. La pêche profonde	818
6.4.3.5. L'offshore pétrolier profond	820
6.4.3.6. Synthèse des réglementations en vigueur	822
6.4.4. Evaluation et suivi des impacts environnementaux	823
6.4.4.1. Les granulats marins	823
6.4.4.2. Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé	825
6.4.4.3. La pêche profonde	830
6.4.4.4. L'offshore pétrolier profond	832
6.4.5. Difficultés de mise en œuvre	837
6.4.5.1. Les granulats marins	837
6.4.5.2. Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé	837
6.4.5.3. La pêche profonde	838
6.4.5.4. L'offshore pétrolier profond	838
6.4.6. Organismes impliqués dans les suivis environnementaux	840

6.4.6.1. Les granulats marins	840
6.4.6.2. Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé	841
6.4.6.3. La pêche profonde	841
6.4.6.4. L'offshore pétrolier profond	842
6.4.7. Conclusion	842
6.5. Stratégies de gestion des impacts	843
6.5.1. Permis français; extrait du permis sulfure en cours de signature	843
6.5.2. Cas de Jogmec dans la ZEE japonaise	848
6.5.3. Cas de Nautilus en Papouasie-Nouvelle-Guinée	850
6.6. Mesures de compensation et de restauration	859
6.6.1. Mesures compensatoires existantes en milieu marin côtier	860
6.6.2. Développement de programmes d'expérimentation et d'acquisition des connaissances	866
6.6.3. Evaluation des mesures de compensation	867
6.6.4. Application aux écosystèmes profonds	868
6.7. Conclusion / Synthèse	870
6.7.1. Contraintes et difficultés liées spécifiquement au domaine profond	870
6.7.2. Structure de la procédure d'évaluation d'impacts	871
6.7.2.1. Structure d'une procédure d'évaluation d'impact	871
6.7.2.2. Procédure d'évaluation (expertise) et d'attribution des permis et de suivi	872
Glossaire	874
Acronymes	875
Bibliographie	876

Liste des figures du chapitre 6

Figure 6-1	Grands thèmes étudiés par IODP (source : IODP).	777
Figure 6-2	Schéma simplifié de fonctionnement du programme IODP (source IODP).	778
Figure 6-3	Localisation des sites de forage (source : IODP).	779
Figure 6-4	Carte des Aires marines Protégées (source : IMPAC3).	785
Figure 6-5	La zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour (source : http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca)	787
Figure 6-6	Bathymétrie dans la ZPM du champ hydrothermal Endeavour (http://www.notmar.gc.ca)	787
Figure 6-7	Localisation du Parc Marin des Açores (source : http://www.azores.gov.pt).	799
Figure 6-8	Localisation des neuf zones témoins de préservation dans la zone de Clarion-Clipperton, A) d'après la proposition originale (Smith et al, 2008b), B) dans le plan de gestion de l'environnement recommandé par la CJT (ISBA/17LTC/7) et adopté par le Conseil de l'AIFM.	810
Figure 6-9	Impact de l'exploitation sur le milieu (méthode de « l'aspiration en marche ») © Ifremer.	823
Figure 6-10	Cadre de lecture des impacts environnementaux liés aux énergies marines renouvelables (Boehlert and Gill, 2010).	829
Figure 6-11	Construction d'un modèle écologique.	850
Figure 6-12	Zone d'exploitation et zone de réserve potentielle.	851
Figure 6-13	Procédure d'exploitation.	851
Figure 6-14	Procédure d'évaluation environnementale du projet Nautilus.	853
Figure 6-15	Hiérarchisation des mesures d'évitement, d'atténuation et de compensation (adaptation du schéma du BBOP in UICN France, 2011).	860
Figure 6-16	Sato-Umi (d'après Yanagi).	865

Liste des tableaux du chapitre 6

Tableau 6-1 Composition actuelle du comité technique consultatif (CTC) de la zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour.	788
Tableau 6-2 Résumé des mesures de gestion de la zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour.	791
Tableau 6-3 Localisation des exploitations des ressources liées aux granulats marins, aux énergies marines renouvelables (éolien posé) et à l'offshore pétrolier profond.	814
Tableau 6-4 Réglementation en vigueur pour les granulats marins, les énergies marines renouvelables, l'offshore profond et les ressources minérales marines profondes.	822
Tableau 6-5 Principales catégories d'interaction potentielle des énergies marines renouvelables avec le milieu naturel (Ministère de l'Écologie, 2012).	827
Tableau 6-6 Organismes impliqués dans les suivis environnementaux pour les granulats marins	840
(source : Ifremer Géosciences Marines)	840
Tableau 6-7 Stratégie générale des études d'environnement.	844
Tableau 6-8 Scientifiques consultés pour la réalisation des études complémentaires.	854
Tableau 6-10 Principaux types de récifs utilisés en tant que mesure compensatoire.	863
Tableau 6-11 Exemples de récifs expérimentaux disposés au large de Hallandale, North Miami, Floride (Pioch, 2010).	864
Tableau 6-12 Coûts estimés de restauration du site hydrothermal Solwara 1 (Van Dover et al, 2013).	868

Chapitre 6. Préservation de l'environnement et gestion des impacts

6.1. Introduction

Depuis quelques années, la question de la préservation de la biodiversité en haute mer fait l'objet d'une attention croissante sur la scène internationale. Ainsi, dans le cadre de la gestion de la mer profonde, un réseau d'aires marines protégées se met en place (6 aires marines protégées en eaux profondes ont été désignées en septembre 2010 par la convention OSPAR), des VME (écosystèmes marins vulnérables) et des ZIEB (zone écologiques et biologiques importantes) sont désignés. La DCSMM pose également un nouveau cadre réglementaire pour la préservation des écosystèmes marins profonds en imposant d'atteindre le bon état écologique d'ici 2020.

Dans le cadre de l'exploitation des ressources marines profondes, il est donc indispensable, afin de mettre en place des actions de correction, de commencer par comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes puis d'identifier les préjudices/impacts susceptibles d'être causés par les actions de l'homme. Cette évaluation des impacts est difficile car actuellement aucune exploitation n'est en cours.

De plus, l'acceptation de plusieurs codes de conduite tant par les scientifiques que par les industriels devrait permettre d'améliorer les outils pour prévoir, gérer et atténuer les impacts anthropiques et favoriser le développement de programmes de recherche pour identifier et quantifier les sites riches en ressources minérales marines profondes et suivre la juridiction internationale en matière de protection de ces ressources.

L'objectif de ce chapitre est de faire le bilan des méthodes de préservation et de gestion de l'environnement, procédures d'étude d'impact, à travers plusieurs exemples permettant d'éviter, réduire ou compenser les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales profondes.

Trois grandes questions seront posées :

- Que propose le cadre réglementaire aux niveaux international et national, aux échelles locale et globale ?
- Quels sont les suivis réalisés actuellement dans le cadre d'autres types d'exploitation de ressources (énergies marines renouvelables, granulats marins, offshore pétrolier profond, pêche profonde) ?
- Quelles sont les mesures environnementales mises en place actuellement sur les différents types d'exploitation de ressources marines ? Quels problèmes ont été rencontrés ?

6.2. Analyse bibliographique

La bibliographie pour le chapitre 6 est basée essentiellement sur de la littérature grise : rapports de commissions, de ministères ou de textes réglementaires (lois, conventions, recommandations).

Les références citées sont récentes (après les années 2000), avec une majorité publiée depuis 2010. Au total, 225 références ont été utilisées, dont une cinquantaine de rapports, une trentaine de textes réglementaires, 25 sites web ont été consultés et 90 articles de journal dont une quinzaine issus de Marine Policy, Nature et Science.

Sur les 225 sources référencées, seules 20 sont françaises, les autres sont internationales.

6.3. Analyse des mesures réglementaires de la préservation de l'environnement

Cette partie ne relève pas au sens strict des attendus de l'expertise scientifique collective mais son intégration au rapport paraît néanmoins intéressante du point de vue des perspectives réglementaires et de la nécessaire mise en place de méthodes de préservation de l'environnement. Ces éléments ont été rédigés par les experts mobilisés pour l'expertise, en relation avec les services compétents du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

6.3.1. Développement du droit maritime pour la réglementation en haute mer

On désigne par eaux internationales ou par haute mer, les zones maritimes qui ne sont sous l'autorité d'aucun État (par opposition aux « eaux sous juridiction d'un État côtier »).

La haute mer est généralement considérée comme un « bien public mondial » couvrant environ la moitié de la surface planétaire et 64 % des océans. Toute revendication de souveraineté par un État y est illégitime. En 1982 à Montego Bay (Jamaïque), un cadre a défini des règles et une autorité pour l'exploitation des sols et sous-sols marins (la Zone), mais pas encore pour la colonne d'eau et la pêche.

La communauté internationale et certains pays (dont la France, dans le cadre du Grenelle de la mer notamment), évoquent le besoin de développer des outils de connaissance (exploration *in situ*, suivi satellital), surveillance, contrôle pour une meilleure gouvernance de la pêche, de la biodiversité et de la sécurité en mer, ainsi que pour la protection de ressources naturelles pas, peu, difficilement ou coûteusement renouvelables, au-delà des zones de juridiction nationale.

Dans cette optique, un groupe de travail international a été créé en février 2013 à Londres et doit remettre ses recommandations aux Nations unies d'ici février 2014, avant le début des discussions à l'ONU sur la protection de la biodiversité des océans. L'objectif est de proposer à l'Assemblée générale des Nations unies une ligne de conduite et un calendrier d'adoption de mesures de contrôle de l'activité en haute mer.

6.3.2. Le principe de précaution

Les gestionnaires qui ont en charge la préservation de l'environnement ou dont l'activité peut impacter l'environnement se réfèrent ou utilisent différents outils qui s'inscrivent dans un contexte réglementaire ou qui relèvent d'un « code de conduite ». Cette gestion de l'environnement passe par une phase d'évaluation des risques qui décrit les scénarios de survenue d'un danger et de réalisation de ses effets et en estime la probabilité. Si cette évaluation est suffisante pour prendre des mesures de gestion, on se place dans un **régime de prévention**.

Il existe toutefois des situations où la zone d'incertitude de l'évaluation est considérable renvoyant à une situation d'ambiguïté, la décision ne peut pas s'appuyer sur une évaluation du risque et relève alors du **régime de précaution**.

Les principaux points qui caractérisent le principe de précaution sont : son application pour des risques incertains avec menaces de dommages graves et irréversibles, l'adoption de mesures provisoires et proportionnée, l'exigence de se fonder sur des connaissances scientifiques, la nécessité de veiller à la réversibilité des situations, et de s'inscrire dans un processus continu s'appuyant sur l'évolution des connaissances et permettant la révision des mesures prises.

Le principe de précaution n'implique pas figer une situation mais bien de s'inscrire dans une dynamique reposant sur l'évolution des connaissances et la recherche permettant de réduire les incertitudes et quand cela devient possible d'aller vers un régime de prévention lorsque l'incertitude dans l'évaluation des risques devient faible.

Le principe de précaution, qui trouve son origine en Allemagne (Vorsorgeprinzip, début des années 70) et dans des traités internationaux (Mer du Nord, années 80), a été intégré à de nombreux textes internationaux sous différentes formulations (mesures de précaution, approches de précaution) et figure dans le rapport final publié à l'issue de la deuxième conférence des Nations unies sur l'environnement à Rio en juin 1992, ratifié par la France en juin 1994.

« Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les États selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. »

Le principe de précaution a été introduit en 1992 par le Traité de l'Union européenne ou Traité de Maastricht (signé le 7 février 1992 et entré en vigueur le 1er novembre 1993) et intégré dans l'article 130R (devenu 174 avec le Traité d'Amsterdam) en précisant que la politique de la Communauté dans le domaine de l'environnement " est fondée sur les principes de précaution et d'action préventive, sur le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement et sur le principe du pollueur-payeur. "

Le terme " principe de précaution " a été utilisé pour la première fois en droit français dans la loi Barnier de 1995 dont l'article L 200-1 prévoit : *« Les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, les espèces animales et végétales, la diversité et les équilibres biologiques auxquels ils participent font partie du patrimoine commun de la nation. Leur*

protection, leur mise en valeur, leur restauration, leur remise en état et leur gestion sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Elles s'inspirent, dans le cadre des lois qui en définissent la portée, des principes suivants :

- le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte-tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ; »

En décembre 2002, le Conseil européen a adopté une résolution sur le principe de précaution dans laquelle il est indiqué que les lignes directrices d'application devront être précisées.

La Charte de l'environnement dans laquelle figure le principe de précaution a été adoptée définitivement, en mars 2005, par le Parlement réuni en Congrès à Versailles. Elle consacre le droit de chacun à "vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé" et inscrit le "principe de précaution" dans la Constitution de la cinquième République.

Le principe de précaution fait partie des fondamentaux de gestion de nombreuses organisations internationales œuvrant sur le milieu, au même titre que d'autres tels que celui de pollueur-payeur ou encore de meilleure technique disponible.

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) intègre le principe de précaution dans son code d'exploitation minière (AIFM, 1999 ; 2010b) imposant aux états d'appliquer une approche de précaution pour les activités pouvant avoir des impacts sur l'environnement. Des recommandations pour l'évaluation des impacts environnementaux (AIFM, 2010a) peuvent aider, entre autres, à la prise en compte du principe de précaution.

Ce principe est également intégré dans certaines mesures de gestion environnementale plus précises. Cela est illustré par exemple par le plan de gestion environnementale de la zone de Clarion-Clipperton, où se situe la grande majorité des permis d'exploration délivrés à l'heure actuelle par l'AIFM (environ 10 sur 15). Ce plan de gestion (toujours à l'état de proposition) comprend entre autres :

- La définition de zones d'intérêt environnemental particulier assorties de zones tampons, où l'exploitation est interdite. Leur définition a cependant été faite après la délimitation des permis d'exploration ce qui limite leur possibilité de localisation et donc leur pertinence.
- La nécessité de mettre en place des évaluations d'impact environnemental préalables à l'activité.
- L'amélioration des connaissances conjointement à la phase d'exploration (puis d'exploitation).

La Convention de la Commission des pêches de l'Atlantique nord-est (CPANE) (CPANE, 2007) ainsi que la Convention OSPAR (OSPAR, 1992) pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique nord-est intègrent cette notion de précaution en tant respectivement qu'approche et principe. Quelques mesures prises par la CPANE concernant la pêche profonde et la préservation d'Ecosystèmes Marins Vulnérables (EMV) tels que les coraux ou les agrégations d'éponges, permettent d'illustrer de manière plus concrète ce principe. La CPANE limite par exemple la pêche profonde aux zones existantes. L'ouverture d'une nouvelle zone ne peut se faire sans avoir prouvé qu'elle ne contient pas d'EMV. Autre

mesure, lorsqu'un EMV est rencontré dans une zone de pêche, le navire doit le signaler pour permettre une fermeture temporaire dans un périmètre centré sur le lieu de la rencontre avec un rayon de sécurité.

La notion d'EMV a été mise en place par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), initialement afin de prévenir l'impact des activités de pêche profonde en haute mer, notamment sur les écosystèmes fragiles ayant de faibles capacités de récupération. Cependant les activités de pêche n'ont pas l'apanage de l'utilisation du concept d'EMV, qui peut donc être également mis à profit pour l'extraction des ressources minérales profondes qui peuvent impacter ces mêmes écosystèmes. Les critères suivants, pour l'identification d'EMV, sont définis au sein des lignes directrices internationales pour la pêche profonde²² :

- Caractère unique ou rareté;
- Importance fonctionnelle de l'habitat ;
- Fragilité ;
- Caractéristiques du cycle biologique des espèces qui le composent et qui en rendent difficile la récupération ;
- Complexité structurelle.

L'identification des EMV a été réalisée par plusieurs organisations régionales de gestion des pêches (ORGP) telles que la CPANE précitée qui focalise ses efforts sur les coraux profonds et les agrégations d'éponges, les travaux d'identification d'EMV ayant été faits en étroite collaboration avec son homologue pour l'Atlantique nord-ouest (OPAN). La Commission pour la conservation de la faune et la flore marine de l'Antarctique (CCAMLR) a également effectué un travail d'identification des EMV. Une base de données mondiale (financée par la France) pour le recensement de ces EMV est en cours d'élaboration.

Des similarités sont patentées entre la notion d'EMV et celle de Zone d'Importance Ecologique ou Biologique (ZIEB) (cf. paragraphe 6.3.3). Ces deux inventaires ou registres, sont issus de deux objectifs initiaux distincts et n'ont pas vocation à fusionner, mais pourront à l'avenir s'alimenter mutuellement.

La notion d'EMV est reprise par l'Assemblée générale des Nations unies (AGNU) dans différentes résolutions :

- la résolution 58/14 (2003) (UNGA, 2003) pour une pêche durable (paragraphe 46) invite les organisations compétentes à évaluer l'impact des activités de pêche sur les EMV ;
- la résolution 58/240 (2003) (UNGA, 2004), pour la partie Océans et droit de la mer, stipule (paragraphe 56) que les états doivent s'efforcer de protéger les EMV, par exemple en établissant des réseaux d'Aires marines protégées.

Dans la continuité de ces résolutions, l'AGNU, de manière plus récente, transpose également dans ses résolutions le principe de précaution. Par exemple dans la résolution 64/72 (2009) (UNGA, 2010) pour une pêche durable (paragraphe 119), cette résolution impose de précéder toute nouvelle activité de pêche en haute mer (nouvelle zone ou nouvel engin) d'une étude préalable d'impact environnemental.

²² [FAO – 2009 - Directives internationales sur la gestion de la pêche profonde en haute mer.](#)

D'autres organisations telles que l'Organisation maritime internationale (OMI) n'appliquent pas ce principe, mais celui de pollueur-payeur puisque les mesures interviennent après des événements majeurs (comme ce fut le cas après les marées noires de l'Amoco Cadiz ou du Prestige) et il apparaît regrettable qu'elles n'empêchent pas certaines catastrophes et qu'elles soient mises en place une fois que le dommage a eu lieu. Cependant une vision plus pragmatique consiste à dire que ce type de gestion a le mérite de s'attaquer à des problèmes réels et l'expérience montre que les mesures ont alors des résultats tangibles.

6.3.3. Les zones d'intérêt écologique et biologique

La Convention sur la diversité biologique (CDB) a officialisé en 2010 la création d'un registre pour recenser les Zones (ou Aires) marines d'intérêt écologique ou biologique (ZIEB ou AIEB) (UNEP, 2010), plus connu sous l'acronyme anglais *EBSAs*. Cette initiative a vu le jour initialement pour répondre en haute mer, aux lacunes à la fois en termes de protection, mais également de connaissance. Ces zones n'ont pas de portée réglementaire en terme de protection, en revanche à l'instar des Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) en France, elles peuvent servir de point de départ à la mise en œuvre d'outils de protection comme les Aires marines protégées, mais aussi les études d'impact environnemental.

Pour être éligible en tant qu'*EBSA*, une zone doit répondre à un ou plusieurs critères parmi les suivants (UNEP, 2008) :

- Caractère unique ou rareté ;
- Importance particulière pour les stades du cycle de vie des espèces ;
- Importance pour les espèces et/ou les habitats menacés, en danger ou en déclin ;
- Vulnérabilité, fragilité, sensibilité ou récupération lente ;
- Productivité biologique ;
- Diversité biologique ;
- Caractère naturel.

Les propositions d'*EBSAs* sont possibles depuis février 2012, cependant aucune zone n'a intégré le registre pour l'instant. En effet, comme recommandé par la CDB en 2010 le choix de zones s'est opéré par ateliers régionaux, généralement sous la conduite des Conventions de mer régionales (CMR) compétentes. Cette régionalisation a conduit à des différences d'interprétation, tant en termes de taille (diamètre de la dizaine au millier de kilomètres) que de localisation des zones (certaines étant situées au sein des juridictions régionales, d'autres au-delà).

L'organe scientifique de la CDB (Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques), a été sollicité en 2012, en amont de la onzième Conférence des parties (CDP) pour valider cette large gamme de propositions, ce qui a conduit à quelques clarifications sur le processus (UNEP, 2012a). Toutes les zones restent donc à l'état de propositions qui seront affinées et le registre devrait donc s'étoffer officiellement lors de la prochaine CDP en 2014.

Dans le contexte d'exploitation des ressources minérales marines profondes, ce type d'outil peut également être une aide pour la localisation des zones d'exploitation pour lesquelles il vaut mieux éviter les zones à enjeux écologiques importants. De nombreuses zones en milieu profond ont déjà été identifiées, tant dans l'océan Atlantique que dans l'océan Pacifique, la

Mer Méditerranée ou l'Océan indien (cf. rapports des ateliers Atlantique nord-est (UNEP, 2012b), Caraïbes (UNEP, 2012d), Pacifique sud-ouest (UNEP, 2012c) et Méditerranée (UNEP, 2012e)). Un manuel a d'ailleurs été élaboré pour l'identification d'*EBSAs* au large et pour les habitats profonds (UNEP, 2012f).

Il faut par contre garder à l'esprit que ce type d'inventaire est toujours inachevé et donc le choix d'une zone d'exploitation en dehors de ce type de zone, n'est pas synonyme d'absence d'enjeu écologique et ne permet pas de s'affranchir de précautions et d'études d'impact préalables à l'activité. D'autant plus que ces zones sont généralement peu ou mal connues, un objectif corollaire des *EBSAs* étant en effet d'améliorer la connaissance scientifique, notamment sur les zones peu documentées telles que les milieux profonds et éloignés des côtes.

Au niveau des eaux sous juridiction française, que ce soit par la désignation d'*EBSAs* ou par la poursuite du travail d'identification de ZNIEFF en mer, l'identification de zones d'importance écologique sur des milieux profonds pourrait permettre de faciliter la localisation des enjeux écologiques importants pouvant être impactés par l'exploitation des ressources minérales profondes.

6.3.4. Natura 2000 en milieu profond

6.3.4.1. La légitimité du réseau Natura 2000 pour les milieux profonds et le large

Le réseau Natura 2000, qui englobe les deux directives oiseaux (DO) et habitats, faune, flore (DHFF), a pour objectif de protéger les habitats et espèces listées en annexe de ces directives. En particulier celles vivant en milieu profond et au large (par opposition aux zones côtières). Si les ressources minérales profondes évoquent plus facilement les habitats profonds dans un premier temps, l'extraction de telles ressources peut impacter la colonne d'eau (panache de sédiments, cf. paragraphe 5.1.2.2 du chapitre 5) et donc les espèces pélagiques mais aussi indirectement l'avifaune qui se nourrit de ces espèces.

En vertu de ces directives, la France a pour obligation de désigner des zones Natura 2000 afin de protéger ces habitats et espèces au même titre que les habitats ou espèces plus côtiers. En 2009 pour l'Atlantique, puis en 2010 pour la Méditerranée, la Commission européenne a d'ailleurs émis un avis jugeant le réseau actuel insuffisant pour la protection au large de l'habitat « récifs » et d'espèces telles que : le grand dauphin, le marsouin commun et certains poissons amphihalins.

La France a donc entrepris un programme pour aboutir à la désignation de sites Natura 2000 au large à l'échéance 2015. Ceci comprend l'acquisition de connaissances qui ont été réalisées lors de campagne profondes (MEDSEACAN, CORSEACAN, CORALFISH) et de suivis aériens (PACOMM). Sur la base de ces nouvelles informations, de grands secteurs géographiques vont être déterminés par les organismes nationaux compétents puis soumis à la concertation à l'échelle des façades maritimes pour la définition des périmètres des futurs sites. Sans être exhaustif, on trouvera ci-dessous certains exemples pouvant motiver la désignation de sites Natura 2000 au large ou en milieu profond.

6.3.4.2. *Les habitats des milieux profonds*

La France doit étendre son réseau Natura 2000 pour une meilleure prise en compte de l'habitat « Récifs » (1170). Sans qu'il existe de définition à un niveau plus précis de cet habitat, des éléments tels que les coraux d'eaux froides (*Lophelia pertusa* ou *Madrepora oculata*) dont la présence est avérée, notamment suite aux campagnes précitées, rentrent dans cette catégorie.

L'habitat « Structures sous-marines causées par des émissions de gaz » (1180) est également considéré présent sur la façade atlantique des eaux métropolitaines françaises et pourrait justifier la désignation de zones Natura 2000.

6.3.4.3. *Les espèces au large*

Au titre de la DHFF également la France prévoit de désigner de nouvelles zones pour une meilleure prise en compte du grand dauphin et du marsouin commun qui sont explicitement citées en annexe 2 de la directive, mais d'autres espèces de mammifères, tortues ou poissons pourraient également faire l'objet de telles désignations. Par ailleurs l'annexe 4 liste les espèces qui doivent faire l'objet d'une protection stricte et élargit donc le champ d'action de cette directive sans que la nécessité de mettre en place une aire marine protégée soit stipulée.

6.3.4.4. *Les espèces d'oiseaux au large*

La Directive oiseaux requiert également la protection à travers des aires marines protégées Natura 2000 d'une liste d'espèces dont certaines sont susceptibles de se trouver au large, comme le puffin cendré, le puffin yelkouan, le puffin des Baléares, les pétrels ou océanite tempête et cul blanc. Pour tout ou partie de ces espèces, la France envisage donc de désigner des zones de protection au titre de la DO (ZPS).

6.3.4.5. *L'intérêt d'une zone Natura 2000, gouvernance et gestion intégrée*

Sans que cela ait été réellement mis en place dans des zones « profondes » ou « du large », la transposition en droit français de ces directives impose un mode de gouvernance intégré pour ces zones protégées, à travers notamment la mise en place d'un Comité de pilotage, associant les différents acteurs prioritairement concernés par la zone. Même si le panel d'acteurs impliqués dans de telles zones serait relativement différent de celui rencontré dans des zones plus côtières, ce type de gouvernance permet de confronter les différents usages et donc une meilleure intégration.

En particulier, cette gouvernance doit faciliter la mise en œuvre des évaluations des incidences, obligatoires dès lors qu'a lieu sur le site Natura 2000 concerné : *un programme ou un projet d'activités, de travaux, d'aménagement, d'ouvrage ou d'installation ou une manifestation ou une intervention* (Articles L. 414²³-4 à 7 du code de l'environnement). Cela permet de s'assurer que l'activité concernée, comme l'extraction de ressources minérales par

²³ [Code de l'environnement, Partie législative, livre IV, titre premier, chapitre IV, section 1 : sites Natura 2000.](#)

exemple, se déroule sans impact majeur sur les habitats ou espèces d'intérêt communautaire, présents dans le périmètre du site.

6.3.4.6. *Les limites du réseau Natura 2000*

La première limite est géographique. A l'heure actuelle, le droit ne permet pas l'établissement de zones Natura 2000 en outre-mer. Une grande partie (97%) des eaux françaises est donc délaissée par cet instrument, en particulier dans le contexte des ressources minérales profondes.

Tel que le définit la stratégie nationale pour les aires marines protégées en France²⁴, la seule finalité des sites Natura 2000 est : « le bon état des espèces et habitats à statut patrimoniaux ou méritant de l'être ». Si un site Natura 2000 peut contribuer indirectement à d'autres objectifs, il ne poursuit pas directement les autres finalités qui sont :

- Le bon état des espèces et habitats hors statut, cibles de la gestion de l'AMP (espèces halieutiques exploitées, espèces très abondantes localement donnant une responsabilité biogéographique au site d'accueil..) ;
- Le rendu de fonctions écologiques clefs (frayères, nourriceries, nurseries, productivité, repos, alimentation, migration..) ;
- Le bon état des eaux marines ;
- L'exploitation durable des ressources ;
- Le développement durable des usages ;
- Le maintien du patrimoine maritime culturel ;
- La valeur ajoutée sociale, économique, scientifique ou éducative.

6.3.4.7. *Les liens avec d'autres conventions*

Plusieurs de ces habitats et espèces sont protégés par d'autres Conventions internationales dont la France est signataire. Par exemple la Convention OSPAR recense sur sa liste d'habitats et espèces menacés et/ou en déclin : les récifs de *Lophelia pertusa*, le marsouin commun, le puffin des Baléares.

La protection des habitats et espèces d'intérêt communautaire au large ou en milieu profond, permet donc à la France de tenir ses obligations vis-à-vis de la Commission européenne, mais aussi de respecter ses engagements au titre des Conventions internationales (comme la Convention de Barcelone).

²⁴ [Stratégie nationale pour la création et la gestion des aires marines protégées, 2012](#)

6.3.5. La Directive-Cadre « Stratégie Milieu Marin »

6.3.5.1. *Quelques rappels*

Comme déjà abordé dans le chapitre 2.3.3.1 de la présente expertise, la directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » (2008/CE/56, DCSMM) impose à chaque État membre d'élaborer une stratégie pour le milieu marin applicable à ses eaux marines (métropolitaines pour la France) en vue de l'atteinte ou du maintien du Bon État Écologique.

Cette directive environnementale développe une approche écosystémique du milieu marin, en lien avec les directives habitats-faune-flore et oiseaux (dont le réseau Natura 2000) et la directive-cadre sur l'eau : elle vise à maintenir ou rétablir un bon fonctionnement des écosystèmes marins (diversité biologique conservée et interactions correctes entre les espèces et leurs habitats, océans dynamiques et productifs) tout en permettant l'exercice des activités humaines en mer dans une perspective de développement durable.

Parmi les outils permettant d'atteindre ou de préserver le bon état écologique des eaux marines, le Plan d'action pour le milieu marin (PAMM) peut contenir des mesures de protection contribuant à créer un réseau de zones marines protégées cohérent et représentatif de la diversité des écosystèmes.

Au niveau français, le PAMM (article L219-9 du code de l'environnement) a été élaboré à l'échelle de chacune des quatre sous-régions marines suivantes : Manche-mer du Nord, golfe de Gascogne, mers celtiques et Méditerranée occidentale.

Le premier élément de ce plan d'action consiste en l'évaluation initiale (EI) des eaux marines (sol et sous-sol compris) et a été adopté et adressée à la Commission européenne en décembre 2012. Cette évaluation initiale, conformément à l'article 8 et l'annexe III de la DCSMM, est composée de trois analyses (analyse des caractéristiques et de l'état écologique, analyse des pressions et impacts et analyse économique et sociale de l'utilisation des eaux et du coût de la dégradation) et constitue le fondement des plans d'action pour le milieu marin.

Un second élément du PAMM consiste en la définition du Bon État Écologique (BEE), en s'appuyant sur les connaissances existantes et disponibles recensées lors de la réalisation de l'évaluation initiale. Le BEE, défini par les articles 3.5 et 9 de la DCSMM, est décliné dans l'annexe I en 11 Descripteurs qualitatifs. Les intitulés de ces 11 Descripteurs constituent déjà une définition du BEE. Cependant, pour la rendre plus opérationnelle, et assurer la cohérence des approches entre États-membres, la Décision 2010/477/UE décline et explicite, d'une manière plus ou moins opérationnelle, chaque Descripteur en « Critères » et « Indicateurs », aux niveaux desquels peut également être défini le BEE. Sur cette base, chaque État Membre définit les BEE pour les eaux sous sa juridiction. En France, cette définition a été réalisée au niveau national (arrêté du 17 décembre 2012 relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines) et définit, dans la mesure du possible, des unités et échelles d'évaluation, des indicateurs associés à chaque critère défini dans la décision citée précédemment, des modalités de renseignement des indicateurs (notamment des paramètres), des niveaux ou tendances permettant pour chaque indicateur et unité d'évaluation de caractériser le bon état écologique et des règles d'agrégation des indicateurs.

Sur la base de l'évaluation initiale (EI, Article 8), et des écarts constatés par rapport à la définition du BEE (Article 9), les Etats Membres doivent définir des objectifs environnementaux (OE, Article 10). Ces objectifs doivent permettre d'élaborer un programme de mesures (Article 13) destiné à agir sur les pressions, en vue d'atteindre ou maintenir le BEE. Le suivi de l'état écologique (et donc de l'effet de ces mesures) doit être réalisé par un programme de surveillance (Article 11), dont les données doivent notamment permettre de renseigner les indicateurs du BEE et associés aux objectifs environnementaux. Ces indicateurs peuvent être de trois types :

- d'état (reflétant l'état d'une composante de l'écosystème),
- de pression (reflétant l'intensité, l'étendue et/ou la fréquence d'une pression),
- d'impact (reflétant les changements induits par une ou plusieurs pressions sur l'état d'une composante de l'écosystème).

6.3.5.2. Les contraintes de l'application de la DCSMM en milieu profond

Les chapitres du Plan d'action pour le milieu marin (PAMM) relatifs à l'évaluation initiale des biocénoses et des habitats particuliers du bathyal et de l'abyssal, mettent en évidence que les données et connaissances actuellement disponibles sont trop éparses dans le temps et dans l'espace pour permettre d'évaluer l'état de conservation et les tendances d'évolution de ces habitats.

Les lacunes de connaissances sont encore plus particulièrement prononcées dans le sud du golfe de Gascogne et quelles que soient les sous-régions marines, dans la partie basse de l'étage bathyal, approximativement entre -1000 et -2700 m, et dans l'étage abyssal. Pour cet étage et pour les substrats meubles profonds en général, les données sur les communautés sont ponctuelles, partielles et souvent anciennes.

L'évaluation initiale, souligne également que la diversité biologique des sédiments profonds est très importante et qu'une majorité des espèces animales qui y sont récoltées ne sont pas décrites.

Les chapitres du PAMM relatifs aux objectifs environnementaux quant à eux, définissent, entre autres, des objectifs de maintien ou d'atteinte du bon état de conservation des habitats et de protection des habitats rares ou menacés. Par exemple, en Méditerranée occidentale, un objectif général est défini pour « maintenir un bon état de conservation des habitats profonds des canyons sous-marins » et se décline en deux objectifs particuliers visant d'une part à limiter les dégradations par abrasion par les activités humaines, comme la pêche et les câbles sous-marins et d'autre part à limiter les risques d'étouffement par les dépôts ou remises en suspension liés aux activités humaines.

Ainsi, les travaux menés dans le cadre de la DCSMM ont défini les besoins pour la connaissance et la surveillance des habitats benthiques des étages bathyal et abyssal.

Un document de travail (Quemmerais-Amice F., 2013.) sur la définition du programme de surveillance et du plan d'acquisition de connaissances a été livré en mars 2013. Des propositions scientifiques et techniques y ont été faites. Le dispositif de suivi proposé dans ce rapport tente d'intégrer les besoins définis dans le PAMM dans une approche opérationnelle, spécifique aux milieux marins profonds, capable de fournir à moyen terme les premiers éléments d'évaluation des habitats. L'intégration nécessaire des besoins de connaissances s'opère notamment par un échelonnement de la résolution spatiale et temporelle des suivis. Il

faut néanmoins bien prendre en compte que ces propositions ne sont, à ce jour, que des réflexions en cours, et n'ont pas été validées.

Le programme de surveillance proposé s'articule autour de deux objets de la surveillance complémentaires en termes d'objectifs des suivis et des paramètres, des outils mis en œuvre sur le terrain et des échelles étudiées.

Le premier objet de surveillance « Habitats Benthiques Profonds » (HBP1) propose de développer **une approche régionale par transects** permettant surtout de répondre aux questions de distribution et d'étendue des habitats (critères 1.4 et 1.5 du Thème 1, voire 6.1 et 4.3 pour les habitats définis par des espèces structurantes, comme les coraux). Les méthodes principales recommandées font appel aux outils acoustiques, vidéo et photographiques et aux outils de prélèvements *in situ*.

Trois scénarii sont proposés :

- Scénario 1 (haute résolution) : couverture acoustique complète, 2 transects effectués dans tous les canyons entre -2700 et -200 m.
- Scénario 2 (résolution moyenne) : couverture acoustique complète dans la partie haute de l'étage bathyal (entre -200 et -1000 m), 2 transects effectués sur environ la moitié des canyons de chaque zone entre -2700 et -200 m.
- Scénario 3 (basse résolution) : couverture acoustique discontinue sur une ou des sous zones de travail, à choisir en fonction des enjeux et des pressions, 2 transects effectués sur au moins un canyon à l'intérieur de ces sous zones, entre -2700 et -200 m.

Les conditions de mise en application de ces scénarii ont été évaluées, notamment à travers leur coût.

Les coûts estimés pour cette approche régionale par transects seraient, pour un premier cycle de 6 ans, de l'ordre de 8000 k€/an (estimation basse) à 14000 k€/ an (estimation haute) pour une couverture Haute Résolution ou de l'ordre de 2000 k€/an (estimation basse) à 4000 k€/ an (estimation haute) pour une couverture Basse Résolution.

Les coûts de coordination, de préparation des campagnes, de traitements des échantillons et des données, d'analyses et de valorisation, de bancarisation ne sont pas estimés ici mais représentent également une enveloppe budgétaire très importante.

Les informations proposées ici ne concernent que les missions à la mer, c'est-à-dire l'acquisition d'échantillons et de données et correspondent à des estimations et des ordres de grandeurs. L'estimation du temps nécessaire aux opérations est basée sur les différents scénarii proposés, le calcul des surfaces approximatives à couvrir par zone, le nombre de transects à réaliser par zone. Ces estimations sont très grossières et permettent simplement de dégager un ordre de grandeur budgétaire pour le dispositif n°1.

Le deuxième objet de surveillance des « Habitats Benthiques Profonds » proposé (HBP2), quant à lui, propose de développer **une approche stationnelle** permettant surtout de répondre aux questions d'état des habitats (critère 1.6 du Thème 1, liés à d'autres critères selon les pressions considérées ; 6.2, 8.2, 10.2). Les méthodes principales recommandées font appel essentiellement aux outils de prélèvement et de mesure *in situ*.

Sur la base des fréquences temporelles recommandées précédemment, trois scénarii sont également proposés :

- Scénario 1 (haute résolution) : 2 stations par canyons, sur la moitié des canyons pour chaque zone de travail suivi par l'approche régionale, 3 stations par zone pour toutes les autres zones.
- Scénario 2 (résolution moyenne) : 4 stations par zone de travail pour les zones suivies par l'approche régionale, 3 stations pour toutes les autres zones.
- Scénario 3 (basse résolution) : 3 stations par zone de travail.

Les coûts estimés pour cette approche stationnelle seraient, pour un premier cycle de 3 ans, de l'ordre de 3800 k€/an (estimation basse) à 5800 k€/ an (estimation haute) pour une couverture Haute Résolution ou de l'ordre de 1800 k€/an (estimation basse) à 2700 k€/ an (estimation haute) pour une couverture Basse Résolution.

Comme pour l'estimation précédente, les coûts estimés ici ne concernent que les missions à la mer.

Pour les deux dispositifs évoqués, les propositions de fréquence temporelle, de densité spatiale et de scénarii de surveillance, haute, moyenne et basse résolution, permettent, même si elles doivent être affinées et contextualisées, **d'illustrer et de dégager les grandes contraintes scientifiques, opérationnelles et financières qui vont conditionner le dimensionnement du programme de surveillance.**

Quinze zones de travail, 8 en Atlantique et 7 en Méditerranée, ont été définies et devraient permettre de quantifier, d'organiser et de hiérarchiser le programme de surveillance. Il faut noter que ces zones de travail sont particulièrement vastes, profondes et difficiles d'accès, et sauf exceptions en Méditerranée, assez éloignées des côtes. De ce fait, les moyens à la mer à mettre en œuvre sont spécifiques et nécessitent l'utilisation des navires hauturiers de l'Unité Mixte de Service Flotte Océanographique Française et d'outils d'investigation adaptés aux grandes profondeurs et aux topographies escarpées.

Il est également à noter que certains de ces outils d'investigations ont été développés ou sont en cours de développement à des fins de recherche scientifique, ils ne seront pas immédiatement opérationnels dans le cadre d'un programme de surveillance.

Outre les moyens à la mer, les moyens humains à mettre en œuvre sont potentiellement considérables, tout particulièrement pour l'approche stationnelle (HBP2). Enfin certaines compétences requises pour la mise en œuvre d'une stratégie de surveillance des habitats benthiques profonds, telle que la taxonomie, sont déficitaires en France.

L'ensemble de ces considérations fait émerger un certain nombre de contraintes qu'il sera nécessaire d'anticiper rapidement afin de **définir des stratégies réalistes et opérationnelles, acceptables scientifiquement et applicables financièrement.** Il s'agit notamment de l'utilisation de la flotte océanographique française, des outils d'investigations, des emplois et de la formation des personnels, des choix et du dimensionnement des bases de données, de l'accès aux données précises décrivant les activités humaines et les pressions.

6.3.6. Implication de la communauté scientifique

L'AIFM met en place des ateliers scientifiques associant les experts de sa Commission juridique et technique à des experts venus des milieux académiques.

« *La Commission juridique et technique peut formuler de temps à autres des recommandations d'ordre technique ou administratif à l'intention des contractants pour les aider à appliquer les règles, règlements et procédures arrêtés par l'Autorité. Par ailleurs, en vertu du paragraphe 2 e) de l'article 165 de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de 1982, la Commission fait au Conseil des recommandations sur la protection du milieu marin, en tenant compte de l'opinion d'experts reconnus.* » (ISA/19/LTC/8 – I. Introduction).

Des regroupements de scientifiques existent. Le groupe de Dinard ou la Deep Ocean Stewardship Initiative (DOSI) en sont deux exemples.

6.3.6.1. *Groupe de Dinard*

Trente et un experts de quatorze pays, travaillant sur la gouvernance des océans dans le secteur de l'industrie et dans le domaine de la recherche scientifique, se sont réunis en 2010 à Dinard au Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes Côtiers (CRESCO).

Leur objectif était de mettre en place des guides généraux destinés à la conservation des sources hydrothermales et des suintements froids à des échelles régionales et globales.

Leurs travaux ont débouché sur l'édition de la 9^{ème} étude technique publiée par l'ISA (Environmental Management of Deep-Sea Chemosynthetic Ecosystems : Justification of and Considerations for a Spatially-Based Approach. ISA Technical Study: N°9. (www.isa.org.jm/fr/documents/publications)).

Ce rapport technique rappelle, pour les écosystèmes des sources hydrothermales et des suintements froids les principales caractéristiques de ces environnements, les principaux impacts liés aux activités humaines et les principales méthodes de gestion de ces écosystèmes incluant les programmes de conservation.

6.3.6.2. *Deep Ocean Stewardship initiative*

Le DOSI (Deep Ocean Stewardship initiative) est un groupe international et interdisciplinaire regroupant les sciences dures et les sciences sociales ainsi que des représentants de la société civile et de l'industrie. La première réunion s'est tenue à Mexico en avril 2013. Le DOSI a pour objectif de joindre à l'AIFM des experts multidisciplinaires et de secteurs différents et de proposer des plans de gestion régionaux concernant les différents écosystèmes.

6.3.6.3. *Programme international de forages océaniques scientifiques IODP*

Le programme international de forages océaniques scientifiques IODP (Integrated Ocean Drilling Program) est un programme de recherche international réalisant des forages océaniques afin de permettre aux scientifiques d'étudier l'histoire et la structure de la Terre enregistrées dans les roches et les sédiments du plancher océanique avec des échantillonnages et de la surveillance à long terme.

Ce programme a été initié en 2003. Il fait suite aux programmes DSDP (Deep Sea Drilling Project), réalisé entre 1968 et 1983 et ODP (Ocean Drilling Program), réalisé entre 1985 et 2003.

Les objectifs scientifiques de l'IODP sont définis par un document de prospective, dit "Initial Science Plan" (ISP), intitulé "Earth, Oceans and Life". Ce document, fruit du travail collectif d'un comité scientifique international, regroupe les objectifs et enjeux d'IODP en trois grands thèmes :

- **L'eau et la vie en subsurface océanique.**

Ce thème, qui traite notamment de l'ensemble des phénomènes, biologiques ou géologiques, associés à la circulation de l'eau de mer dans le plancher océanique, comprend l'étude des hydrates de gaz et de la biosphère enfouie dans les roches et les sédiments.

- **Les changements environnementaux.**

L'étude des processus et des effets de l'évolution du climat passé est un enjeu fondamental pour comprendre le climat du futur. IODP joue un rôle majeur dans cet effort important de recherche internationale.

- **La géodynamique et les cycles de la terre solide.**

Ce thème comprend l'étude de l'accrétion, de la structure et de l'évolution de la lithosphère océanique, du fonctionnement des zones sismogéniques, ainsi que de la dynamique du manteau terrestre.

Les objectifs scientifiques plus particulièrement liés aux plateformes spécifiques sont recensés dans un document collectif sur internet, intitulé "Science Plan for Mission Specific Platforms", produit à la suite de la réunion "APLACON", à Lisbonne, en mai 2001.

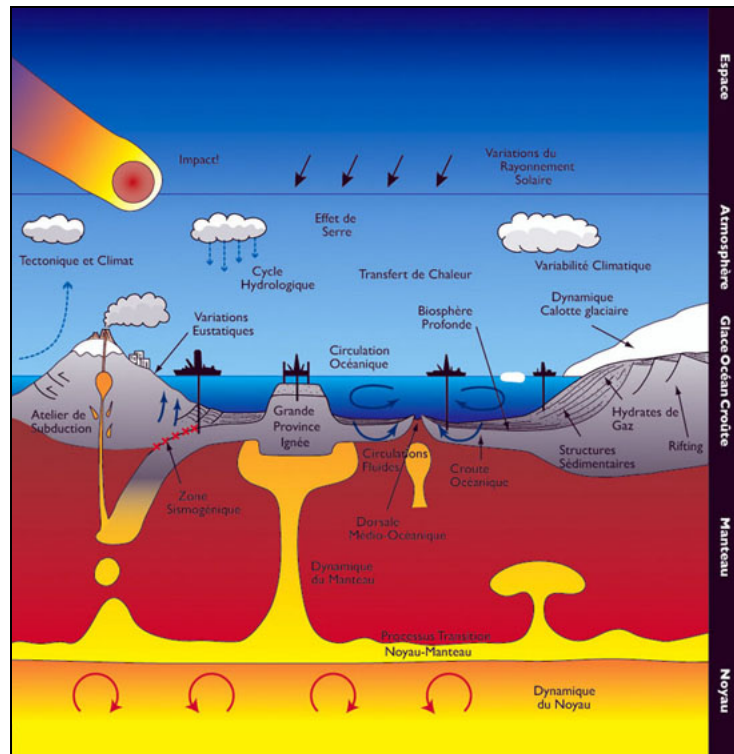


Figure 6-1 Grands thèmes étudiés par IODP (source : IODP).

Ce programme est composé de 6 partenaires internationaux :

- la NSF (U.S. National Science Foundation) et le ministère japonais de l'éducation, de la culture et du sport MEXT), qui sont les "agences leaders",
- le consortium européen ECORD, via "ECORD Management Agency" (EMA), qui est un "membre contributeur",
- le ministère des Sciences Technologies de la République Populaire de Chine (MOST), qui est un "membre associé",
- l'institut coréen des géosciences et ressources minérales (KIGAM), qui est un "membre associé",
- un consortium Australie-Nouvelle Zélande,
- le Ministère Indien des Sciences de la Terre.

Le "Ocean Drilling Program Office" de la NSF (au sein de la direction des Géosciences) est responsable de l'administration des fonds communs, redirigés vers les opérations scientifiques (SOCs, "Science Operating Costs") d'IODP. Ces fonds communs sont prélevés sur les participations financières des partenaires internationaux. Les coûts d'opération des navires (POCs, "Platform Operation Costs") sont supportés par les agences qui mettent ces navires à la disposition du programme.

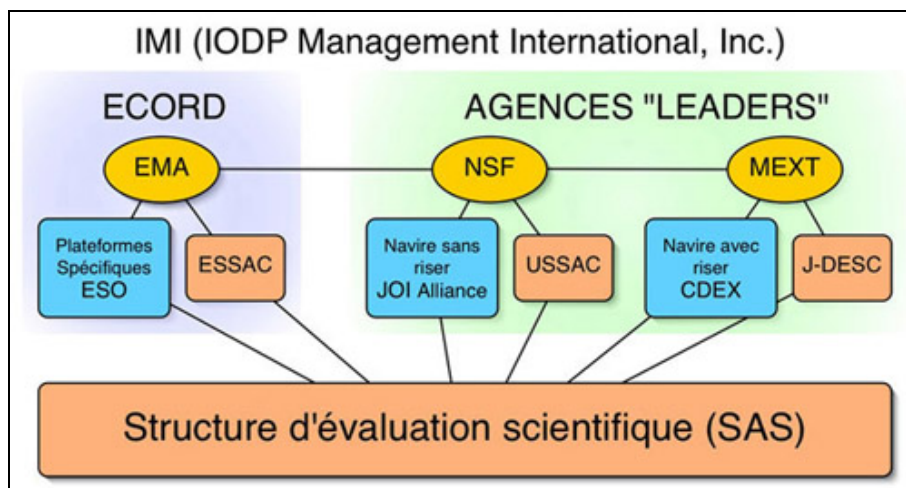


Figure 6-2 Schéma simplifié de fonctionnement du programme IODP (source IODP).

Le programme IODP a notamment institué 4 grands principes environnementaux de manière à limiter les effets des activités sur l'environnement (source : IODP Environmental Principles, 2005²⁵)

Protection de la vie marine et de l'environnement

- IODP minimisera les rejets de substances dans le milieu marin qui pourrait nuire aux organismes marins.
- Lors des opérations, les données sismiques IODP seront recueillies selon les dernières directives pour les opérations sismiques afin de minimiser l'impact sur les mammifères marins.
- Les opérateurs devront obtenir tous les permis nécessaires.
- Un examen des dangers pour l'environnement sera mené par IODP (centre de prévention des pollutions et de sécurité) et par les opérateurs sous contrat pour toutes les opérations de forage afin de déterminer le niveau de risque associé.
- IODP agira pour minimiser tous les risques environnementaux identifiés grâce à des mesures de contrôle appropriées.

Élimination des déchets et restitution de l'environnement

- Lors des opérations dans des juridictions nationales, IODP suivra les exigences du pays d'accueil pour le traitement des sous-produits de forage.
- Tous les autres matériaux seront éliminés conformément à la législation environnementale, aux normes, aux directives et codes en vigueur.

Stockage et conservation des substances / organismes potentiellement nocifs

- Les échantillons seront transportés et entreposés de manière à prévenir la contamination de l'environnement.

Information du public des activités de IODP

- Information du public des plans opérationnels.

²⁵ International Ocean Discovery Program : Pages consultées le 21/10/2013
<http://www.iodp.org/program-policies/procedures/guidelines>

Enfin, il a été décidé de favoriser l'accès libre aux échantillons et aux données collectés lors des expéditions. Cet accès ne se fait cependant qu'une fois que les membres-parties des expéditions ont eu un délai raisonnable pour compléter leurs études initiales (période moratoire).

Le programme IODP a également permis le forage de nombreux sites de sulfures hydrothermaux (Figure 6-3).

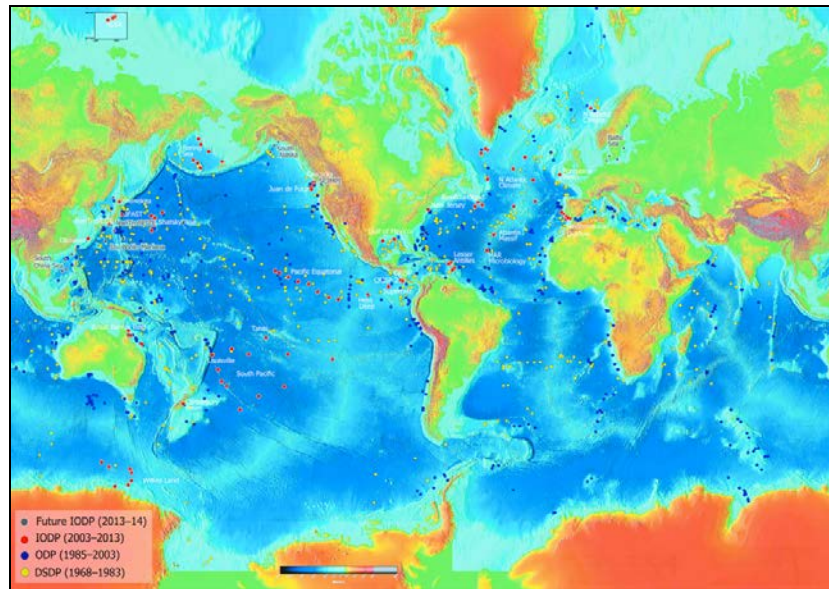


Figure 6-3 Localisation des sites de forage (source : IODP).

Ainsi, le programme international de forages océaniques scientifiques actuel, IODP, a permis des avancées dans plusieurs domaines scientifiques incluant notamment : forage en arctique, proxies paléoclimatiques de haute résolution, forages crustaux profonds, observatoire en fond de mer, et étude d'une biosphère active à plus d'1.6 km sous le plancher océanique²⁶.

Depuis octobre 2013, un processus de planification d'un futur programme, successeur d'IODP est en cours (source IODP).

- En effet, depuis septembre 2009, à la suite de la conférence INVEST, une large proportion de la communauté scientifique se mobilise afin de faire avancer le processus de planification avec notamment la création de IWG+ : un groupe international de travail dédié à la planification du nouveau programme.

Soutenu par SASEC, l'objectif final d'IWG+ est l'établissement d'un nouveau programme international de forages de 10 années à partir de fin 2013.

IWG+ est composé de représentants des agences de financement d'IODP et des opérateurs des moyens de forage. Il a été convenu qu'IODP-MI (Management d'IODP) continuera d'être à la tête du nouveau programme durant les 3-4 premières années qui serviront de transition progressive à la mise en place d'une nouvelle structure scientifique SAS (Science Advisory Structure).

²⁶ IODP : Pages consultées le 22/10/2013
<http://iodp-france.org/>

- Mise en place d'une nouvelle structure scientifique SAS
Les principaux changements attendus seront la réduction du nombre de panels ainsi que le remplacement de la structure à 3 niveaux (SSEP, SPC, SASEC) en un système à 2 niveaux (les fonctions de SPC se diviseront entre le nouveau comité scientifique et le nouveau comité exécutif).

6.3.7. Les codes de conduite

Des codes d'éthique sont également mis en place au sein de la communauté scientifique (InterRidge) et parmi les acteurs des industries minières (IMMS). Ces codes de conduites encouragent tant les scientifiques que les industriels à respecter certaines valeurs ou certains engagements.

6.3.7.1. Code de conduite InterRidge

InterRidge (International cooperation in Ridge-crest studies) est une organisation à but non lucratif. Elle a pour but de promouvoir les travaux de recherche internationaux et interdisciplinaires sur les dorsales océaniques, en créant une communauté de chercheurs à l'échelle du Globe, en planifiant et en coordonnant de nouveaux programmes scientifiques qu'aucune communauté nationale ne pourrait réaliser seule, en échangeant des informations scientifiques, et en partageant nouvelles technologies et moyens de recherche. Actuellement, InterRidge est portée par six pays membres, la Chine, la France, l'Allemagne, le Royaume Uni, les Etats-Unis, et cinq pays associés, le Canada, l'Inde, la Corée, la Norvège et le Portugal.

Cette organisation a établi un code d'éthique visant à encourager tous les scientifiques à respecter six engagements lors de la mise en œuvre de leur programme de recherche :

- 1) Éviter, dans la conduite de la recherche scientifique, des activités qui auront des répercussions délétères sur la durabilité des populations des organismes hydrothermaux.
- 2) Éviter, dans la conduite de la recherche scientifique, les activités qui conduisent à une altération significative longue et durable et/ ou à la dégradation visuelle des sites hydrothermaux.
- 3) Éviter des collections qui ne sont pas essentielles à la conduite de la recherche scientifique
- 4) Éviter, dans la conduite de la recherche scientifique, le repiquage de biote ou de matériel géologique entre les sites.
- 5) Se familiariser avec l'état des recherches actuelles et prévues dans une zone et éviter les activités qui pourraient compromettre les manipulations ou les observations d'autres chercheurs. S'assurer que les activités de recherche prévues sont connues du reste de la communauté scientifique internationale par la base de données InterRidge et d'autres bases de données du domaine public.

6) Faciliter le meilleur usage possible de tous les échantillons biologiques chimiques et géologiques recueillis par le biais de collaborations et de coopération entre la communauté globale de scientifiques.

Dans le cadre d'InterRidge, les scientifiques sont donc incités à respecter ces six engagements lors de la mise en œuvre de leur programme de recherche (InterRidge, 2013). Ces engagements visent à limiter / éviter les effets négatifs des investigations sur les organismes hydrothermaux, l'altération des sites, les échantillonnages abusifs et la dispersion / transplantation d'espèces ou de substrats entre sites, mais aussi à communiquer sur les projets de chacun et à fournir les données acquises et traitées. Il s'avère cependant que ces engagements ne sont pas toujours appliqués, voire sont méconnus d'une partie de la communauté scientifique. La mise à disposition en accès libre de la totalité de la donnée est également un point encore en discussion. Par contre des efforts importants sont consentis pour la communication des métadonnées, des plans de campagne, et la communication grand public.

6.3.7.2. *Ordre des Géologues du Québec*

L'Ordre des géologues du Québec²⁷ a pour mission principale la protection du public dans l'exercice de la géologie. L'Ordre assume sa mission en contrôlant la compétence et l'exercice des géologues et en réprimant l'exercice illégal de la géologie. Un code de déontologie encadre la mission du géologue et régit ses devoirs envers le public, le client, et la profession.

6.3.7.3. *Code environnemental de l'International Marine Minerals Society (IMMS)*

Fondée en 1987, l'International Marine Minerals Society²⁸ est une société professionnelle de membres issus de l'industrie, d'organismes gouvernementaux et d'institutions universitaires partageant un intérêt commun pour les minéraux marins. L'IMMS veut promouvoir et améliorer la compréhension des gisements de minéraux marins à l'échelle mondiale, faciliter l'échange d'informations entre ses membres par le réseau et des colloques, encourager un développement prudent des ressources minérales marines en prenant en compte les préoccupations environnementales, et encourager la recherche sur tous les aspects du développement des minéraux marins.

Son code de gestion des travaux miniers sous-marins dans le respect de l'environnement se veut être un guide pour le développement, la mise en œuvre et l'évaluation de plans de gestion environnementale de sites de recherche, d'exploration ou d'extraction de minéraux marins. C'est un code volontaire destiné à l'industrie, aux organismes de réglementation, aux scientifiques et autres acteurs, qui sont encouragés à l'adopter et l'utiliser. C'est actuellement

²⁷ Ordre des géologues du Québec [en ligne]. Pages consultées le 10 juillet 2013. <http://www.ogq.qc.ca/a-propos/lois-et-reglements>

²⁸ IMMS [en ligne]. Pages consultées le 10 juillet 2013. <http://www.immsoc.org/welcome.html>; http://www.immsoc.org/IMMS_code.htm

le seul instrument conçu spécifiquement pour encadrer les travaux miniers sous-marins dans le respect de l'environnement.

Le code a été élaboré en 2000 et adopté en 2001 suite à la demande de l'industrie minière sous-marine. Il fournit un cadre de références et des critères pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un programme d'exploration marine ou d'exploitation minière des fonds marins dans le respect de l'environnement. Il facilite également la planification financière et opérationnelle.

Le code de l'IMMS complète les réglementations nationales et internationales (CNUDM) exigeantes en matière de protection du milieu marin. Il vise aussi à fournir des principes et des lignes directrices en matière d'environnement, à l'intention des compagnies minières marines qui opèrent là où ces réglementations sont absentes ou pourraient être améliorées.

Les compagnies adoptant ce code s'engagent à un maximum de transparence vis-à-vis de leurs activités relatives à l'environnement, et sont aussi encouragées à faire des retours d'informations réguliers concernant le code à l'IMMS.

Voulu comme un document vivant, évolutif et adaptable, le code fait l'objet d'un examen périodique tous les 5 ans après consultation avec l'industrie minière marine et les autres acteurs.

Le code de l'IMMS a pour objectif principal d'anticiper les incidences écologiques à prendre en compte pour permettre une exploration et une exploitation responsable des fonds marins jusqu'à la restauration du site. Le code ne prescrit pas de pratiques spécifiques mais indique des grandes orientations sur des « valeurs partagées » telles que :

- des critères pour l'élaboration et la mise en œuvre de plans de gestion de l'environnement;
- des conseils sur les meilleures pratiques environnementales relatives à l'extraction en milieu marin;
- des mesures pour compléter, améliorer et enrichir les réglementations existantes en matière d'environnement;
- un cadre d'évaluation des pratiques environnementales en vigueur ou proposées par les compagnies;
- des « règles du jeu » cohérentes en matière d'environnement;
- des normes transparentes pour l'établissement des rapports sur l'environnement;
- des normes exigeantes et cohérentes en matière de responsabilité environnementale;
- l'anticipation et la prise en compte des questions écologiques.

Le code repose sur une déclaration de 6 principes environnementaux et un ensemble de 10 directives opérationnelles dans lesquelles figurent ces valeurs partagées. Les directives opérationnelles se rapportent au :

- le développement responsable et durable;
- une déontologie d'entreprise écologiquement responsable;
- le partenariat communautaire;
- la gestion des risques environnementaux;
- la gestion intégrée des questions écologiques;
- les objectifs des compagnies en matière d'environnement;
- l'examen, l'amélioration et la mise à jour des politiques et des normes environnementales;
- la restauration des sites après leur mise hors service;
- l'établissement de rapports et la fourniture de documentation;

- la collecte, l'échange et l'archivage de données sur l'environnement;
- les études de performance.

Ainsi, le code de conduite IMMS (Verlaan, 2011) ne prescrit pas de pratiques spécifiques mais indique de grandes orientations sur des « valeurs partagées ». Le code fournit aux compagnies d'extraction minière en milieu marin un cadre de références et des critères pour élaborer et mettre en œuvre un programme d'exploration marine ou d'exploitation minière des fonds marins dans le respect de l'environnement. Les industriels n'ont donc aucune obligation de respecter ce code de conduite. Il a uniquement pour but de compléter les réglementations nationales et internationales applicables et contraignantes visant à protéger le milieu marin, là où ces réglementations existent.

6.3.7.4. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM)*

L'Australasian Institute of Mining and Metallurgy²⁹ est la première organisation en Australasie internationalement reconnue regroupant plus de 12500 professionnels du secteur minier. Son Code d'Éthique, qui n'a pas valeur de loi, garantit le plus grand professionnalisme de ses membres au regard du bien-être de la communauté, de l'environnement naturel et de la réputation de l'industrie mondiale des minerais.

6.3.7.5. *Society of Economic Geologists (SEG)*

La Society of Economic Geologists³⁰ est une organisation internationale regroupant de plus de 6500 membres issus des secteurs industriels, académiques, et gouvernementaux et étant intéressés par le domaine de la géologie « économique ». La SEG s'engage à faire progresser la science et la découverte de ressources minérales et de nouveaux gisements par le biais de la recherche, de publications, de conférences, et de camps de terrain. Son objectif est aussi de faire avancer le statut de la profession de géologue et de maintenir un niveau de professionnalisme et d'éthique élevé parmi ses membres.

6.3.7.6. *Conclusion*

Ces outils sont donc intéressants mais restent dépendants du bon vouloir des acteurs concernés, tant scientifiques qu'industriels, et ils reposent essentiellement sur des principes généraux ou des recommandations. Le code IMMS a cependant été utilisé dans le cadre du projet d'exploitation développé par Nautilus en Papouasie-Nouvelle Guinée pour aider à la mise en place de mesures de restauration (Van Dover et al, 2013). Ces codes (InterRidge et IMMS) peuvent également être utiles aux autorités concernées par l'évaluation des projets (Gouvernements, AIFM, etc.) et leur fournir un modèle pour la mise en place d'une législation juridiquement plus contraignante.

²⁹ L'Australasian Institute of Mining and Metallurgy [en ligne]. Pages consultées le 10 juillet 2013. <https://www.ausimm.com.au/content/default.aspx?ID=121>

³⁰ Society of Economic Geologists [en ligne]. Pages consultées le 10 juillet 2013. http://www.segweb.org/SEG/History_and_Mission.aspx?hkey=581c4963-e8d5-489c-92fd-b3507b5bf55e

6.3.8. La nécessité d'une gestion intégrée – l'exemple d'OSPAR en haute mer

Les activités d'exploitation des ressources minérales peuvent avoir des impacts sur les écosystèmes marins au même titre que d'autres activités, pour lesquelles des mécanismes de gestion pour la prévention de ces impacts sont généralement déjà en place. Il serait par exemple dommageable de mettre en place des activités d'extraction là où la pêche profonde est interdite pour la préservation d'Ecosystèmes marins vulnérables (EMV).

C'est cette approche de gestion intégrée que la Commission OSPAR cherche à organiser en haute mer au sein des Aires marines protégées qu'elle a désignées (OSPAR, 2010 a, b, c d, e, f; OSPAR, 2012a) en vertu de leur intérêt écologique, assorties de recommandations pour leur gestion (OSPAR, 2010 g, h, i, j, k, l ; OSPAR, 2012b). En effet, eu égard à son mandat, la Commission OSPAR ne peut pas prendre des mesures de gestion sur des activités telles que la pêche, le trafic maritime ou l'extraction des ressources minérales. La Commission OSPAR a donc initié un processus de gestion collective de ces zones visant à réunir régulièrement les différentes organisations compétentes sur la zone afin de partager les mesures de gestion environnementale respectives et d'améliorer leur cohérence.

Ce processus, dénommé processus de Madère (pour le lieu de la première réunion en 2010), a permis de définir les bases d'un accord multilatéral en cours d'instruction dans les instances des différentes organisations et d'élaborer l'ébauche d'un plan de gestion collective de ces zones. Outre la Commission OSPAR, le processus de Madère implique pour l'instant :

- *Pour la pêche* : deux Organisations régionales de gestion des pêches (ORGP) : la Commission internationale pour la conservation des thonidés en Atlantique (CICTA) et la Commission des pêches de l'Atlantique nord-est (CPANE) ;
- *Pour le trafic maritime* : l'Organisation maritime internationale (OMI) ;
- *Pour l'exploitation des ressources minérales* : l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM).

La réunion de Madère en 2010, a permis l'ébauche de cet accord multilatéral dénommé : dispositions collectives pour une gestion de zones sélectionnées au-delà des juridictions nationales en Atlantique nord-est. Ces dispositions ont ensuite été travaillées par le groupe de juristes et linguistes de la Commission OSPAR. Elles ont été présentées de manière informelle lors de la réunion Madère 2, tenue à Paris en janvier 2012 et ont fait l'objet de quelques rectifications à l'issue de la Commission annuelle de 2012 de la CPANE. Cette dernière version n'a cependant pas été validée par la CPANE lors de la réunion annuelle de novembre 2013.

6.3.9. Les aires de protection marines en milieu profond

Comme le montre le recensement mondial des espaces protégés, et la carte ci-dessous, présentée lors du troisième congrès mondial sur les aires marines protégées (IMPAC 3³¹), qui a eu lieu à Marseille du 21 au 25 octobre 2013, la plupart des aires marines protégées dans le monde émanent d'enjeux côtiers ; mais on aperçoit quelques signes qui tendent à prouver une présence accrue des AMP loin des côtes et donc sur des milieux plus profonds :

- Les grandes AMP, notamment dans le Pacifique, qui couvrent parfois toute la Zone économique exclusive d'un pays et donc en particulier couvrent des milieux profonds.
- Des AMP au sein des ZEE ayant vocation à couvrir exclusivement le milieu profond, comme dans l'archipel des Açores par exemple ;
- Des AMP de haute mer, par définition, au-delà des juridictions nationales et de fait situées à d'importantes profondeurs (comme dans l'Atlantique nord-est par exemple).

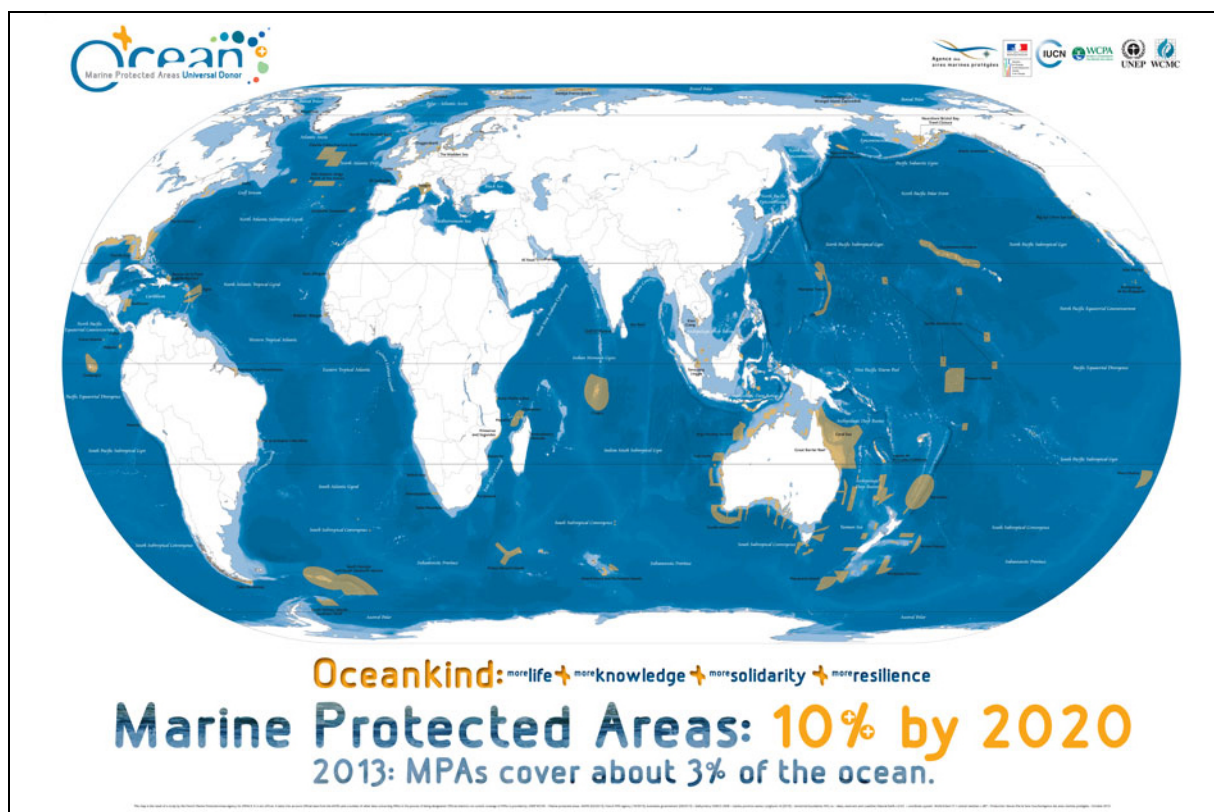


Figure 6-4 Carte des Aires marines Protégées (source : IMPAC3).

La couverture actuelle du réseau mondial d'AMP n'atteint que 3% de la surface des océans de la planète. L'objectif promu par la Convention sur la diversité biologique est d'atteindre 10% en 2020. Des efforts restent à faire pour combler ce manque et le milieu profond est particulièrement concerné.

³¹ IMPAC3 : <http://www.IMPAC3.org>

6.3.9.1. Critères de désignation

Compte-tenu des connaissances encore parcellaires dans ces zones, la désignation d'AMP en milieu profond est généralement motivée par des critères géomorphologiques :

- Talus continentaux et canyons associés ;
- Monts sous-marins ;
- Dorsales océaniques.

Ces éléments bénéficient fréquemment d'informations plus détaillées et leur rôle écologique est avéré.

Outre les habitats associés aux éléments morphologiques mentionnés ci-dessus, les AMP en milieu profond ont également pour objectif la protection d'espèces vivant à très basses profondeurs et donc le cycle de vie est très lent (requins profonds par exemple). Leur maturité sexuelle n'étant pas atteinte avant la dizaine d'année et pouvant aller jusqu'à 30 ans, les populations de ces espèces sont particulièrement sensibles aux perturbations et exploitations. Ce fut le cas de l'empereur (*Hoplostethus atlanticus*) par exemple, qui n'atteint sa maturité sexuelle qu'entre 20 et 30 ans et vit plus d'une centaine d'année et dont les populations ont été décimées par la pêche.

6.3.9.2. Enjeux de gestion

Comme pour la désignation, la connaissance du milieu est un enjeu crucial pour la protection des écosystèmes de grand fond et cette connaissance tend à manquer. Une tendance générale, tant pour les habitats (coraux, éponges) que pour les espèces des grands fonds, est leur faible capacité de récupération. Il est donc crucial de prévenir les impacts irréversibles et dans le contexte de l'extraction de ressources minérales profondes, il est important de prendre connaissance des mesures existantes pour d'autres secteurs d'activité.

Les stratégies de gestion de deux AMP en haute mer sont présentées ci-après.

6.3.9.3. Le champ hydrothermal Endeavour : une zone de protection marine pour la recherche scientifique

Le 4 mars 2003, la zone entourant les champs hydrothermaux Endeavour est devenue officiellement la première zone de protection marine du Canada (ZPM Endeavour) aux termes de la *Loi sur les océans* du Canada.

Le site

Situé par 2250 m de profondeur à 250 km au large des côtes de l'Île de Vancouver, en Colombie-Britannique, au Canada, le segment Endeavour de la dorsale de Juan de Fuca abrite un système hydrothermal concentré le long d'une vallée axiale de 1 km de large et d'environ 20 km de long. Siège dynamique d'activités volcaniques et tectoniques, le secteur est caractérisé par des éléments physiques, chimiques, biologiques et géologiques extrêmes qui sont typiques des champs hydrothermaux, mais qui diffèrent assez fortement des caractéristiques du fond océanique environnant, essentiellement désertique. Malgré ces conditions extrêmes, et en partie grâce à elles, la zone Endeavour abrite un écosystème prospère et diversifié basé sur une communauté microbienne qui puise son énergie dans les produits chimiques dissous dans les fluides hydrothermaux surchauffés et chargés en

minéraux par des échanges géothermiques. Sa situation au large et son écosystème particulier font que la zone est principalement utilisée par les chercheurs scientifiques. Le champ Endeavour captive néanmoins aussi l'imagination du grand public.

Le règlement associé à cette zone de protection peut être trouvée sur le site du ministère de la justice canadienne (canadienne, 2011) et le plan de gestion sur le site de Pêche et Océans Canada (Canada, 2009).

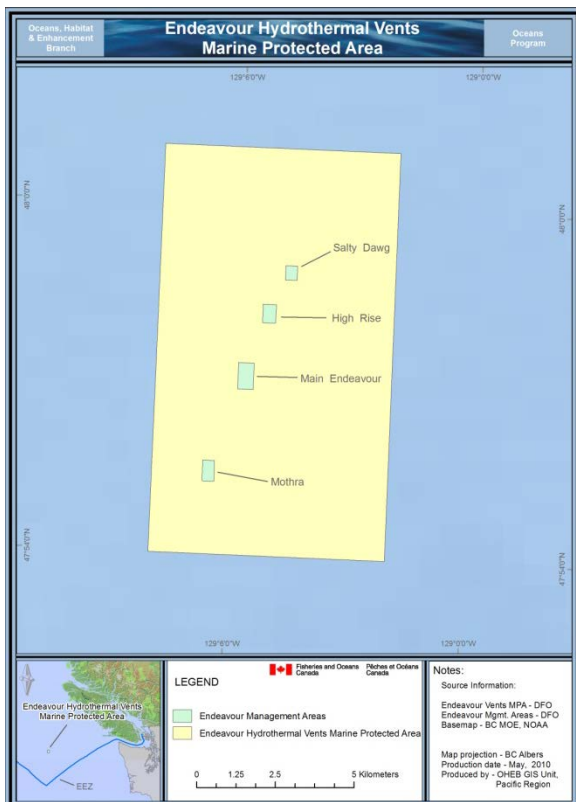


Figure 6-5 La zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour (source : <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca>)

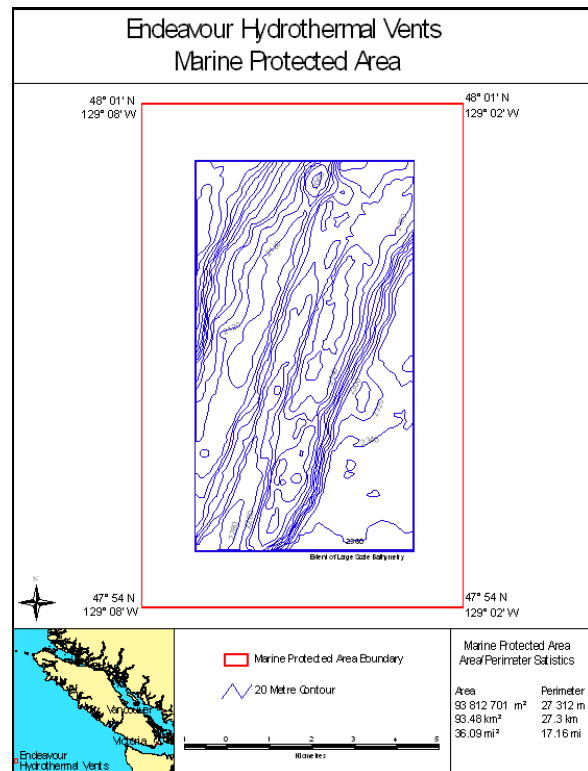


Figure 6-6 Bathymétrie dans la ZPM du champ hydrothermal Endeavour (<http://www.notmar.gc.ca>)

La gouvernance

Le Ministère des Pêches et des Océans (MPO) du Canada est le principal organisme responsable de la protection et de la gestion de la ZPM Endeavour. Pour faciliter la communication et la mise en œuvre du plan de gestion, le MPO a mis sur pied le Comité technique consultatif (CTC) pour Endeavour. Comme le reflète la composition actuelle du comité (Tableau 6-1), les membres représentent des intérêts aussi bien gouvernementaux que non gouvernementaux et ils possèdent des compétences, des connaissances et des expériences applicables à l'écologie, à la gestion, à la conservation et à l'utilisation de la zone.

Tableau 6-1 Composition actuelle du comité technique consultatif (CTC) de la zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour.

Organisme	Nombre de membres
Ministère des pêches et des Océans - Direction des océans, de l'habitat et de la mise en valeur	1
Pêches et Océans Canada - Direction des sciences	1
Ministères des Ressources naturelles	1
Scientifiques universitaires canadiens	3
Scientifiques étrangers	2
Éducation et sensibilisation du public	1
Organisations non gouvernementales de l'environnement, ou ONGE	1

En général, le CTC pour la ZMP Endeavour offre des conseils et des recommandations à Pêches et Océans Canada concernant la conservation, la gestion et les communications liées à la zone de protection marine du champ hydrothermal. Le comité fait office d'organisme consultatif principal pour la ZPM et facilite la participation continue et directe des principaux intervenants. Cette structure de gestion permet au MPO de renforcer ses relations avec les intervenants et les organismes gouvernementaux et elle facilitera le développement et l'application de stratégies innovatrices.

Le comité a participé au processus d'évaluation et d'établissement de la ZPM et il continue à jouer un rôle dans la gestion de celle-ci. Le CTC offre :

- une tribune permettant d'échanger des renseignements et des points de vue au sein d'un groupe central constitué d'organismes gouvernementaux et d'organisations non gouvernementales intéressés par la zone Endeavour;
- un service d'examen des composantes du plan de gestion, des projets de règlement et des documents connexes préliminaires;
- des conseils au MPO concernant la valeur technique des activités proposées à l'intérieur de la ZPM;
- des commentaires concernant les activités d'autres organisations ou organismes participant à l'étude, à la protection ou à la gestion de la zone Endeavour.

Le Ministère a collaboré avec le Comité technique consultatif (CTC) pour la ZPM du champ hydrothermal Endeavour lors de l'évaluation de la zone, de sa désignation et de l'élaboration des plans de gestion provisoires et actuels ainsi que des objectifs et des mesures de gestion. Le CTC a déclaré que la désignation de la ZPM Endeavour contribuerait de manière efficace à la protection et à la conservation d'une partie du segment Endeavour de la dorsale Juan de Fuca qui est représentative des écosystèmes sous-marins dynamiques, des éléments hydrothermaux inhabituels, du biote et des milieux spécialisés, de la grande diversité et de la productivité biologique accrue rencontrés dans ce segment. La collaboration du CTC pour la ZPM Endeavour et du MPO se concrétise aujourd'hui dans des travaux axés sur la conservation, la protection et la promotion de l'écosystème de ce secteur.

Cadre de gestion

Les objectifs associés à la ZPM Endeavour découlent des raisons invoquées par la *Loi sur les océans* pour la désignation des ZPM, du Règlement et des conseils recueillis lors des consultations portant sur les attentes concernant cette zone. Ces objectifs en matière de conservation et de gestion guident la mise en œuvre efficace du Règlement et aident à la gestion des activités à l'intérieur de la ZPM.

Objectifs de conservation

Les objectifs de conservation des ZPM canadiennes sont des énoncés généraux décrivant ce que l'on vise pour les caractéristiques écologiques du milieu protégé. L'objectif de conservation de la ZPM Endeavour est le suivant :

« Faire en sorte que les activités humaines contribuent à la conservation, à la protection et à une meilleure connaissance de la diversité, de la productivité et du dynamisme naturels de l'écosystème et que ces activités soient gérées de telle façon que leur incidence reste moins importante que les perturbations naturelles (p. ex. magmatiques, volcaniques et sismiques). »

Objectifs et principes de gestion

Les principes et les objectifs de gestion énumèrent les priorités administratives qui soutiennent la poursuite de l'objectif de conservation mentionné ci-dessus.

Coordonner les activités humaines pour faire en sorte que des procédures responsables soient suivies (par exemple pour l'échantillonnage, le déploiement et la récupération des instruments, le partage des données et l'élimination appropriées des débris). Contribuer à sensibiliser le public aux valeurs des écosystèmes marins et à la nécessité de les protéger. Des principes de gestion spécifiquement applicables à la ZPM Endeavour ont été adoptés pour l'ébauche du plan de gestion et inclus dans le Plan de Gestion sont les suivants :

- Collaboration
- Approche écosystémique
- Gestion adaptative
- Précaution

Collaboration

La gestion de la zone est du ressort du MPO mais l'obligation de rendre des comptes est une question importante parce que la sphère de compétence du ministère est limitée et que certaines responsabilités sont partagées. La coopération et la coordination du MPO, des autres organismes gouvernementaux, des organismes membres du CTC et d'autres intervenants sont essentielles pour faire en sorte que la protection de la ressource demeure une responsabilité partagée bien assumée. C'est la seule manière d'atteindre les objectifs fixés pour la zone du champ hydrothermal Endeavour. Le MPO fournira le leadership nécessaire pour soutenir cette coopération, d'une manière ouverte, transparente et inclusive.

Approche écosystémique

La gestion de la ZPM Endeavour sera basée sur une approche écosystémique. Dans ce type d'approche, on gère les activités humaines en tenant compte des interrelations entre les organismes vivants et leurs habitats, y compris l'environnement physique, à l'aide des meilleures connaissances scientifiques existantes. Cette approche se concentre sur les facteurs qui influent positivement ou négativement sur la biodiversité, la productivité et la qualité des eaux et des habitats dans le milieu marin. Elle peut impliquer que divers utilisateurs aient à prendre en considération les répercussions de leurs activités sur d'autres activités, ou que

leurs activités doivent être modifiées de façon à assurer le maintien de l'intégrité de l'écosystème.

Gestion adaptive

Les objectifs de la gestion écosystémique dans le périmètre de la ZPM Endeavour sont sujets à des influences externes et peuvent évoluer avec le temps. Un certain degré de flexibilité est maintenu dans le processus de gestion pour que l'on puisse intégrer, lorsqu'elles sont disponibles, les nouvelles données susceptibles d'avoir une incidence sur la gestion du champ hydrothermal. Ce processus est facilité par la participation et la coopération de scientifiques issus de différents organismes gouvernementaux et du milieu universitaire. Le CTC pour Endeavour doit fournir une rétroaction continue sur le plan de gestion et les mesures visant à réaliser les objectifs de la ZPM Endeavour.

Les mesures de gestion doivent être adaptables aux nouvelles connaissances et rester modulables en fonction de l'évolution des conditions sociales, environnementales et économiques. Le gestionnaire de la zone examine les conseils formulés par le CTC ainsi que les résultats des nouvelles études et modifie le cas échéant les activités de recherche, en continu, en fonction de leurs impacts. Si des problèmes surviennent dans les quelques années qui suivent au point de nécessiter une adaptation du plan, les modifications sont décidées en consultation avec le CTC et ajoutées en annexe au plan.

Précaution

L'approche de précaution, définie dans la *Loi sur les océans* comme le fait de « pêcher par excès de prudence », est essentielle dans la gestion des activités océaniques. Dans la *Stratégie sur les océans du Canada*, le gouvernement du Canada réaffirme son engagement à promouvoir l'application à grande échelle du principe de précaution pour la conservation, la gestion et l'exploitation des ressources marines, de façon à protéger ces ressources et à préserver le milieu marin.

Mesures de gestion

Les mesures de gestion sont les outils et les procédures dont dispose le MPO pour atteindre les objectifs de conservation et de gestion et pour évaluer l'efficacité de la ZPM (Tableau 6-2).

Ces mesures de gestion se complètent et se renforcent mutuellement à l'intérieur d'un système imbriqué. Le processus de demande de licence pour les navires de recherche constitue le portail principal de communication avec tous les chercheurs. Le cadre d'examen des activités de recherche est une étape du processus de demande de licence pour les navires de recherche.

Tableau 6-2 Résumé des mesures de gestion de la zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour.

Mesure de Gestion	Rôle de la Mesure de Gestion	Objectifs de la Mesure de Gestions
Processus de demande de licence pour les navires de recherche	Surveiller et gérer l'accès à la ZPM Endeavour par les navires étrangers et les navires canadiens. Faire comprendre et respecter le règlement et les objectifs de la ZPM Endeavour.	Mettre en œuvre des processus d'examen cohérents et détaillés de délivrance de licences d'accès pour les navires étrangers et canadiens. Élaborer des directives pour les demandes d'autorisation d'exercer des activités de recherche.
Cadre d'examen des activités de recherche	Examiner les projets de travaux dans la ZPM Endeavour en fonction des zones de gestion concernées, des impacts potentiels et des mesures d'atténuation envisagées.	Appliquer le cadre d'examen des activités de recherche de manière cohérente.
Plans de recherche	Surveiller les activités et gérer l'accès suivant le principe de précaution afin d'obtenir les données nécessaires à une meilleure compréhension de la zone. Faire en sorte que les activités de recherche restent conformes aux objectifs fixés pour la ZPM.	Faire une analyse détaillée des lacunes au niveau des données. Appliquer des conditions d'accès visant à encourager la collecte de données nécessaires. Élaborer une stratégie de surveillance.
Zones de gestion	Répertorier les zones où les impacts résultant des activités doivent rester minimaux. Faciliter l'exploration scientifique responsable de zones ouvertes à la recherche.	Améliorer la précision des cartes. Finaliser les objectifs de gestion pour les champs hydrothermaux récemment délimités.
Mesures d'atténuation	Les mesures d'atténuation découlant du principe de précaution viennent s'ajouter aux zones de gestion pour réduire le plus possible les perturbations découlant de la recherche scientifique.	Élaborer des mesures d'atténuation pour quelques stressors potentiels. Modéliser les mécanismes perturbateurs prévisibles.
Rapports d'expédition	Faire en sorte que les activités effectuées dans le cadre des expéditions ne nuisent pas aux objectifs fixés pour la ZPM. Recueillir des données écosystémiques permettant de combler les lacunes au niveau des connaissances.	Obtenir des renseignements par le partage de rapports d'expédition, des rapports journaliers, des séquences vidéo géoréférencées et des analyses de données ainsi que par le travail d'observateurs. Améliorer le suivi des activités grâce à la préparation de plans d'expédition et la rédaction de rapports de fin de campagne.
Codes de déontologie et directives	Offrir des lignes directrices spécifiques à l'intention des scientifiques pour faire en sorte que les recherches entreprises soient conformes aux objectifs fixés pour la ZPM et que les pratiques exemplaires soient adoptées dans les milieux marins, en particulier dans les champs hydrothermaux	Adopter officiellement le code de déontologie d'InterRidge. Élaborer et mettre en œuvre des directives provisoires concernant l'échantillonnage à des fins scientifiques.

Mesure de Gestion	Rôle de la Mesure de Gestion	Objectifs de la Mesure de Gestions
Système de soutien à la gestion	Mettre sur pied un système constitué d'une base de données géoréférencées et d'une capacité de cartographie en ligne pour la gestion, la surveillance et la coordination des activités humaines dans la ZPM Endeavour, conformément aux objectifs fixés pour cette zone.	Utiliser la base de données pour améliorer la coordination des itinéraires suivis par les navires, du déploiement des capteurs, des échantillonnages et de la bathymétrie. Répertoire les zones où l'on assiste à un chevauchement de certaines tâches. Suggérer aux scientifiques de partager leurs données, leurs photographies et leurs vidéos pour réduire les échantillonnages multiples.

Processus de Demande de Licence pour les Navires de Recherche

Le processus d'examen des propositions d'accès à la ZPM Endeavour aux navires est la mesure de gestion clé qui permet de faire en sorte que les activités de recherche des scientifiques canadiens et étrangers soient conformes au Règlement et aux objectifs de la ZPM.

Dans la ZPM Endeavour, les principaux navires canadiens présentement affrétés pour des travaux de recherche sont les navires de la Garde côtière canadienne (NGCC). À l'heure actuelle, il n'est pas prévu que les navires canadiens privés puissent être utilisés pour des travaux de recherche sur le champ hydrothermal Endeavour sans le soutien de la NGCC. Néanmoins, si des intervenants canadiens du secteur privé désirent effectuer des travaux de recherche dans ce secteur, ils devront obtenir au préalable un permis scientifique pour toute activité incluant le prélèvement d'échantillons biologiques. Le gestionnaire de la ZPM devra être informé de la présentation d'une demande d'autorisation d'activité de recherche à l'intérieur de la ZPM Endeavour et il pourra alors examiner le plan de recherche correspondant et formuler les conditions à adjoindre aux licences scientifiques.

Les navires étrangers doivent obtenir l'autorisation d'effectuer des activités de recherche dans les eaux canadiennes auprès du ministère des Affaires étrangères et du Commerce international (MAECI) aux termes de la *Loi sur le cabotage*. Les demandes présentées au MAECI comprennent une demande d'autorisation de mener des recherches scientifiques en milieu marin sous la supervision nationale du Canada et décrivent le type et l'emplacement des activités proposées aux fins d'examen et d'approbation. Les demandes émanant des navires étrangers sont envoyées par voie diplomatique au MAECI par l'intermédiaire du processus de demande de licence des navires étrangers.

Les demandes présentées pour des activités de recherche dans la zone du champ hydrothermal Endeavour sont envoyées au gestionnaire de la ZPM Endeavour qui évalue dans quelle mesure ces demandes sont conformes au plan de gestion. Des conseils concernant les demandes seront également sollicités auprès du CTC pour la ZPM Endeavour. Si des renseignements supplémentaires sont nécessaires pour obtenir des éclaircissements, il faut les demander auprès du MAECI. Après examen de toutes les exigences juridiques pertinentes, les responsables régionaux du MPO conseillent le ministre des Affaires étrangères et du Commerce international sur les recommandations liées à l'éventuelle autorisation.

Pour faire en sorte que le processus d'examen des demandes de licence reste cohérent et clair pour tous les demandeurs, le MPO préparera un guide et un formulaire d'application, à l'usage des gestionnaires et des chercheurs demandeurs, qui décrira toutes les exigences à

remplir. Ce guide s'appuiera sur le Règlement, celui-ci décrivant les renseignements de base qui doivent figurer dans les plans de recherche présentés dans le cadre des demandes de licence. Le guide comportera également un formulaire d'examen des travaux de recherche scientifique, qui facilitera le processus d'examen, ainsi que des feuilles de contrôle et une description des besoins scientifiques en fonction des lacunes connues dans les connaissances. Le détenteur de la licence scientifique devra documenter de manière précise le déploiement de ses instruments et les mesures entreprises, les échantillonnages et l'emplacement des activités.

Plans de Recherche

Le Règlement requiert qu'un plan de recherche soit soumis au MPO au moins 90 jours avant le commencement des activités, quel que soit le type de recherche envisagé. Le plan de recherche doit fournir des renseignements détaillés sur les emplacements visés et les activités scientifiques prévues, notamment les techniques qui seront utilisées et les mesures prises concernant les possibles impacts environnementaux.

Les navires de recherche étrangers n'ont pas à fournir de plan de recherche scientifique au MPO si les renseignements requis en vertu du Règlement ont déjà été soumis par écrit pour obtenir une autorisation aux termes de la *Loi sur le cabotage*. Les travaux de recherche scientifique effectués dans le cadre de cette autorisation doivent néanmoins satisfaire à toutes les autres exigences découlant du Règlement pour ce qui est de la protection et de la gestion de l'environnement. Le ministre des Affaires étrangères et du Commerce international peut de plus assujettir l'autorisation à certaines conditions. Le MPO examine ces demandes d'autorisation émanant de chercheurs étrangers puis conseille le ministre des Affaires étrangères et du Commerce international sur les conditions à adjoindre à l'éventuelle autorisation. Le chapitre 44 de la *Loi sur les océans* permet d'assortir les autorisations délivrées aux termes de la *Loi sur le cabotage* d'une condition stipulant que les chercheurs étrangers doivent partager leurs résultats.

Examen des plans de recherche

Le cadre d'examen des activités de recherche vise à caractériser et si possible à quantifier les impacts acceptables ainsi qu'à détailler les considérations particulières. En se basant sur les meilleurs renseignements disponibles, ce cadre définit présentement une série d'indicateurs qualitatifs permettant d'évaluer dans quelles mesures les impacts prévus sont acceptables. La stratégie de recherche proposée servira à tracer dans ses grandes lignes un plan d'amélioration continue de nos connaissances concernant le champ hydrothermal Endeavour, ce qui permettra en retour de définir de nouveaux indicateurs quantitatifs du stress et des impacts imposés à l'écosystème.

En plus d'aider au processus d'examen des licences d'accès pour les bateaux, le cadre d'examen des activités de recherche est également conçu pour l'étude des activités de recherche proposées dans le contexte de la zone de gestion conformément aux lignes directives énoncées dans le plan de gestion. Cette approche capitalise sur les directives de gestion provisoires élaborées en avril 2000 et sur les commentaires formulés par l'équipe consultative des intervenants. Le cadre repose sur l'hypothèse selon laquelle une approche adaptative et de précaution raisonnable devraient être suivies pour que le cadre puisse être raffiné et amélioré avec le temps.

Le cadre d'examen des activités de recherche est divisé en quatre composantes. La première détaille le processus d'examen des activités à l'intérieur de la ZPM. Les trois autres

composantes décrivent le processus d'examen des activités dans chacune des zones de gestion ainsi que les objectifs et les orientations de celles-ci.

Le gestionnaire de la ZPM examine le plan de recherche pour être en mesure de répondre aux questions suivantes :

- Les travaux de recherche envisagés contribueront-ils à l'atteinte des objectifs de gestion et de conservation de la ZPM Endeavour?
- Les activités de recherche proposées sont-elles appropriées pour les zones de travail prévues?
- Compte-tenu des stressseurs associés aux activités de recherche proposées, des mesures d'atténuation appropriées ont-elles été incluses dans le plan?
- Les études ont-elles été conçues de manière à respecter le code de déontologie?

Les activités proposées sont-elles compatibles (et idéalement, coordonnées) avec les autres activités de recherche menées dans le secteur? Un formulaire d'examen des travaux de recherche scientifique a été préparé pour aider à l'évaluation des plans de recherche. Présentement, le gestionnaire de la ZPM Endeavour doit remplir ce formulaire après examen du plan de recherche pour faire en sorte que tous les renseignements requis soient bien inclus et pour s'assurer que les activités proposées sont bien conformes au Règlement sur ZPM Endeavour. Une fois rempli, le formulaire sert de liste de vérification pour l'examen du plan. Dans l'avenir, cette liste de vérification devrait être intégrée au dossier de demande d'autorisation et les chercheurs devront alors la remplir. Le gestionnaire qui examine un plan peut assortir son avis de recommandations, notamment une demande des résultats de l'expédition, des demandes concernant l'atténuation des impacts ainsi que la mise en place d'une surveillance et la présence d'observateurs à bord du bateau pour le système de soutien à la gestion lorsque celui-ci sera opérationnel. La stratégie de recherche et de surveillance priorise, au cours des cinq prochaines années, l'identification des lacunes de connaissances qui pourraient être comblées en exigeant le partage des données comme condition à l'autorisation d'échantillonner, afin d'améliorer notre capacité à surveiller la ZPM Endeavour.

Modification des plans de recherche

Les chercheurs doivent se cantonner aux activités telles que décrites dans leur demande d'autorisation. Toute modification d'un plan de recherche décidée en mer peut faire que les activités ne soient plus conformes au Règlement. Toute modification du plan de recherche initialement présenté doit donc être immédiatement transmise au MPO.

Rapports d'expédition

Conformément à l'article 44 de la *Loi sur les océans*, le MPO peut demander au MAECI d'assortir de conditions l'autorisation accordée aux navires étrangers de mener des recherches en exigeant de tous les intervenants qui exercent des activités dans la ZPM Endeavour qu'ils présentent un rapport d'expédition dans les deux mois qui suivent la fin de leurs activités en mer. Le gestionnaire de la ZPM exige qu'un membre du personnel scientifique, habituellement le chercheur principal, se présente comme la personne qui fournira les données et qui soumettra un rapport préliminaire et, plus tard, un rapport final d'expédition incluant ces données. Le gestionnaire peut demander que soient fournies des données particulières permettant de combler certaines lacunes, en plus des éléments suivants qui doivent systématiquement figurer dans le rapport d'expédition :

- Les emplacements où ont eu lieu les échantillonnages, les échantillons recueillis (tailles et espèces si possible), les études qui ont été ou qui seront effectuées sur les

échantillons, et le sort des échantillons (p. ex. échantillons préservés, conservés pour un laboratoire, un musée, éliminés, etc.);

- L'emplacement et durée de vie des instruments installés sur le plancher océanique;
- Des enregistrements vidéo géoréférencés de la totalité des plongées des submersibles (de la mise à l'eau à la sortie);
- Des observations des impacts ou des incidents (p. ex. matériaux abandonnés sur place, collision du sous-marin avec une cheminée ayant entraîné des dommages);
- Des données brutes et résultats des activités de recherche menées à l'intérieur de la ZPM.

En ce qui concerne les navires étrangers, l'article 44 de la *Loi sur les océans* stipule que le ministre des Pêches et des Océans peut demander au ministre des Affaires étrangères d'assujettir l'octroi de la licence visée à l'alinéa 3(2)c) de la *Loi sur le cabotage* à la condition que lui soient fournis les résultats des recherches océanographiques. Le MAECI envoie des copies des rapports de recherche et des données au MPO qui les fait suivre à la région responsable. Le gouvernement du Canada peut synthétiser les données obtenues par les navires étrangers et y faire référence. Il peut les consulter et les utiliser dans le cadre de ses propres travaux de recherche mais les droits d'auteur régissent l'utilisation de ces données pour ce qui est de leur publication.

Les rapports journaliers dont la présentation est une condition d'obtention de la licence amélioreront la qualité des données figurant dans les rapports de fin d'expédition. Durant cette période du plan de gestion, des efforts supplémentaires seront déployés pour exiger une présentation précise et opportune des résultats de l'expédition conformément à l'article 44 de la *Loi sur les océans*.

Zones de gestion

Les zones de gestion de la ZPM Endeavour correspondent aux principaux champs hydrothermaux répertoriés et sont, de nord au sud :

- Salty Dawg
- High Rise
- Main Endeavour
- Mothra Field

Le champ Sasquatch, découvert en 2000 au nord du champ Salty Dawg, a été une nouvelle fois exploré en 2003. Les objectifs de gestion concernant Sasquatch seront définis en 2013.

La création de différentes zones de gestion offre la possibilité de répertorier des secteurs où les impacts potentiels seront minimaux ainsi que d'autres secteurs où mener les activités de recherche et de surveillance contribuant à la conservation, à la protection et à la meilleure compréhension de la zone. Les champs Main et Mothra, qui ont toujours fait l'objet d'intenses activités de recherche, resteront par exemple des secteurs privilégiés pour les études visant à améliorer les connaissances portant sur cet écosystème. Dans le même temps, la décision d'interdire l'accès aux zones de gestion Salty Dawg et High Rise, à l'exception des activités mettant en jeu des techniques d'intrusion minimale, est conforme à l'approche de précaution mise en avant dans les principes et les objectifs de la ZPM Endeavour. La décision d'encourager ou non certaines activités dans chaque zone devra être fondée d'une part sur les orientations de gestion élaborées pour chacune d'entre elles et résumées ci-dessous, d'autre

part sur les impacts considérés comme acceptables pour chaque zone, comme décrit dans le cadre d'examen des activités de recherche.

Objectif et orientation des zones de gestion

Salty Dawg n'est le théâtre que d'un petit nombre d'activités et cette zone d'Endeavour reste donc relativement vierge. Le plus haut niveau de précaution est par conséquent appliqué à cette zone de gestion où toute activité susceptible d'avoir un impact est interdite. La zone est considérée comme secteur hautement protégé, mais peut servir de site de recherche axé sur l'observation. On y encouragera donc les études basées sur l'observation ou d'autres méthodes d'intrusion minimale qui nous aideront à mieux comprendre les impacts environnementaux des activités humaines sur les écosystèmes des champs hydrothermaux. Toutes les autres activités seront orientées vers l'une des trois autres zones de gestion, comme on le jugera approprié.

Les activités suivantes seront encouragées à Salty Dawg :

- échantillonnages peu fréquents de l'eau (pas plus d'une fois par an) et visites d'un seul instrument de mesure (au maximum une fois par an également). Ce serait là les seules activités encouragées sur le fond océanique ou à sa proximité dans la zone de gestion Salty Dawg;
- l'imagerie acoustique du champ, en particulier la cartographie répétée permettant de mettre en évidence l'évolution du secteur;
- les études portant sur la colonne d'eau et n'ayant aucun impact sur le fond marin ou les écosystèmes benthiques ou proches du fond.

Le champ **High Rise** sera réservé aux projets centrés sur l'éducation et la sensibilisation et il sera interdit aux activités plus intrusives (p. ex. échantillonnage biologique prolongé, installation de réseaux de mouillage, etc.).

Ce champ n'a attiré que modérément les chercheurs et il en résulte que son état est plus naturel que celui des autres champs dans le secteur. High Rise est relativement vierge et possède d'impressionnants éléments naturels qui en font un sujet idéal pour l'éducation et la sensibilisation du public. La gestion du champ High Rise visera donc à concrétiser dans ce secteur les objectifs de la stratégie d'éducation et de sensibilisation conçue pour la ZPM. L'installation d'un site unique de surveillance à long terme serait notamment encouragée pour disposer d'un outil de recherche et réaliser une composante importante de cette stratégie. Les autres activités proposées pour ce secteur seront orientées vers l'une des trois autres zones de gestion, comme on le jugera approprié.

L'objectif est de gérer **les champs Mothra et Main** pour les rendre accessibles aux projets de recherche.

Ce sont les deux champs hydrothermaux les plus étudiés de la zone. Le secteur est le théâtre d'une grande variété de travaux de recherche allant de l'observation aux échantillonnages intensifs. La recherche continuera à être le principal objet visé par la gestion des champs Mothra et Main. Les activités de recherche, notamment celles mettant en jeu un échantillonnage modéré, seront encouragées à condition qu'elles restent conformes aux objectifs de conservation fixés pour la zone.

Il est nécessaire de mettre à jour les données de cartographie et de tirer parti de la plus haute qualité et de la meilleure résolution disponibles aujourd'hui pour être en mesure de contrôler et gérer correctement les activités dans les zones de gestion et les champs hydrothermaux associés. Il s'agit là d'une des toutes premières priorités pour les cinq années gouvernées par le présent plan de gestion.

Mesures d'atténuation

Les stressseurs tels que les perturbations lumineuses, sismiques et acoustiques, les débris, les structures permanentes et les échantillonnages peuvent avoir des impacts continus et cumulatifs sur l'écosystème Endeavour. Des études supplémentaires sont aujourd'hui nécessaires pour établir les niveaux de référence par rapport auxquels on pourra mesurer les impacts liés aux activités humaines. En attendant, des mesures de gestion peuvent être mises en œuvre, selon le principe de précaution, pour faire en sorte de réduire le plus possible les perturbations imposées au système par les activités de recherche. Ces mesures aideront à rassurer que les travaux effectués dans la ZPM Endeavour contribuent de manière responsable à une meilleure compréhension de l'écosystème, conformément aux objectifs de conservation de la zone. Il faut remarquer que ces mesures d'atténuation viennent s'ajouter à celles prévues par la « Déclaration d'engagement d'InterRidge concernant des pratiques de recherche responsables aux sources hydrothermales des grands fonds marins ». Conformément à l'article 44 de la *Loi sur les océans* du Canada cette déclaration d'engagement sera considérée aux fins d'approbation officielle par le MPO tel qu'elle s'applique à la ZPM Endeavour.

Règlement

1. Désignation

La région de l'océan Pacifique — le fond marin, le sous-sol et les eaux surjacentes — délimitée par une ligne tirée d'un point par 47°54'N. et 129°02'O., de là vers l'ouest jusqu'à un point par 47°54'N. et 129°08'O., de là vers le nord jusqu'à un point par 48°01'N. et 129°08'O., de là vers l'est jusqu'à un point par 48°01'N. et 129°02'O., et de là vers le sud jusqu'au point de départ.

2. Interdictions

Il est interdit :

- (a) de détériorer, détruire ou perturber, dans la zone, ou enlever de cette zone tout élément du fond marin — notamment les cheminées hydrothermales — ou du sous-sol, ou tout organisme marin vivant ou tout élément de son habitat;
- (b) d'exercer, dans la zone, toute activité sous-marine susceptible de détériorer, de détruire, de perturber ou d'enlever toute chose visée à l'alinéa a).

2.1. L'interdiction est levée si les conditions suivantes sont réunies :

- (a) la détérioration, la destruction, la perturbation ou l'enlèvement est fait dans le cadre de travaux de recherche scientifique visant la conservation, la protection et la compréhension de la zone;
- (b) un plan de recherche conforme est fourni au ministre au moins quatre-vingt-dix jours avant le début des travaux de recherche scientifique dans la zone;
- (c) toutes les licences ou autorisations exigées par la *Loi sur les océans*, la *Loi sur les pêches*, la *Loi sur la protection des pêches côtières* ou la *Loi sur le cabotage* pour effectuer les travaux de recherche scientifique ont été obtenues.

2.2. Le plan de recherche comprend les renseignements suivants :

- (a) le nom, la nationalité, la longueur totale, le tirant d'eau maximal, la jauge nette, le type de propulsion, l'indicatif d'appel, le numéro d'enregistrement et le port d'enregistrement de tout navire qui sera utilisé dans le cadre des travaux de recherche scientifique dans la zone ainsi que le nom de son capitaine;

- (b) les noms et titres de chaque personne responsable de l'élaboration des travaux de recherche scientifique et de chaque membre du personnel scientifique qui sera à bord de tout navire;
- (c) la date du début des travaux de recherche scientifique dans la zone et l'itinéraire de chaque navire pendant qu'il est utilisé dans le cadre de ces travaux;
- (d) un sommaire des travaux de recherche scientifique qui seront effectués dans la zone, accompagné d'une carte détaillée de la zone de recherche, et précisant :
 - (i) les données qui seront collectées et les protocoles d'échantillonnage qui seront utilisés,
 - (ii) les autres techniques qui seront utilisées, tel l'usage d'explosifs, de marqueurs radioactifs ou de véhicules télécommandés,
 - (iii) les équipements qui seront amarrés et les méthodes d'amarrage qui seront utilisées,
 - (iv) les substances qui seront rejetées

2.3. Il n'est pas nécessaire de fournir le plan de recherche si les renseignements visés ont déjà été fournis par écrit pour obtenir, en vertu de la *Loi sur le cabotage*, une autorisation pour effectuer les travaux de recherche scientifique.

2.4. La personne qui a fourni le plan de recherche avise sans délai le ministre par écrit de tout changement au plan.

3. L'interdiction ne s'applique pas à l'égard des activités suivantes :

- (a) les activités exercées avec des moyens ou dans des circonstances autorisés en vertu du paragraphe 35(2) de la *Loi sur les pêches*;
- (b) celles pour lesquelles une autorisation a été délivrée en vertu de la *Loi sur le cabotage*;
- (c) celles pour lesquelles une licence ou une autorisation a été délivrée en vertu de la *Loi sur les océans*, de la *Loi sur la protection des pêches côtières* ou de toute disposition de la *Loi sur les pêches* autre que le paragraphe 35(2).

4. Ne constituent pas une infraction à l'article 2 le déplacement d'un navire ou d'un sous-marin, ou l'exercice d'une activité à son bord, si, à la fois :

- (a) le déplacement est effectué, ou l'activité exercée, en vue d'assurer la sécurité publique, l'application de la Loi ainsi que la souveraineté et la sécurité nationale du Canada;
- (b) le navire ou le sous-marin, selon le cas, appartient à Sa Majesté du chef du Canada ou est exploité par elle ou en son nom ou par des forces étrangères en collaboration avec les Forces canadiennes ou sous leur commandement ou contrôle.

6.3.9.4. Exemple de la zone protégée des Açores

Référence : « Diário da República, 1^e série – N° 217 – 11 novembre 2011 », décret Législatif Régional n° 28/2011/A.: texte de loi traduit par le Bureau de traduction de l'Université de Bretagne occidentale en juin 2013

Le parc Marin des Açores a pour objectif de contribuer à la protection et à la bonne gestion des zones maritimes protégées, pour des raisons environnementales, localisées sur les mers

des Açores et dont la gestion relève de la compétence du gouvernement de la Région Autonome des Açores.

Structuration du Parc Marin des Açores

Dans sa structure et sa mission, le Parc Marin des Açores suit les orientations manifestées sur les différents documents de haut niveau qui servent de guide à la gestion de la mer, en particulier le Livre Vert et le Livre Bleu sur la Politique Maritime Européenne, la Directive n° 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin, qui établit un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique du milieu marin (Directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin »), et la Résolution du Conseil de Ministres n°163/2006 du 12 décembre, qui approuve la Stratégie Nationale pour la Mer.

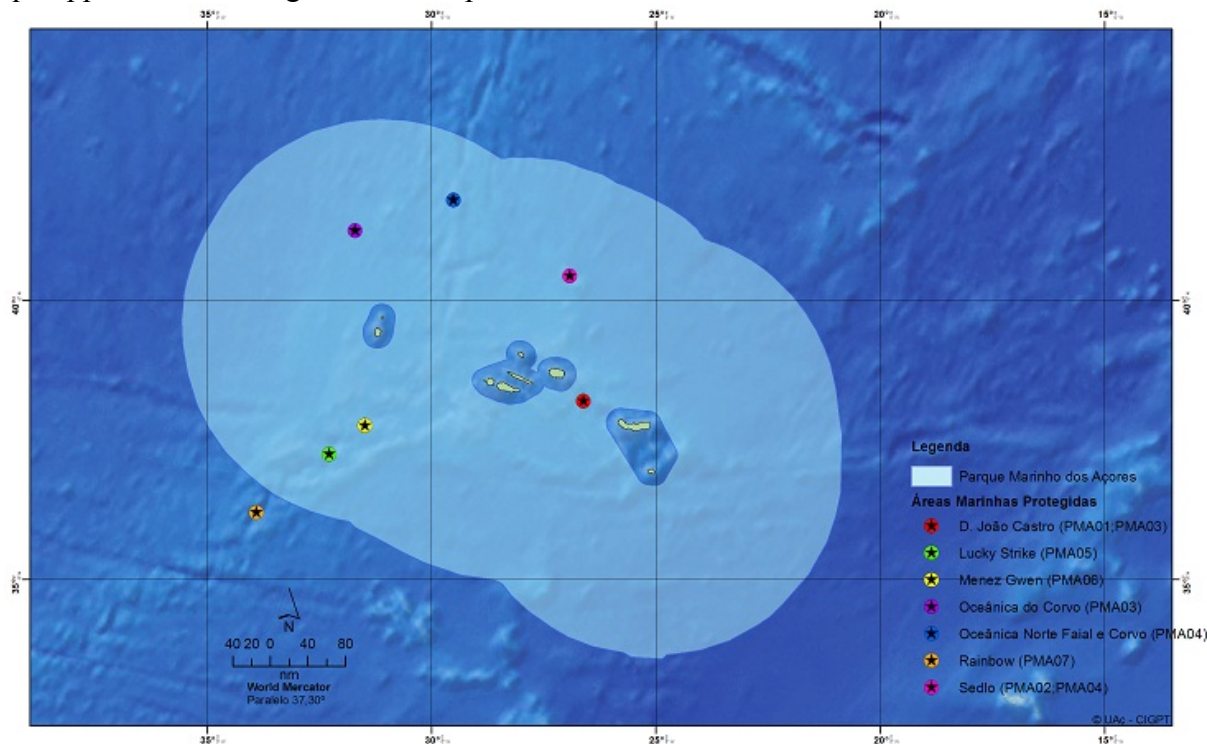


Figure 6-7 Localisation du Parc Marin des Açores (source : <http://www.azores.gov.pt>).

Intègrent le Parc Marin des Açores les aires océaniques protégées qui appartiennent à une des classes suivantes :

- (1) celles incluses dans le Réseau Natura 2000, en raison de leur classement à l'abri de la Directive n° 92/43/CEE du Conseil du 21 mai, relative à la préservation des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvages, ou de la Directive n° 2009/147/CE du Parlement Européen et du Conseil du 30 novembre, relative à la conservation des oiseaux sauvages ;
- (2) intègrent le réseau des aires marines protégées prévues sur l'annexe V de la Convention pour la Protection du Milieu Marin de l'Atlantique du Nord-Est, adoptée à Paris, dans le cadre de la réunion ministérielle des Commissions d'Oslo et de Paris le 22 septembre 1992 (Convention OSPAR), approuvée la ratification par le Décret n° 59/97 du 31 octobre, avec les modifications qui lui ont été apportées par le Décret n° 7/2006 du 9 janvier ;
- (3) les zones importantes pour les oiseaux identifiés par les processus scientifiques conduits dans le cadre du document « LIFE IBAs Marines » (LIFE04NAT/PT/000213), et

(4) d'autres zones d'intérêt du point de vue de la conservation de la nature ou de la biodiversité situées en dehors de la mer territoriale.

Le Parc Marin des Açores peut encore intégrer des aires marines qui ne sont pas incluses dans les catégories mentionnées ci-dessus, cependant importantes pour la préservation de tortues, oiseaux marins, cétacés et autres espèces pertinentes, et qui obéiront à des régimes spécifiques. Ces régimes ont l'objectif de gérer des zones et des couloirs de passage avec une importance pour la migration, l'alimentation et la reproduction des espèces qui y vivent. Dans ce sens, pourront être intégrées dans le Parc Marin des Açores de nouvelles aires marines dont l'importance sera identifiée pour la gestion de ressources limitées ou en péril ou qui méritent un statut particulier de conservation, y compris celles qui sont protégées et qui se situent sur des eaux internationales (*high seas marine protected areas* ou *HSMMPA*), qui seront placées sous gestion nationale.

Pour établir les objectifs et la mission du Parc Marin des Açores, seront spécialement prises en compte les décisions de l'annexe V de la Convention OSPAR et les principes et objectifs contenus du n° 21 au 30 de la Déclaration de Bergen, d'après la réunion ministérielle de cette organisation internationale réalisée à Bergen en septembre 2010.

Conformément au Décret Législatif Régional n° 15/2007/A du 25 juin, le Parc Marin des Açores suit les orientations de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN) quant au classement de chacune des aires protégées qui l'intègrent, ayant pour base les caractéristiques des zones à protéger et les objectifs de gestion définis.

Afin d'atteindre ses objectifs, le Parc Marin des Açores est doté d'instruments de gestion dynamiques et adaptatifs qui répond aux nouveaux défis résultant des conventions internationales que le Portugal peut souscrire et aux impératifs environnementaux ou de gestion de l'espace marin en termes de conservation de la nature qui ne sont pas encore prévisibles.

Principes

Le Parc Marin des Açores observe dans sa constitution et gestion les principes du droit international général et en particulier ceux qui figurent dans les articles 192, 193 et 194, n° 5 de la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer, et aussi les suivants :

- a) Principe de la responsabilité ;
- b) Principe de l'ajustement, extension du principe de subsidiarité ;
- c) Principe de la durabilité et de la gestion adaptative ;
- d) Principe de l'attribution de la totalité des coûts ;
- e) Principe de la coopération et de la coordination ;
- f) Principe de la prévention et de la précaution ;
- g) Principe de l'approche écosystémique ;
- h) Principe de l'opérabilité et de l'efficacité ;
- i) Principe de la participation.

Objectifs

L'objectif général du Parc Marin des Açores est celui de la conservation de la biodiversité et de la productivité biologique, y inclus la capacité écologique de support des écosystèmes de la mer sous sa juridiction, étant les objectifs spécifiques les suivants :

- a) Permettre l'exécution des dispositions de la Directive n° 92/43/CEE du Conseil du 21 mai, relative à la préservation des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvages, et de la Directive n° 2009/147/CE du Parlement Européen et du Conseil du 30 novembre, relative à la conservation des oiseaux sauvages, et respectives transpositions en droit interne, pour accomplir les obligations prévues dans le domaine de la gestion du Réseau Natura 2000 ;
- b) Contribuer à l'opérationnalisation des principes contenus dans la Convention sur la Diversité Biologique, adoptée le 20 mai 1992 par le Comité Intergouvernemental de Négociation, institué par l'Assemblée Générale des Nations Unies, ouverte à la signature le 5 juin 1992 lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, et ratifiée par le Décret n° 21/93 du 21 juin ;
- c) Garantir le bon état environnemental de l'espace maritime des Açores, conformément aux dispositions de la Directive n° 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin, qui établit un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (Directive Cadre « Stratégie pour le milieu marin »), et sa réglementation et transposition en droit interne ;
- d) Contribuer aux stratégies régionales de conservation maritime, notamment celles qui découlent des engagements assumés dans le cadre de l'annexe V de la Convention pour la Protection du Milieu Marin de l'Atlantique du Nord-est ;
- e) Protéger et préserver le milieu marin et empêcher la détérioration de ses écosystèmes, y compris le lit de la mer et les zones côtières, portant une attention spéciale aux sites qui présentent une biodiversité élevée ou des espèces d'intérêt pour la conservation de la nature et de la biodiversité ;
- f) Conserver la composition, la structure, les fonctions et le potentiel évolutif de la biodiversité marine ;
- g) Maintenir la diversité des paysages et des habitats maritimes, les espèces et les écosystèmes qui leur sont associés ;
- h) Appliquer, à moyen et long terme, les objectifs de gestion qui justifient le classement de chaque zone maritime protégée qui intègre le Parc Marin des Açores ;
- i) Protéger et garantir la gestion d'exemples significatifs des écosystèmes marins, notamment ceux associés à la dorsale médio-atlantique, tels que les sources hydrothermales et les monts sous-marins, de façon à préserver leur viabilité et les services écologiques rendus par eux ;
- j) Garantir le renfort et la promotion de l'articulation institutionnelle entre les entités locales, régionales, nationales, communautaires et internationales avec une juridiction maritime en matière de conservation de la nature et de la biodiversité ;
- k) Garantir la conservation des ressources et du patrimoine naturel marin ;
- l) Contribuer au développement durable des activités et usages spécifiques de la mer ;
- m) Garantir la minimisation des situations à risque et des impacts environnementaux, sociaux et économiques de l'activité humaine dans l'océan ;
- n) Promouvoir des politiques opérationnelles et intégrées de la mer, en visant la prévention de sa dégradation à moyen et long terme ;
- o) Contribuer à l'augmentation des connaissances scientifiques et à la production d'informations de support à la prise de décisions ;
- p) Garantir l'évaluation intégrée de politiques et d'outils de gestion.

Actes et activités interdits

- 1- Dans le Parc Marin des Açores seront interdits tous les actes et activités typifiés, conformément à la législation régionale, nationale et communautaire, ainsi qu'aux conventions et accords internationaux qui concernent la Région ou l'État Portugais.
- 2- L'introduction d'espèces exotiques ou génétiquement modifiées à l'intérieur du Parc Marin des Açores est interdite.
- 3- Dans le Parc Marin des Açores, la réalisation d'activités de recherche scientifique et de bioprospection qui ne respectent pas les principes du Code de Conduite pour une Recherche Scientifique Responsable en Haute Mer/Eaux Profondes de la Zone Maritime OSPAR (*OSPAR Code of Conduct for Responsible Marine Research in the Deep Seas and High Seas of the OSPAR Maritime Area*), approuvé par la Commission OSPAR (OSPAR 08/24/1, annexe n° 6) et modifications, est interdite.
- 4- Dans le Parc Marin des Açores, sont considérés, en termes généraux, comme actes et activités conditionnés et passibles d'autorisation préalable du service compétent en matière d'environnement, tous ceux qui comprennent l'extraction de toute ressource biologique et de minéraux marins non assujettis à une réglementation spécifique, sans préjudice des autres normes réglementaires définies par le présent document et législation applicable.

Fondements du classement en aires marines protégées

- 1- Constituent des fondements généraux pour le classement d'une zone océanique en tant qu'aire marine protégée à intégrer dans le Parc Marin des Açores, notamment :
 - a) La reconnaissance de sa rareté, représentativité, connectivité et valeur écologique ;
 - b) La productivité et diversité biologiques ;
 - c) L'importance pour les espèces et habitats marins menacés ;
 - d) Le degré de naturalité, vulnérabilité, fragilité, sensibilité et capacité de récupération des écosystèmes ;
 - e) L'importance pour les diverses phases du cycle de vie des espèces marines ;
 - f) L'intérêt pour la recherche scientifique et pour la régulation de l'accès aux ressources génétiques et à la bioprospection.
- 2- Sans préjudice des fondements généraux mentionnés au numéro précédent, constituent des fondements spécifiques pour le classement des aires qui intègrent le Parc Marin des Açores les suivants :
 - a) L'adoption de mesures destinées à la protection de structures sous-marines, ainsi que des ressources, des communautés et des habitats marins sensibles ;
 - b) L'adoption d'un régime spécifique et modèle de gestion pour les structures sous-marines classées ou à classer dans l'archipel des Açores, aux termes définis sur le présent document, dans le but d'assurer la maintenance et la préservation de la biodiversité marine et de garantir la poursuite des mesures de protection, valorisation et usage durable des ressources marines, par le biais de l'intégration harmonisée des activités humaines et des études scientifiques.

Inclusion d'aires marines protégées

- 1- Sans préjudice des dispositions de l'article 26, intègrent le Parc Marin des Açores les aires marines protégées situées sur la Mer des Açores, auxquelles se réfèrent l'article 4 du Décret Législatif Régional n° 29/2010/A du 9 novembre, ainsi que les aires marines protégées situées sur la plateforme continentale, au-delà des 200 milles nautiques, aux termes reconnus par la Convention OSPAR ou par d'autres organisations internationales desquelles l'Etat Portugais fait partie.
- 2- Quand elles sont situées en dehors de la mer territoriale, intègrent le Parc Marin des Açores :
 - a) Les zones spéciales de conservation (ZEC) marines et les sites marins figurant sur la liste actualisée des sites d'importance communautaire (SIC) de la région biogéographique macaronésienne, approuvés dans le cadre de la gestion du Réseau Natura 2000 ;
 - b) Les zones définies en tant qu'aires marines protégées dans le cadre de la Convention OSPAR ;
 - c) Les zones identifiées en tant qu'aires importantes pour les oiseaux marins (*Important bird area* ou IBA) ;
 - d) Les autres aires importantes pour la conservation de la nature définies dans le présent document.
- 3- Seront considérées comme faisant partie du Parc Marin des Açores les aires situées sur la plateforme continentale au-delà des 200 milles nautiques, en conformité avec les décisions prises dans ce cadre par l'Etat Portugais et reconnues par les organisations internationales compétentes.

Aires marines protégées transitoires

- 1- Par ordonnance du Gouvernement Régional compétent en matière d'environnement, des aires marines protégées à caractère transitoire peuvent être définies, sous les fondements qui figurent sur l'article 5.
- 2- L'ordonnance à laquelle se réfère le numéro précédent doit indiquer les objectifs, les limitations d'utilisation, la période de classement, les limites géographiques et, quand cela est applicable, la cartographie et la base cartographique.
- 3- La période en vigueur mentionnée au numéro précédent ne peut pas être supérieure à deux ans et sera renouvelable pour un an.

Quand la protection d'une aire marine a comme fondement la protection de ressources halieutiques ou interfère de façon significative, directe ou indirectement, avec l'activité de la pêche, l'ordonnance référée au n° 1 est de la compétence conjointe des membres du Gouvernement Régional compétents en matière de pêche et environnement.

Catégories des aires marines protégées

- 1- Le Parc Marin des Açores intègre des aires marines protégées qui sont classées dans les catégories suivantes :
 - a) Réserve naturelle marine – équivalente à la catégorie IUCN I ;
 - b) Aire marine protégée pour la gestion d'habitats ou d'espèces – équivalente à la catégorie IUCN IV ;
 - c) Aire marine protégée pour la gestion de ressources – équivalente à la catégorie IUCN VI.
- 2- Les catégories des aires protégées sont celles qui figurent sur ce document.

Objectifs de gestion des aires marines protégées

- 1- Les aires marines protégées qui sont classées en tant que réserve naturelle marine suivent les objectifs de gestion suivants :
 - a) Préservation d'habitats, écosystèmes et espèces dans un état favorable ;
 - b) Maintenance de processus écologiques ;
 - c) Protection des caractéristiques structurelles du paysage marin et de ses éléments géologiques ;
 - d) Préservation d'exemples de l'environnement marin naturel pour l'étude scientifique, la surveillance et l'éducation environnementale ;
 - e) Conservation des conditions naturelles de référence pour des travaux scientifiques et des projets en cours ;
 - f) Définition de limites et conditionnement au libre accès public.
- 2- Les aires marines protégées classées en tant qu'aire marine protégée pour la gestion d'habitats ou espèces sont régies par les objectifs de gestion qui suivent :
 - a) Assurer les conditions de référence des habitats nécessaires à la protection d'espèces importantes, groupes d'espèces, communautés biotiques ou caractéristiques physiques de l'environnement marin, à chaque fois que celles-ci nécessitent une intervention humaine pour optimiser leur gestion ;
 - b) Contrôler les usages et activités qui peuvent constituer une menace à la durabilité d'habitats ou d'espèces ;
 - c) Renforcer les bénéfices socio-économiques qui résultent de la pratique d'activités dans le cadre de l'aire marine protégée, lorsqu'elles sont compatibles avec les objectifs de gestion de celle-ci ;
 - d) Promouvoir la recherche scientifique et le suivi de l'environnement en tant qu'activités indispensables à la gestion durable ;
 - e) Créer et délimiter des aires marines destinées au savoir et à la diffusion des caractéristiques des habitats à protéger.
- 3- Les aires marines protégées classées en tant qu'aire marine protégée pour la gestion de ressources sont régies par les objectifs de gestion suivants :
 - a) Promouvoir la gestion effective tenant compte de l'usage durable des ressources, notamment la pêche et autres activités extractives avec incidence sur la biodiversité ou les conditions environnementales ;
 - b) Protéger la maintenance de la biodiversité et d'autres valeurs naturelles à long terme ;
 - c) Contribuer au développement socio-économique durable.

Limites des aires marines protégées

- 1- Les limites des aires qui intègrent le Parc Marin des Açores sont décrites et fixées sur l'annexe I et représentées dans la lettre simplifiée de l'annexe II, qui constituent des annexes du présent document et qui en font partie.
- 2- Tous les doutes d'interprétation suscités par la lecture de la lettre simplifiée à laquelle se réfère l'annexe II peuvent être éclaircis en consultant le département de l'administration régionale autonome compétente en la matière ou le portail Internet du Gouvernement Régional des Açores.
- 3- Le département de l'administration régionale autonome compétent pour les questions liées à la mer maintient des informations actualisées permettant de compléter la lecture de la lettre simplifiée figurant sur l'annexe II.

Réserves naturelles marines

Intègrent le Parc Marin des Açores sous la catégorie de réserve naturelle marine :

- a) La Réserve Naturelle Marine du Banc D. João de Castro (*Reserva Natural Marinha do Banco D. João de Castro*);
- b) La Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Menez Gwen (*Reserva Natural Marinha do Campo Hidrotermal Menez Gwen*);
- c) La Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Luck Strike (*Reserva Natural Marinha do Campo Hidrotermal Lucky Strike*) ;
- d) La Réserve Naturelle Marine du Mont Sous-marin Sedlo (*Reserva Natural Marinha do Monte Submarino Sedlo*).

Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike

- 1- Constituent des fondements spécifiques au classement des Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike les caractéristiques uniques de leurs habitats, la productivité, les valeurs géologiques et naturelles présentes et l'importance des zones pour les espèces, habitats et écosystèmes protégés.
- 2- Les Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike, mentionnées à l'alinéa b) de l'article 11, sont classées en fonction des objectifs de gestion présentés au numéro 1 de l'article 9 et des objectifs spécifiques suivants :
 - a) Contribuer à assurer la biodiversité, par le biais de la conservation des habitats naturels de la faune sauvage dans un état de conservation favorable ;
 - b) Augmenter le savoir scientifique lié aux processus qui régulent le fonctionnement des sources hydrothermales de grande profondeur ;
 - c) Réduire des conflits potentiels entre les utilisateurs de l'aire marine ;
 - d) Promouvoir l'éducation environnementale par le biais de la promotion du savoir et des valeurs naturelles présentes, en défendant les pratiques de conservation;
 - e) Favoriser les activités économiques durables et amies de l'environnement de façon à privilégier les bénéfices issus de cette aire, en particulier pour l'économie et les institutions scientifiques des Açores.
- 3- Sans préjudice des dispositions du n° 4, dans les Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike sont interdits les actes et activités suivants :
 - a) Toutes les activités de pêche, à l'exception de la pêche dirigée aux espèces épipélagiques migratoires ;
 - b) L'exploration de ressources qui demande l'emploi de techniques invasives sur le fond marin et écosystèmes associés, y inclus l'exploration minérale, d'hydrocarbures et d'autres composés riches en énergie, énergie géothermique et activités à but biotechnologique ;
 - c) L'installation de structures pour la production d'énergie ;
 - d) Le dépôt de tout matériel qui impacte le paysage sous-marin et le fonctionnement des écosystèmes benthiques ;
 - e) L'utilisation d'armes, de produits toxiques ou polluants, ou d'explosifs qui peuvent endommager ou perturber les espèces existantes ;
 - f) L'introduction de bruit dans le milieu aérien ou subaquatique qui peut causer des perturbations dans les peuplements d'oiseaux marins ou de cétacés ;
 - g) La réalisation de toute activité qui perturbe l'équilibre naturel.

- 4- Dans les Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike sont conditionnés et assujettis à l'autorisation préalable du directeur du Parc Marin des Açores les actes et activités qui suivent:
 - a) La recherche scientifique et la surveillance environnementale, y compris la capture de spécimens ;
 - b) La collecte d'échantillons biologiques et géologiques ;
 - c) Les visites et les activités touristiques dans la nature ;
 - d) Le tournage de films à but commercial ou publicitaire ;
 - e) L'installation de câbles sous-marins de communications ou de transmission d'énergie, conduits de gaz, hydrocarbures ou autres ;
 - f) La prospection de ressources minérales, biologiques ou énergétiques qui demandent l'emploi de techniques invasives qui peuvent affecter les fonds marins et les écosystèmes associés;
 - g) Lancer des ancres.
- 5- Pour garantir les objectifs de gestion mentionnés à l'alinéa a) du n° 2, par ordonnance conjointe des membres du Gouvernement Régional compétent en matière d'environnement, de questions liées à la mer et à la pêche, des zones de protection intégrale ou d'autres normes d'organisation applicables sur le territoire des Réserves Naturelles Marines des Champs Hydrothermaux Menez Gwen et Lucky Strike peuvent être définies, pouvant être concentrées sur les fonds sous-marins ou une partie ou sur toute la colonne d'eau couvrante.
- 6- La Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Menez Gwen intègre dans son cadre les objectifs et limitations territoriales définies pour le site d'intérêt communautaire Menez Gwen (code PTMAZ0001) et la Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Lucky Strike intègre dans son cadre les objectifs et limitations territoriales définies pour le site d'intérêt communautaire Lucky Strike (code PTMAZ0002), conformément à l'annexe de la Décision de la Commission n° 2009/1001/UE du 22 décembre, qui adopte, en application de la Directive n° 92/43/CEE du Conseil, la deuxième liste actualisée des sites d'importance communautaire de la région biogéographique macaronésienne, et les objectifs résultants du classement en tant qu'Aire Marine Protégée OSPAR Champ Hydrothermal Menez Gwen (O-PT-020006) et du classement en tant qu'Aire Marine Protégée OSPAR Champ Hydrothermal Lucky Strike (O-PT-020005).
- 7- Les limitations territoriales de la Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Menez Gwen sont représentées sur l'annexe II par le sigle PMA02 et celles de la Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Lucky Strike sont représentées sur l'annexe II par le sigle PMA03.

Aires marines protégées situées sur la plateforme continentale au-delà des 200 milles nautiques

- 1- Intègrent le Parc Marin des Açores les aires marines protégées situées sur la plateforme continentale au-delà des 200 milles nautiques suivantes :
 - a) L'Aire Marine Protégée du Champ Hydrothermal Rainbow, dans la catégorie de réserve naturelle marine ;
 - b) L'Aire Marine Protégée du Mont Sous-marin Altair, dans la catégorie d'aire marine protégée pour la gestion d'habitats ou d'espèces ;
 - c) L'Aire Marine Protégée du Mont Sous-marin Antialtair, dans la catégorie d'aire marine protégée pour la gestion d'habitats ou d'espèces ;

- d) L'Aire Marine Protégée du MARNA, dans la catégorie d'aire marine protégée pour la gestion d'habitats ou d'espèces ;
- 2- Outre les objectifs qui seront fixés dans le cadre de la Convention OSPAR et d'autres instruments multilatéraux importants pour la gestion des aires océaniques en haute mer, les aires marines protégées mentionnées au numéro précédent sont régies par les objectifs figurant sur la Recommandation OSPAR 2003/3 concernant un réseau de zones marines protégées, adoptée lors de la réunion de la Commission OSPAR réalisée à Bremen du 23 au 27 juin 2003 (OSPAR 03/17/1, annexe n° 9), modifiée par la Recommandation OSPAR 2010/2 (OSPAR 10/23/1, annexe n° 7), et sont classées en fonction des objectifs de gestion présentés aux numéros 1 et 2 de l'article 9 et des objectifs spécifiques suivants, déterminés dans le contexte de la Convention OSPAR :
 - a) Prévenir la dégradation et les dommages infligés aux espèces, habitats et processus écologiques, suivant le principe de la précaution ;
 - b) Protéger et préserver des zones plus représentatives de la diversité des espèces, habitats et processus écologiques présents dans la région de l'Atlantique Nord-est où est applicable la Convention OSPAR.
- 3- Relativement aux aires marines protégées indiquées au n° 1 et à d'autres qui, par décision des organismes nationaux et internationaux compétents soient créés sur la plateforme continentale au-delà des 200 milles nautiques et placées sous la gestion de la Région Autonome des Açores, le Parc Marin des Açores devra exercer les compétences et attributions qui seront déterminées par l'entité compétente pour le classement ou qui dérivent de l'application du droit international général et en particulier de la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer, approuvée par la Résolution de l'Assemblée de la République n° 60-B/97 du 14 octobre.
- 4- Sans préjudice des normes qui seront fixées pour la gestion de la colonne d'eau, aux termes du numéro antérieur, dans les fonds marins subjacents aux aires marines protégées ne pourra pas être autorisée, financée ou supportée par des entités siégeant dans la Région Autonome des Açores toute activité de nature extractive ou qui résulte en une perturbation des écosystèmes benthiques et des espèces benthiques y existants.

Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Rainbow

- 1- Constituent des fondements spécifiques pour le classement de la Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Rainbow, mentionnée à l'alinéa a) du n° 1 du précédent article, les caractéristiques uniques de ses habitats, les valeurs géologiques et naturelles existantes et les objectifs de conservation inhérents au classement en tant qu'aire marine protégée dans le cadre de la Convention OSPAR Champ Hydrothermal Rainbow (O-PT-020007).
- 2- Les limitations territoriales de la Réserve Naturelle Marine du Champ Hydrothermal Rainbow sont celles qui ont été fixées par les organismes compétents de la Convention OSPAR sur le document OSPAR 07/6/6-E et sont représentées à l'annexe II par le sigle PMA04.

Gestion du Parc Marin des Açores

- 1- Le Parc Marin des Açores est doté d'un service de nature exécutive et opérationnelle, dont la mission est de garantir la gestion de ce dernier conformément aux principes et objectifs généraux définis sur le présent document, ainsi que de garantir l'application des objectifs de gestion spécifiques qui président au classement des catégories des aires marines protégées qui l'intègrent.

- 2- Sans préjudice de ce qui est établi sur les articles suivants, le service indiqué au numéro précédent est défini par la loi organique du département de l'administration régionale autonome compétent, qui fixe sa structure et ses attributions.
- 3- Le Parc Marin des Açores siège sur l'île de Faial.

Instruments de gestion du Parc Marin des Açores

Le Parc Marin des Açores est régi par le présent document, il sera donc établi sur le Plan d'Aménagement et de Gestion de l'Espace Maritime des Açores (*POEMA*) et sur les autres normes nationales, communautaires et de droit international applicables.

Plan d'Aménagement et de Gestion de l'Espace Maritime des Açores

Le Plan d'Aménagement et de Gestion de l'Espace Maritime des Açores (*POEMA*) inclura les aires marines protégées auxquelles se réfère l'article 6 et qui intègrent le Parc Marin des Açores, en tenant compte des limites territoriales qui ont été fixées.

Approuvé par l'Assemblée Législative de la Région Autonome des Açores, à Horta, le 28 septembre 2011.

6.3.10. Forces et faiblesses du plan de gestion environnementale de la zone Clarion-Clipperton

La zone Clarion-Clipperton est localisée dans le Pacifique au sud, sud-ouest des îles d'Hawaï. Cette zone contient une importante quantité de nodules polymétallique dont l'intérêt économique s'est développé dans les années 1960. En 2011, sur une zone d'environ $4,5 \times 10^6$ km² et entre 4000 m et 6000 m de profondeur, huit contractants y avaient déposés des permis d'exploration, totalisant une surface totale de 520 000 km². Face à l'éventualité d'une extraction minière dans cette zone, l'AIFM a proposé en 2011, pour cette zone, un plan de gestion environnemental. Ce plan vise à faciliter l'exploitation de la zone tout en y protégeant les écosystèmes profonds qui y sont retrouvés et ainsi à répondre aux obligations internationales liées à la protection de la biodiversité (établissement d'aires marines protégées, arrêt de la perte de biodiversité - sommet de Johannesburg, 2002). Aucune date d'implantation de ce plan de gestion environnementale n'est prévue ; sa révision doit être réalisée périodiquement (tous les 2 à 5 ans).

Une des principales mesures de ce plan est la désignation d'aires d'intérêt environnemental particulier visant la protection et la préservation de l'ensemble des écosystèmes caractéristiques de la zone Clarion-Clipperton. Ce plan est complété par la mise en avant d'objectifs de gestion et d'objectifs opérationnels de protection de l'environnement pour l'ensemble de la zone Clarion-Clipperton, les zones sous contrats et les zones d'intérêt environnemental particulier.

Lors de sa dix-huitième session en juillet 2012, le Conseil de l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) approuvait le plan de gestion de l'environnement de Clarion-Clipperton suivant les recommandations émises par la Commission Juridique et Technique (CJT). Ce plan de gestion introduit une série de recommandations en matière de gestion de l'environnement à l'intention des contractants de permis d'exploration et *in fine* d'exploitation telles que le respect de normes ou codes conduites, en particulier la norme *ISO 14001 - Management Environnemental* et le *Code de gestion des travaux miniers sous-marins dans le*

respect de l'environnement, adopté par l'International Marine Minerals Society en 2001. La principale innovation du plan de gestion de l'environnement réside néanmoins dans la création de neuf zones témoins de préservation autorisant une gestion spatialisée à l'échelle régionale de la zone des fractures de Clarion-Clipperton, sous la responsabilité de l'AIFM et non des contractants.

En effet, les mesures de préservation de l'environnement définies par le code minier se base sur la création de zones témoins d'impact et de zones témoins de préservation par les contractants eux-mêmes, dans le périmètre de leurs concessions. Des règles fondamentales de création et de gestion de ces zones témoins, telles que la représentativité, la connectivité, la taille et la distance aux zones exploitées, ne sont pas précisées par le code minier. Or, bien que les risques liés à la dispersion et au dépôt de particules fines au cours de l'exploitation soient mal connus, ils pourraient diffuser l'impact dans un rayon de 100 km au-delà de la zone exploitée (Glover and Smith, 2003). L'empreinte environnementale d'une exploitation des nodules polymétalliques pourrait ainsi atteindre une surface de l'ordre de 50 000 km². Les risques de contamination d'une zone témoin sont par conséquent élevé et la cohérence d'un réseau de zones témoins à l'échelle de Clarion-Clipperton n'est pas assurée par les dispositions du code minier.

Ces constatations ont amené un groupe de scientifiques à proposer en 2008 une stratégie de gestion de l'environnement à l'échelle de la zone Clarion-Clipperton, par la création de neuf zones témoins de préservation, constituées d'un cœur de 200 km de côté, et d'une zone tampon de 100 km, soit des zones de 400 km de côté (Smith et al, 2008b). Scientifiquement, le nombre, la localisation et la taille des zones de préservation tient compte des connaissances actuelles sur la structure, le fonctionnement et la dispersion de la faune abyssale. En particulier, le découpage de la zone de Clarion-Clipperton en neuf sous-unités de gestion tient compte des gradients latitudinaux et longitudinaux de production primaire de surface, ceux-ci structurant fortement les communautés benthiques abyssales (Smith et al, 2008a). La taille des zones a été définie en considérant que la capacité de dispersion des espèces benthiques était inférieure ou égale à 100 km (Kinlan and Gaines, 2003) et la taille efficace d'une zone protégée égale à deux fois la distance de dispersion (Botsford et al, 2001).

Cette proposition a été soumise à l'AIFM et discutée au sein de la CJT jusqu'à aboutir au plan de gestion de l'environnement adopté par le Conseil. La proposition initiale a été modifiée par la CJT, en particulier la localisation des neuf zones de préservation, afin que celles-ci n'empiètent ni sur les permis d'exploration ni sur les zones réservées (Figure 6-8). Une conséquence notable est que ces zones témoins se situent toutes en périphérie et aucune au centre de la zone de gestion. Très peu si ce n'est aucune donnée biologique n'est par ailleurs disponible pour ces zones (l'AIFM encourage les contractants et la communauté scientifique à acquérir des données sur ces zones témoins mais n'a pas les moyens de l'imposer), leur représentativité ne peut donc être validée en l'état actuel des connaissances.

Malgré ces faiblesses, l'adoption de ce plan par le Conseil de l'AIFM valide la démarche d'une gestion de l'environnement à l'échelle régionale et sous l'autorité directe de l'AIFM. Elle souligne également l'importance de définir un tel plan aussi précocement que possible, avant qu'une majorité de la zone à gérer ne soit couverte par des concessions ou zones réservées. Elle crée ainsi un précédent qui pourrait permettre d'optimiser la gestion des autres ressources minérales telles que les sulfures polymétalliques ou les encroûtements cobaltifères pour lesquels une gestion spatialisée à échelle régionale serait également nécessaire (Van Dover et al., 2012).

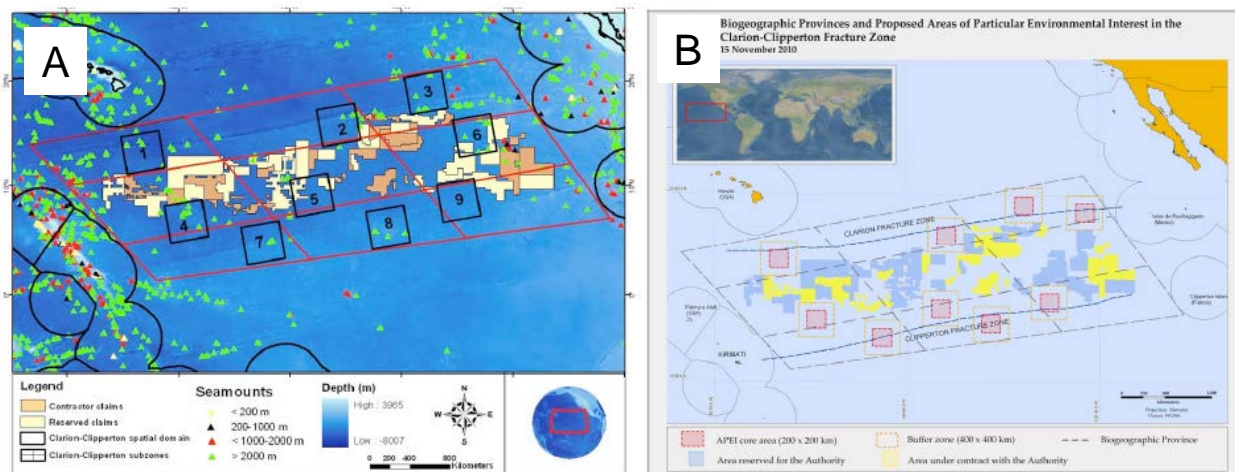


Figure 6-8 Localisation des neuf zones témoins de préservation dans la zone de Clarion-Clipperton, A) d'après la proposition originale (Smith et al, 2008b), B) dans le plan de gestion de l'environnement recommandé par la CJT (ISBA/17LTC/7) et adopté par le Conseil de l'AIFM.

6.4. Stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux - quelques exemples

6.4.1. Introduction

Aucune exploitation de ressources minérales profondes n'a encore débuté. Seuls des projets d'exploration sont en cours. Il n'existe donc pas de suivis des impacts environnementaux liés à des exploitations (mis à part à l'état de projet pour le cas de Nautilus en Papouasie Nouvelle Guinée) et les quelques suivis existants liés à l'exploration sont pour la plupart confidentiels. C'est pourquoi, ce sous-chapitre s'est intéressé à d'autres types d'exploitation de ressources marines afin de comprendre les stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux suivies et d'identifier la pertinence de ces stratégies pour le cas de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Les quatre cas choisis sont les granulats marins, l'éolien marin posé, l'offshore pétrolier profond et la pêche profonde. Bien que les granulats marins et l'éolien marin posé soient localisés dans les eaux peu profondes, ces deux types d'exploitation présentent des similarités avec l'exploitation minière. L'exploitation des granulats marins est ainsi régie par le même code que les ressources minérales marines profondes – le code minier – et le début de leur exploitation industrielle remonte aux années 1980. Ses impacts sur l'environnement sont ainsi bien connus et les stratégies de suivi environnemental bien établies.

L'exploitation des énergies marines renouvelables est quant à elle dans sa phase de maturation industrielle et présente ainsi un panel de comparaisons intéressant en termes d'élaboration des stratégies de suivi environnemental.

La pêche profonde et l'offshore pétrolier profond concernent les milieux profonds. La pêche profonde est un cas assez différent des autres puisque l'exploitation touche à des ressources mouvantes et vivantes. Les pêcheries profondes impactent notamment les écosystèmes profonds et les méthodes de gestion actuellement définies, ou en cours de définition, prennent en compte ces écosystèmes. Cet exemple souligne également la complexité de mise en œuvre de la réglementation au niveau européen. L'offshore pétrolier profond fait, quant à lui, l'objet de suivis environnementaux de routine; cette mise en regard permettra de comparer les stratégies entre l'exploitation d'une ressource potentielle et d'une ressource largement

exploitée (les parties sur l'offshore pétrolier ont été rédigées par Total Exploration et Production).

Pour chaque étude de cas seront présentés :

- Le contexte général,
- Le cadre réglementaire associé,
- L'évaluation et le suivi des impacts environnementaux : état initial, principaux impacts connus, suivi environnemental comprenant les indicateurs choisis et les protocoles utilisés, les mesures pour éviter-réduire-compenser. Cette partie sera orientée vers les mesures de gestion pour le cas de la pêche profonde,
- Les difficultés de mise en œuvre éventuelles,
- Les organismes impliqués dans l'évaluation et le suivi des impacts environnementaux.

6.4.2. Contexte

6.4.2.1. *Les granulats marins*

Le terme de granulats marins désigne des matériaux minéraux qui sont extraits du fond de l'océan. Parmi les substances minérales extraites en France, les granulats tiennent, en quantité, la deuxième place après l'eau. Leur extraction industrielle a débuté dans les années 1980. Les substances sous-marines extraites actuellement en France sont les sables siliceux et calcaires et les algues calcaires (maërl - dont l'arrêt de l'extraction est programmé fin 2013). L'inventaire national des matériaux marins (1969-1980), conduit en zones côtières, avait permis d'évaluer à environ 33 milliards de mètres cubes le volume de sédiments meubles disponibles. Plus récemment, ce potentiel a été réévalué, pour les façades mer du Nord, Manche et Atlantique, à 395 milliards de mètres cubes.

Si les ressources sont abondantes, les réserves exploitables démontrées sont beaucoup plus faibles et tiennent compte de différents paramètres :

- la profondeur d'eau accessible aux navires sabliers (dragues), actuellement 50 m environ ;
- la présence d'activités humaines (pêche, câbles, routes maritimes, zones de la défense nationale) ;
- l'existence de secteurs réservés, reconnus comme essentiels à l'équilibre écologique du milieu marin (frayères, flore et faune benthiques assurant le renouvellement de la nourriture des espèces commerciales, nourriceries) ou des secteurs réservés à la Défense ;
- l'existence de secteurs protégés en vertu de dispositions européennes et nationales (ZNIEFF, Natura 2000, AMP) qui contraignent cette extraction;
- la nature des sédiments, qui doivent pouvoir être utilisés directement, sans rejet.

Toutes ces contraintes, qui sont évolutives dans le temps, limitent les réserves à environ 2 % du volume inventorié des ressources.

6.4.2.2. *Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé*

A l'heure actuelle, sept grands types d'énergies marines renouvelables sont répertoriés (Boye et al, 2013) :

- l'énergie marémotrice, issue de la marée (marnages importants des baies et estuaires);
- l'énergie hydrolienne (ou hydrocinétique), issue des courants générées par les marées ;
- l'énergie houlomotrice, issue des vagues et de la houle ;
- l'énergie thermique des mers (ETM) qui exploite la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes (régions tropicales);
- l'énergie osmotique qui utilise la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce ;
- la biomasse marine, issue de la culture et/ou de l'exploitation des macro- et des micro-algues.
- l'éolien «flottant» et «posé» qui utilise l'énergie issue du vent marin en énergie électrique.

L'éolien «posé» repose sur une structure enfoncée dans le fond marin. Il est plutôt installé dans des eaux peu profondes (jusqu'à 30 m de fond) et à moins de 30 km de la côte.

L'éolien « flottant » s'ancre quant à lui sur le fond marin au moyen de flotteurs ou support (câbles ancrés dans le sol). Il est retrouvé dans des zones plus profondes (en général plus de 50 m et actuellement jusqu'à 200 mètres de profondeur).

La plupart des infrastructures associées à ces techniques doivent être raccordés par des câbles sous-marins à la côte pour transporter l'électricité jusqu'au réseau électrique terrestre.

Les éoliennes posées en mer constituent aujourd'hui la seule énergie marine parvenue à la phase industrielle, c'est donc sur ce type d'énergie marine renouvelable que se penchera la présente étude de cas.

Cas de l'éolien posé en mer

Les leaders en terme d'éolien en mer posé sont actuellement l'Angleterre, le Danemark, la Belgique et l'Allemagne. Ces pays disposent de vastes plateaux continentaux et donc de larges possibilités d'installation d'éoliennes offshore. Le premier parc danois a vu le jour il y a une vingtaine d'années (nom du parc : Vindeby ; 1991). Le plus important parc éolien au monde est actuellement installé à environ 20 km des côtes du Royaume-Uni. Fin 2012, il existait 1 662 éoliennes offshore en Europe réparties sur 55 parcs éoliens (EWEA, 2012).

La France n'a pas encore de parc éolien en mer mais possède environ 11 millions de km² sous sa juridiction (c'est la 2^{ème} ZEE en taille après celle des Etats-Unis). Le potentiel éolien est donc fort bien que la profondeur du plateau continental de la France freine son développement (une profondeur de 30 m est rapidement atteinte). Ce frein est aussi dû aux nombreuses contraintes réglementaires et sociétales associées aux sites d'exploitation : conflits d'usage, particularités réglementaires sur le domaine public maritime et coûts des investissements notamment (Ministère de l'Écologie, 2010). Plusieurs projets sont cependant en cours et deux appels d'offre de l'Etat ont été lancés en 2011 et 2013 pour six parcs éoliens en mer (représentant 3000 MW). Les parcs éoliens (ou ferme éolienne) seront installés dans la mer territoriale et dans la zone contiguë avec une centaine d'éoliennes posées par parc (machines de 5 à 6 MW).

6.4.2.3. *La pêche profonde*

Les toutes premières pêches dépassant 200 m de profondeur ont vu le jour dès 1920. A partir de 1960, les chalutiers avaient la possibilité de pêcher à plus de 700 m de profondeur. Cependant, c'est la raréfaction de certaines espèces côtières dans les années 80, les importants progrès techniques (sondeur, GPS, plus grande longueur de câble) et le développement de la commercialisation de poissons sous forme de filets qui ont été les éléments permettant au monde de la pêche d'aller pêcher plus profond. A la fin des années 1990, certaines populations dites « profondes » présentaient déjà des signes de déclin. Actuellement, il existe peu de pêche au-delà de 1500 m. Elle reste en effet très coûteuse (temps important de descente et remontée des chaluts) et les abondances des ressources y sont faibles. Il n'y a pas de pêche commerciale au-delà de 2000 m ni sur les plaines abyssales.

La définition des « pêches profondes » n'est pas universelle et varie selon les régions, les organisations et les pays (Large et al, 2013). L'Organisation mondiale pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) définit ainsi comme profondes les eaux à des profondeurs de plus de 200 m alors que le Conseil International pour l'Exploration de la MER (CIEM) utilise une limite à 400 m. De plus, certaines espèces considérées comme des espèces démersales du plateau continental sont retrouvées et pêchées jusqu'à 600 voire 1000 m de profondeur. L'unique critère bathymétrique est donc insuffisant pour qualifier les pêches profondes. Une approche par espèce, telle que suivie par l'Union européenne, semble être à privilégier bien que la définition même des termes « pêche profonde » soit encore à l'étude.

Actuellement, les pêches profondes dans les eaux européennes sont légalement définies par une liste de 24 espèces capturées dont 17 requins. Dans les eaux européennes, seuls les navires disposant d'un permis de pêche en eaux profondes sont autorisés à débarquer ces espèces (règlement (CE) N° 2347/2002 du Conseil du 16 décembre 2002). Les principales espèces débarquées par les chalutiers français disposant d'un tel permis sont le grenadier de roche, le sabre noir et la lingue bleue.

Les espèces profondes sont regroupées en deux catégories selon le Conseil International pour l'Exploration de la Mer (ICES, 2005) :

- les espèces à croissance lente et à maturité tardive (empereur, grenadier de roche, requins profonds) ;
- les espèces à croissance relativement rapide et à maturité relativement précoce (sabre noir, lingue bleue).

Ces catégories impliquent des niveaux de sensibilité à l'exploitation et des seuils de précaution différents.

La pêche profonde française s'exerce essentiellement au chalut dans l'Atlantique Nord-Est, dans les eaux communautaires à l'Ouest des îles britanniques. Il n'y a pratiquement pas de pêche profonde française dans les eaux internationales. Dans l'Atlantique Nord, il y a d'importantes pêcheries de flétan noir, grenadier de roche, grenadier de vase et de sébaste du nord qui sont exploitées principalement au chalut dans les eaux internationales. Dans les eaux internationales du Nord-Est Atlantique, les navires qui pratiquent ces pêches sont principalement espagnols et portugais.

Les problématiques récurrentes auxquelles doit faire face la pêche profonde sont :

- la surexploitation,
- les rejets : capture d'espèces non commercialisables rejetées mortes à la mer,

- les captures accidentelles d'espèces protégées, notamment les requins profonds
- les impacts de la pêche sur les écosystèmes marins vulnérables.

6.4.2.4. *L'offshore pétrolier profond*

Depuis les années 1950, l'exploitation des hydrocarbures en offshore s'est développée face à l'augmentation de la demande énergétique. À la suite du choc pétrolier de 1973, cette solution apparaît, pour certains pays, comme un moyen de réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis des États du Moyen-Orient.

Le Royaume-Uni et la Norvège sont les premiers à se lancer dans le développement de techniques de forage et de production offshore dans les années 70 en mer du Nord.

Malgré les coûts engendrés par la mise en œuvre d'installations en mer, la part des gisements offshore dans la production pétrolière mondiale est passée de 10 % en 1960 à 30 % en 2010. On comptait près de 600 plates-formes pétrolières offshore dans le monde en 2012.

Les techniques de forage et de constructions ayant évolué (500 mètres à la fin des années 1970, plus de 2 500 m de profondeur dans les années 2000), les grandes profondeurs d'eau (>1000 m) sont maintenant accessibles et exploitables : elles ne représentaient que 3 % de la production mondiale en 2012 mais connaissent un développement rapide.

6.4.3. Réglementation

6.4.3.1. *Introduction*

Le cadre réglementaire d'exploitation de ressources dépend de leur localisation : le domaine public maritime, la ZEE ou la haute mer. Tandis que l'exploitation des granulats marins, des énergies marines renouvelables et de l'offshore pétrolier profond ont lieu exclusivement sur le domaine public maritime et dans la ZEE, la pêche profonde et les ressources minérales marines profondes sont pratiqués dans la ZEE et en haute mer (Tableau 6-3).

La recherche et l'exploitation des substances minérales contenues dans les fonds marins français sont des activités strictement réglementées, qui relèvent du code minier et du code de l'environnement.

Tableau 6-3 Localisation des exploitations des ressources liées aux granulats marins, aux énergies marines renouvelables (éolien posé) et à l'offshore pétrolier profond.

	Zones sous juridiction nationale	La haute mer
Granulats marins	Oui (surtout sur le Domaine Public Maritime)	Non
Energies marines renouvelables	Oui (surtout dans la mer territoriale sur le domaine public maritime (12 miles) et la zone contigüe (entre 12 et 24 miles))	Non
Offshore pétrolier profond	Oui	Non
Pêche profonde	Oui	Oui

6.4.3.2. *Les granulats marins*

La loi n°76-646 du 16 juillet 1976 modifiée en 1996 et 1997 soumet également au régime des mines, les substances non visées à l'article L.111-1 du code minier contenues dans les fonds marins appartenant au domaine public métropolitain.

Le nouveau code minier en date de mars 2011 s'applique pour l'exploration et l'exploitation des substances minérales ou fossiles contenues dans le fond de la mer ou le sous-sol, qu'elles soient localisées dans les eaux territoriales ou au-delà (dans la zone économique exclusive et sur le plateau continental).

Pour pouvoir explorer et/ou exploiter des granulats marins, il est nécessaire d'obtenir trois documents administratifs :

- **un titre minier** (permis exclusif de recherches – PER – pour une durée maximale de 5 ans, renouvelable deux fois, ou concession d'exploitation pour une durée maximale de 50 ans), accordé par les ministres en charge de l'Écologie et des Mines (décret n° 2006-648 du 2 j uin 2006 modifié, relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain) après une mise en concurrence et dont la demande est soumise à enquête publique et à une concertation locale. Ce titre suppose une procédure d'instruction minière.
- **une autorisation domaniale** (décret n°80-470 du 18 j uin 1980 m odifié) pour l'occupation temporaire du DPM, dans le cas où le titre minier est situé dans les eaux territoriales (12 milles). L'autorité compétente à statuer est le préfet de Département auquel se substitue le directoire des Grands Ports Maritimes quand le titre minier est situé dans leur circonscription.
Cette autorisation suppose une procédure d'instruction domaniale. Elle spécifie le montant de la redevance domaniale.
- **une autorisation d'ouverture de travaux de recherches ou d'exploitation** accordée par le préfet de Département (décret n° 95-696 cité abrogé par le décret n° 2006-649 du 2 j uin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains). Cette autorisation fixe dans le détail les prescriptions à appliquer en matière de conduite des travaux d'exploitation notamment la surveillance et le suivi de la zone visée par le titre minier. Elle suppose une procédure d'instruction de travaux miniers.

Le décret n° 2006-798 du 6 juillet 2006 modifié relatif à la prospection, à la recherche et à l'exploitation de substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public et du plateau continental métropolitains permet l'instruction simultanée de ces trois actes administratifs dans le cadre d'une procédure unique (www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006053979). Le dossier doit également contenir **une étude d'impact** définie à l'article R. 122-3 du code de l'environnement. L'ensemble de ces demandes est soumis à en quête publique. (www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220).

Pour toute demande de titre minier (PER et concession), **un dossier d'évaluation d'incidences**, défini à l'article R. 414-23 du code de l'environnement, est à présenter lorsque tout ou partie du périmètre est situé dans un site Natura 2000 ou à proximité d'un tel site.

Conformément à l'article R. 414-22 du même code, l'étude d'impact tient lieu du dossier d'évaluation si elle satisfait aux prescriptions de l'article R. 414-23.

6.4.3.3. *Les énergies marines renouvelables : cas de l'éolien posé*

Les éoliennes posées sont situées à moins de 30 km des côtes, dans les zones sous juridictions nationales. L'implantation d'éoliennes en mer est ainsi soumise à plusieurs régimes juridiques complexes (Ministère de l'Ecologie et al, 2013) :

1. code de l'Energie (qui régit la production de l'électricité en France),
2. code de l'environnement / Loi sur l'Eau – Loi Littoral,
3. code général de la propriété des personnes publiques,
4. code de l'Urbanisme

Plusieurs autorisations sont nécessaires pour installer des éoliennes en mer (Ministère de l'Écologie, 2010) :

- **une autorisation ministérielle d'exploiter** (article L.311-11 du code de l'énergie) ;
- **une concession d'utilisation du domaine public maritime** (articles L.2124-3 et R2124-1 à R2124-12 du code général de la propriété des personnes publiques) dans le cas où les éoliennes sont installées sur le domaine public maritime ;
- une autorisation prévue par le décret n°2013-611 du 10 juillet 2013 pour les installations sur le plateau continental
- **un accord** conforme du préfet maritime et de l'autorité militaire (article R2124-56 du code général de la propriété des personnes publiques) ;
- **une autorisation d'installation** (articles L.214-2 et suivant du code de l'environnement - loi sur l'eau).

L'autorisation d'installation d'éolien en mer ne sera accordée qu'après la prise en considération (Ministère de l'Écologie, 2010) :

- de **l'étude d'impact** préalable à l'installation (décret n°77-1141 modifié par le décret n°2003-590 du 1^{er} août 2003),
- de **l'avis de l'autorité administrative d'Etat** compétente en matière d'environnement,
- du **résultat de la consultation publique** mise en œuvre (article L. 122-1 du code de l'environnement modifié par l'article 230 de la loi Grenelle II).

L'autorisation émise précisera les conditions accompagnant l'autorisation ainsi que les mesures destinées à éviter, réduire et, lorsque c'est possible, compenser les effets négatifs du projet sur l'environnement.

Les éléments constituant les études d'impact sont définis dans l'article R. 122-5 du code de l'environnement qui mentionne que « *Le contenu de l'étude d'impact est proportionné à la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet, à l'importance et la nature des travaux, ouvrages et aménagements projetés et à leurs incidences prévisibles sur l'environnement ou la santé humaine.* ». Ainsi, les petits parcs de démonstration ayant moins de 4 turbines ne sont en général pas soumis à l'obligation d'étude d'impact.

L'étude d'impact doit contenir (Code de l'Environnement) (Ministère de l'Écologie, 2010) :

5. **la description du projet ou cadrage préalable** : identification des principaux enjeux environnementaux, principaux impacts attendus, description des compartiments à étudier et définition des aires d'étude associées à chaque compartiment (zones potentiellement influencées par le projet).
- **une analyse de l'état initial** : les différents compartiments à analyser sont :
 - le milieu physique : hydrodynamisme (courant, houle), bruit sous-marin ambiant, turbidité naturelle et fonds marins (sédimentologie, géomorphologie, etc.)
 - le milieu biologique : composition de la colonne d'eau, peuplements benthiques, poissons, cétacés, oiseaux marins (observations sur plusieurs cycles biologiques annuels, sur une aire d'étude pertinente pour le compartiment considéré)
 - le milieu humain : caractérisation des usages et de l'utilisation du milieu marin ;
 - le paysage et le patrimoine : passage du paysage terrestre à marin.
6. **une analyse des effets et des impacts du projet sur son environnement** : cette analyse en amont du projet va permettre d'identifier toutes les interactions entre pressions et récepteurs pour lesquelles une analyse de l'impact est justifiée.
7. **une analyse des effets cumulés du projet avec d'autres projets connus.**
8. **une esquisse des principales solutions de substitution.**
9. **l'analyse de la compatibilité du projet avec l'affectation des sols.**
10. **les mesures prévues pour éviter-réduire-compenser les effets du projet.**
11. **les méthodes utilisées pour établir les suivis environnementaux** : choix des compartiments à suivre, des indicateurs à constituer, des protocoles d'acquisition des données nécessaires à la constitution des indicateurs, d'un calendrier d'acquisition de ces données.

Le code de l'environnement précise également que l'exploitant d'une éolienne est responsable de son démantèlement et de la remise en état du site (sur le domaine public maritime, seuls les projets qui assurent une réversibilité totale des implantations sont acceptés par l'Etat). Des garanties financières sont demandées pour répondre à ces objectifs (Ministère de l'Écologie, 2010).

Le décret n°2013-611 du 10 juillet 2013 relatif à la réglementation applicable aux îles artificielles, aux installations, aux ouvrages et à leurs installations connexes sur le plateau continental et dans la zone économique et la zone de protection écologique indique que l'autorisation délivrée comporte les modalités, à partir de l'état initial, de suivi du projet notamment au regard de son impact sur l'environnement et sur les ressources naturelles ainsi que les mesures et prescriptions propres à assurer la préservation de l'environnement. L'autorisation précise en outre que le titulaire procède, à ses frais, à l'enlèvement des infrastructures autorisées. Des garanties financières sont constituées pour assurer notamment la réversibilité des modifications apportées au milieu naturel et aux ressources biologiques.

6.4.3.4. *La pêche profonde*

La réglementation relative à la pêche profonde a été mise en place alors que les stocks de poissons étaient déjà fortement exploités. Elle est fonction de la zone où elle s'effectue : haute mer, ZEE ou mer territoriale. Cependant, les stocks de poissons ne connaissent pas ces frontières et les navires sont amenés à travailler en haute mer et dans les eaux communautaires (au niveau des Etats membres de l'Union Européenne, jusqu'à 200 miles nautiques des lignes de base). La réglementation peut alors dépendre de l'espèce pêchée.

Réglementation internationale

Les bases de la réglementation de la pêche profonde proviennent de conventions internationales et d'accords internationaux et régionaux. La Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM, 1982) et l'accord sur les stocks chevauchant et de grands migrateurs, dit « accord de New York » (1995) constituent ainsi les fondements du droit relatif aux pêches profondes. Le principe de précaution, instauré par la convention sur la diversité biologique (1992, principe 15) est également un principe largement utilisé dans la gestion des pêches et particulièrement pour les pêches profondes. Des conventions et des accords régionaux viennent s'ajouter, comme par exemple la convention OSPAR pour la protection de l'environnement de l'Atlantique Nord-Est.

La FAO (Food and Agriculture Organisation ou Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) joue un rôle non négligeable dans la gestion des pêches en émettant conseils et avis. Le comité des pêches qu'elle a mis en place en 2005 a notamment développé et adopté les Directives internationales sur la gestion des pêches profondes en haute mer (réf : <http://www.fao.org/docrep/014/i1064f/i1064f00.pdf>). Ces directives, bien qu'uniquement conseillées (non obligatoires) visent à concilier pêche et conservation. L'article 47 de ces directives préconise notamment l'évaluation des impacts sur les écosystèmes marins vulnérables.

La gestion des pêches profondes dépend également des Organisations internationales régionales de gestion des pêches (ORGP - ou RFMOs pour Regional fisheries management organisations). Ces organisations internationales ont été mises en place par des pays ayant des intérêts en matière de pêche dans une zone spécifique et ont pour mission la gestion concertée et commune des ressources halieutiques en haute mer. Il existe des ORGP pour les espèces migratoires et pour des stocks de poissons par zone géographique (toutes les régions n'ont pas une ORGP). Certaines ORGP n'ont qu'un rôle consultatif alors que d'autres peuvent fixer des limites aux captures et à l'effort de pêche, définir des mesures techniques et contrôler l'application des obligations. De plus, même si le droit international prévoit le principe de liberté de pêche en haute mer (article 87 CNUDM), la CNUDM prévoit, dans son article 116 que les Etats pêcheurs prennent des mesures de conservation des ressources halieutiques et qu'ils coopèrent entre eux, notamment par le biais des ORGP.

L'Union Européenne est membre de 11 ORGP. En Atlantique Nord-Est, par exemple, l'ORGP en place est la « Commission des pêches de l'Atlantique du Nord-Est » (CPANE ou NEAFC pour North East Atlantic Fisheries Commission). Les Parties contractantes ont validé la création de plusieurs zones dans lesquelles l'utilisation d'engins de pêche susceptibles d'endommager les fonds marins est interdite. La surface cumulée de ces zones représente 55 % des zones « pêchables » au sein de l'aire de régulation de la CPANE. D'autres mesures de gestion de l'activité de pêche profonde ont également été adoptées telles que des mesures d'évitement (ou move-on rules) des Ecosystèmes Marins Vulnérables (EMV) ou l'obligation

d'une étude d'impact avant toute désignation de nouvelles zones de pêche profonde ou toute modification des zones de pêche existantes.

Le Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM ou ICES pour International Council for the Exploration of the Sea) est une organisation internationale dont l'objectif principal est d'accroître les connaissances sur l'environnement marin et ses ressources et d'utiliser ces connaissances pour conseiller les autorités compétentes. Il joue un rôle important dans la gestion des pêches car il émet des avis sur l'état des stocks en Atlantique Nord-Est. Ces avis sont notamment utilisés par la Commission européenne pour définir ses propositions de réglementation des pêches, en particuliers les Totaux admissibles de Captures (TAC) annuels.

Réglementation européenne

Jusqu'en 2003, la pêche profonde était dite « ouverte », c'est-à-dire que tout navire européen pouvait exploiter des espèces profondes dans les eaux européennes. En 2003, la Commission européenne instaure des quotas de pêche et des totaux admissibles de capture pour une partie des espèces profondes du règlement 2347/2002, c'est le début de « la gestion par possibilité de pêche » qui limite les captures à des niveaux permettant une exploitation durable des ressources. Aujourd'hui les avis CIEM sur les niveaux des TAC sont définis dans le cadre du rendement maximal durable (RMD), MSY Framework, lorsque suffisamment de données et d'information sur les espèces en questions ont été recueillies.

Dans les eaux européennes, l'ensemble de la flotte européenne - navires français, de tous pays européens et les navires de pays tiers bénéficiant d'autorisations de pêche dans les eaux européennes, doivent suivre la réglementation émise par la Commission Européenne dans le cadre de la politique commune des pêches (PCP).

Pour les navires battant pavillon d'un pays membres de l'union, cette réglementation s'applique dans les eaux dites communautaires (ZEE européennes) mais aussi en haute mer. La Commission européenne a ainsi mis en place plusieurs règlements pour la pêche profonde (règlement applicable dans la ZEE européenne et pour les navires européens, en haute mer) avec notamment un règlement interdisant l'utilisation d'engin de fond en haute mer sans évaluation préalable de l'impact (règlement (CE) n°734/2008).

Réglementation française

L'Etat Français peut mettre en place sa propre réglementation pour les eaux sous sa juridiction. Elle doit cependant être plus contraignante que celle émise par la Commission Européenne. Le Comité National des Pêches Maritimes et des Elevages Marins (CNPMM) travaille également avec l'Etat français sur les mesures de gestion à mettre en œuvre.

6.4.3.5. *L'offshore pétrolier profond*

(Les paragraphes sur l'offshore pétrolier profond ont été rédigés par Jacques Miné de Total Exploration et Production)

Cadre réglementaire

En France, l'offshore pétrolier profond est régi par le Code Minier et le Code de l'Environnement. Comme toute activité industrielle, l'exploration et la production marines sont soumises à plusieurs types de contraintes : celles qui découlent des lois en vigueur dans le pays où ont lieu les opérations d'exploration ou/et de production (EP) ; celles que les compagnies opératrices s'imposent explicitement à travers leur « référentiel » dans la mesure où elles en ont décidé ainsi ; les lignes directrices de la profession (best practices en anglais) et les standards internationaux. Pour ces derniers (lignes directrices et standards internationaux), ils ne deviennent contraignants que dans la mesure où les compagnies ou les autorités de tutelle le décident ainsi.

Les lois en vigueur concernant l'offshore profond ont deux sources :

- Les conventions internationales : universelles si elles visent l'ensemble de la planète ou régionales si elles ne visent qu'un nombre limité de pays.
- Les lois nationales.

Parmi les conventions universelles qui peuvent affecter l'activité pétrolière en Grands Fonds (la liste n'est pas exhaustive), on citera par exemple la Convention des Nations Unies pour le Droit de la Mer (UNCLOS). Elle sert de référence en particulier pour les questions de démantèlement ou d'abandon des installations pétrolières, des câbles et des pipelines. Elle a institué il y a quelques années l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) afin de réglementer et gérer les ressources minières de l'aire marine internationale, au-delà de la zone économique exclusive (ZEE) des Etats côtiers, ressources qui constituent alors un bien commun de l'humanité. L'AIFM sera appelée, s'il y a lieu, à réglementer la recherche et la production des ressources pétrolières (si celles-ci existent) et minières au-delà des Zones Economiques Exclusives (ZEE). Néanmoins, à ce jour, il n'y pas d'activité d'exploration et production d'hydrocarbures au-delà des limites de la ZEE.

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) a pour vocation de régir le droit maritime à bord des navires et d'assurer la sécurité en mer et la protection de son environnement. Pour autant il ne prétend pas intervenir sur les activités d'exploration et de production pétrolière, qui sont du ressort des Etats côtiers dans le cadre des ZEE, mais il vient en complément de ces derniers pour ce qui concerne les navires naviguant et la partie navigation des installations pétrolières. De ce fait, son Comité pour la protection de l'environnement marin (CEPM) fixe les dispositions qui affectent les installations pétrolières offshore : en particulier celles adoptées dans le cadre de la Convention MARPOL (MARine POLLution), applicables dans les pays ayant ratifié cette convention. Mais aussi les conventions sur les eaux de ballast, ou encore celle sur le devenir des navires en fin de vie. Il convient également de citer la Convention de Londres concernant l'immersion des déchets, bien qu'elle ne relève pas de l'OMI. Elle existe sous deux formes, qui cohabitent : la forme ancienne (LC72) et celle amendée par son protocole de 1996.

Bien que les problématiques marines soient souvent communes à l'ensemble des mers du monde, des conventions régionales ont été signées afin de prendre en compte la spécificité des écosystèmes marins régionaux tels que la Mer Méditerranée, la Mer baltique, le golfe de Guinée, le golfe Persique, la côte sud-orientale du Pacifique, la Caraïbe, etc. Parmi ces

conventions régionales, on citera la convention OSPAR, créée pour protéger le Nord-est de l'Océan Atlantique. Cette convention est souvent considérée comme une référence technique pour les secteurs maritimes.

En ce qui concerne l'offshore, les pays sont invités à inscrire dans le droit national les dispositions et mesures des conventions internationales qu'ils ont ratifiées, ce qu'ils font généralement. Cela donne lieu à des transcriptions qui peuvent varier dans leurs détails d'un pays à l'autre.

À ces réglementations nationales et internationales s'ajoutent les guides de bonnes pratiques développées par l'industrie pétrolière au sein d'associations professionnelles telles que l'OGP (International Association of Oil and Gas Producers) ou l'IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association). Ces associations publient de nombreux documents de référence dont le but est de développer les processus, méthodologies et moyens pour aborder et traiter un problème environnemental.

Ces bonnes pratiques environnementales sont généralement intégrées par les opérateurs pétroliers dans leur propre référentiel. Selon la forme que cette intégration prend, elles peuvent devenir contraignantes pour l'opérateur (règles ou spécifications techniques), ou simplement rester une référence par rapport à laquelle l'opérateur détermine son action.

Signalons également l'existence de standards environnementaux qui peuvent être imposés par des banques ou organisations internationales finançant partiellement ou totalement un projet. C'est le cas des standards environnementaux de l'IFC (Banque Mondiale), dès lors que cet organisme intervient dans le financement dans un projet de grande ampleur.

Approche technique : les études environnementales

Toute demande de permis s'accompagne d'une démarche en trois étapes essentielles :

- l'analyse de l'état initial (ou EBS : « Environmental Baseline Study » en anglais). Cette analyse est effectuée en amont de chaque projet, pour établir le « point zéro ou de référence » de tous les paramètres environnementaux d'un site. La comparaison des résultats des campagnes ultérieures avec celles de cette étude, initiale, permettra ensuite d'évaluer l'impact réel, s'il y a, des opérations sur l'environnement ;
- l'étude d'impact environnemental et sociétal (ou ESIA : « Environmental and Social Impact Assessment »). Cette étude, généralement réglementaire, est entreprise dès la phase d'exploration ou lors de la phase conceptuelle d'un projet. Elle permet d'identifier et de quantifier les impacts potentiels du projet sur l'environnement naturel et humain engendrés par le projet. Des mesures et des solutions techniques sont alors définies afin de réduire, voire supprimer cet impact ;

Le Plan de gestion environnemental (ou EMP : « Environmental Management Plan » en anglais) établi lors du démarrage de chaque opération. Il fixe des objectifs d'amélioration et des programmes de mise en œuvre conformes aux obligations légales en adéquation avec la politique Hygiène – Sécurité - Sûreté - Sociétale et Environnement de la société pétrolière opératrice du projet ;

A cela s'ajoute en parallèle, un plan spécifique propre à la nature même du produit exploité : le Plan de lutte contre les déversements accidentels d'hydrocarbures (ou OSCP : Oil Spill Contingency Plan » en anglais). Ce plan prévoit, au vu de différents scénarios accidentels, l'organisation, la stratégie, les moyens et mesures d'urgence à mettre en œuvre au préalable et en cours des opérations de forage et/ou de production.

6.4.3.6. Synthèse des réglementations en vigueur

Tableau 6-4 Réglementation en vigueur pour les granulats marins, les énergies marines renouvelables, l'offshore profond et les ressources minérales marines profondes.

	Réglementation dans la mer territoriale	Réglementation dans la ZEE	Réglementations internationales
Granulats marins	Code minier de l'environnement	Code minier Code de l'environnement	n/a
Energies marines renouvelables, cas de l'éolien posé	Code de l'énergie de l'environnement Code de l'urbanisme Code général de la propriété des personnes publiques	Code de l'énergie Code de l'environnement Sur le plateau continental : Décret n°2013-611 du 10 juillet 2013	n/a
Offshore pétrolier profond	Code minier de l'environnement	Code minier Code de l'environnement	AIFM : code en cours d'élaboration *
Pêche profonde	PCP et Règlementation européenne	PCP et Règlementation européenne	Règlements provenant des organisations internationales régionales de gestion des pêches et règlements des pays d'origine. Pour les navires battant pavillon d'un pays membre de l'UE, la réglementation européenne s'applique.

* A ce jour, il n'y a pas d'exploration/production pétrolière et gazière dans les eaux au-delà de la ZEE

6.4.4. Evaluation et suivi des impacts environnementaux

6.4.4.1. *Les granulats marins*

Les principaux impacts connus

Trois principaux types d'impact sont mis en évidence : la création d'un panache sédimentaire (impact sur le milieu liquide), la modification du fond (impact sur le milieu solide) et des conditions hydrodynamiques ainsi que la destruction du milieu vivant (impact sur le milieu vivant).

La mise en suspension de particules (formation d'un panache) peut impacter la faune et la flore du milieu. Ce panache va se former en profondeur lors du passage du conduit remontant les sédiments aspirés vers le navire et en surface par le rejet de particules fines lors de la surverse.

La morphologie du fond sera impactée par l'extraction, ceci pouvant modifier le régime des courants et perturber la dynamique sédimentaire et donc provoquer ou aggraver l'érosion côtière.

L'exploitation des granulats marins entraîne la destruction de la faune benthique de la zone exploitée (invertébrés exploités par l'Homme ou source de nourriture pour certains poissons) ou parfois détruire des frayères et/ou nourricières. Certains types d'exploitation impliquent un creusement à travers des sédiments fins pour atteindre les graviers sous-jacents ; ces creusements modifient la répartition des substrats et des peuplements qui leur sont associés. Le bec de l'élinde qui aspire les granulats laisse également une trace plus ou moins visible et plus ou moins durable sur le sédiment.

Il n'existe pas de hiérarchisation de ces impacts.

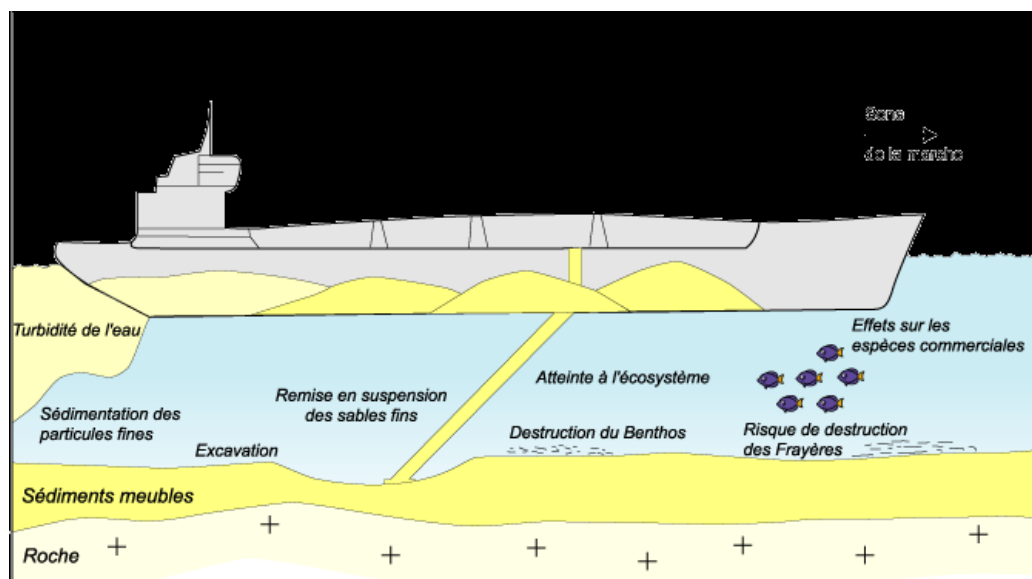


Figure 6-9 Impact de l'exploitation sur le milieu (méthode de « l'aspiration en marche ») © Ifremer.

Le suivi environnemental

L'exploitation des granulats marins est soumise à plusieurs études d'impact et suivis environnementaux :

- une étude d'impact pour l'obtention du Permis Exclusif de Recherche et de l'autorisation d'ouverture de travaux de recherche ;
- une étude d'impact, comprenant un état de référence, pour l'obtention de la concession et de l'autorisation d'ouverture de travaux d'exploitation (dossier unique : décret **2006-798 du 6 juillet 2006**) ;
- un suivi environnemental tous les 3 à 5 ans durant toute la durée de la concession (50 ans maximum) ;
- un suivi environnemental à la fermeture de la concession ;
- un suivi environnemental cinq ans après la fermeture de la concession.

L'ensemble des données récoltées dans le cadre de ces études et suivis est confidentiel.

Le suivi environnemental effectué tous les 3 ou 5 ans pendant toute la durée de concession (maximum 50 ans) doit être basé, *a minima*, sur la sédimentologie et la biologie benthique ; l'halieutique n'est pas nécessairement prise en compte à ce stade. Cependant, le préfet est le seul décisionnaire du contenu du suivi. Le résultat de ces suivis conditionne la suite de l'exploitation (ajouts de restrictions par exemple).

La description de l'état initial et l'ensemble des suivis qui sont réalisés doivent être opérés selon un protocole strict et harmonisé afin de pouvoir être comparés et mettre en évidence les éventuels impacts liés à l'activité. Idéalement, tous les suivis environnementaux et les études d'impact doivent suivre les mêmes protocoles.

Protocoles de suivi environnemental

Afin d'aider à la réalisation de l'état initial et des suivis environnementaux liés à l'exploitation, l'Ifremer, conseiller scientifique et technique des décideurs publics (voir section 6.3.5 Organismes impliqués), a mis en place des protocoles. Ces derniers sont destinés aux bureaux d'études, chargés par les entreprises de réaliser ces études, qui nécessitent en particulier de recueillir des nouvelles données.

Quatre protocoles ont ainsi été rédigés il y a une dizaine d'années et sont disponibles sur le site internet de l'Ifremer : wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Materiaux-marins

- un protocole permettant la réalisation d'une cartographie morpho-bathymétrique, d'une cartographie morpho-sédimentaire et d'un inventaire biologique,
- un protocole de calcul de volumes sédimentaires extraits (ou déposés) à partir de levés bathymétriques successifs (ce calcul permet de surveiller l'approfondissement du site et l'évolution de la morphologie du fond),
- un protocole conseillé pour la description de l'état initial et le suivi des ressources halieutiques dans le cadre d'une exploitation de granulats marins (ce protocole, mis en place en février 2011, précise le plan d'échantillonnage à suivre, les techniques d'échantillonnage à suivre, l'analyse des données et les résultats attendus),
- un guide descriptif des usages halieutiques.

Ces protocoles ont été mis en place à l'initiative de l'Ifremer dans le cadre de son activité d'expertise – avis. Le protocole Halieutique a été rédigé sur la base des travaux menés dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Granulats et auquel Ifremer a participé pour cette thématique (<http://www.siegma.fr/>).

Ces protocoles ne comprennent pas d'indicateurs de suivis des impacts.

Ces protocoles sont conseillés et donc non obligatoires. Les entreprises réalisant les suivis environnementaux sont donc libres de les suivre ou non.

Mesures pour éviter-réduire-compenser les impacts environnementaux

Comme toute carrière terrestre l'extraction de matériaux entraîne des nuisances ; les impacts sont mesurés à travers l'étude d'impact et le suivi quinquennal. Actuellement il n'existe pas de mesure de compensation des impacts. Afin de les éviter et de les réduire, un calendrier d'extraction peut être proposé. Ce calendrier respectera par exemple des périodes de cycles de vie relatives à l'halieutique. De plus en plus d'entreprises optent pour une extraction extensive (sur de vastes surfaces) qui selon les travaux du GIS permettrait une recolonisation (benthique et poissons) plus rapide du site. Plus de recul serait cependant nécessaire.

6.4.4.2. Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé

L'implantation d'éoliennes posées en mer est encore à l'état de projet en France. L'étude des impacts réels - impacts durant les phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement - ainsi que les suivis environnementaux associés n'ont donc pas encore eu lieu sur le territoire français. En revanche, des suivis environnementaux de projets éoliens offshore en phase d'exploitation existent en Europe du Nord et la définition de l'état écologique initial des sites d'implantations en France a débuté dès le lancement des appels d'offres de l'Etat en juillet 2011 et mars 2013, pour une puissance totale de 3000 MW. (MEDDE, 2013).

En France, quelques guides destinés à aider les maîtres d'ouvrage, les bureaux d'études, les élus, les acteurs locaux et groupes de citoyens dans l'élaboration et l'analyse des suivis environnementaux existent. Peuvent être cités :

- *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens. 2005. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 125 pages.*

Ce guide a été réalisé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et de l'ADEME. Il propose une méthodologie pour la mise en place des évaluations environnementales et traite principalement des impacts liés aux parcs éoliens terrestres et dans une moindre mesure, aux projets éoliens en mer. Il présente notamment le cadre réglementaire, l'analyse de l'état initial, les mesures de suppression-réduction-compensation des impacts, le suivi environnemental et la phase de démantèlement et de remise en état du site.

Ce guide a été réactualisé en 2010. La part attribuée aux éoliennes en mer y est plus importante :

Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens. Actualisation 2010. 2010. Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat. 191 p.

- *Energies Marines Renouvelables. Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques. 2012. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 361 pages.*

Cette étude s'est réalisée à la demande de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). Il présente une synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux et socio-économiques de l'ensemble des technologies d'Énergies Marines Renouvelables ainsi qu'une analyse du suivi environnemental de ces impacts : choix du site, état initial, analyse prévisionnelle des impacts et proposition de mesures, analyse des incidences sur les sites Natura 2000).

- *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en mer.* Ce guide est en cours de finalisation. Il a été réalisé dans le cadre d'une demande émise par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE). Il reprend les différentes phases de suivis environnementaux encadrant les éoliennes en mer et propose des stratégies de réponses. Il présente notamment un récapitulatif des composantes à étudier lors de l'étude d'impact, un récapitulatif des informations à collecter et des organismes référents, des exemples de protocoles d'échantillonnage par composante, des outils d'analyse prévisionnelle des impacts par thématique.

Les impacts connus

Un état des connaissances sur les impacts associés à l'ensemble des énergies marines renouvelables est proposé dans le rapport du MEDDE (Ministère de l'Écologie, 2012). Ce rapport met en évidence onze grandes catégories d'interactions potentielles des projets avec leur environnement (Tableau 6-5).

Tableau 6-5 Principales catégories d'interaction potentielle des énergies marines renouvelables avec le milieu naturel (Ministère de l'Écologie, 2012).

Interaction	Détail
Remaniement des fonds et mises en suspension de matériaux	Il s'agit des interactions mécaniques directes avec le milieu associées aux opérations de travaux (installations et démantèlement) et aux ancrages en phase opérationnelle qui perturbent le substrat et peuvent remettre des matériaux en suspension de la colonne d'eau.
Bruits et vibrations	Il s'agit des interactions acoustiques avec le milieu en phase travaux et en phase opérationnelle dans le champ proche et lointain.
Electromagnétisme	Il s'agit des interactions électriques et magnétiques générées autour des installations de transport d'électricité entre les installations et jusqu'à la côte.
Température	Il s'agit des variations thermiques générées par les câbles de transport d'électricité et les rejets d'installations type ETM ou PAC.
Pompages	Il s'agit des interactions mécaniques avec le milieu associées à l'aspiration d'eau en entrée d'installations type ETM ou PAC.
Rejets nutritifs	Il s'agit des effets d'upwelling artificiel pouvant être spécifiquement générés par les installations type ETM ou PAC avec pompage en eaux profondes et chargées en nutriment.
Présence physique des installations	Il s'agit des effets directement associés à la présence des installations dans le milieu : effet récif, effet réserve, effet barrière et risque de collision.
Présence physique des installations et paysage	Il s'agit des interactions spécifiques des installations avec les paysages maritimes et sous-marins.
Obstacles aux écoulements	Il s'agit des perturbations hydrodynamiques (houle, courant) et sédimentaire qui peuvent provenir de l'interaction statique ou dynamique des installations avec le milieu.
Eclairages	Il s'agit des interactions lumineuses du projet avec le milieu en période nocturne.
Contamination	Il s'agit des risques de contamination du milieu marin, accidentels ou liés à la diffusion lente de contaminants provenant des matériaux eux-mêmes.

Pour chacune de ces interactions, les impacts potentiels (anticipés avant toute installation en mer, et au vu de l'état écologique initial) et avérés (démontrés grâce aux suivis environnementaux) ont été décrits par compartiment affecté (substrat, colonne d'eau, benthos, poissons, mammifères marins, avifaune). Les phases du projet sont également prises en compte : construction, exploitation, maintenance, démantèlement (Ministère de l'Écologie, 2012).

La liste des impacts sur l'environnement de l'éolien posé est présentée dans (Wilhelmsson et al, 2010). Six grands compartiments sont analysés : les poissons, les mammifères marins, les oiseaux, le benthos, l'hydrologie et les tortues de mer. Pour chacun de ces compartiments, les impacts sont nommés, ainsi que le degré de prédiction de cet impact, les échelles estimées de ces impacts (échelles spatiale et temporelle), les degrés de bénéfice et de sévérité.

Protocoles de suivi environnemental

Le guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en mer (en cours de finalisation) présente une série de protocoles pour analyser les composantes physiques et biologiques de l'écosystème marin. Ce guide précise les objectifs des protocoles, le périmètre de l'étude, la durée/périodicité du suivi, les données à collecter, la méthodologie, la présentation des résultats.

L'Ifremer propose également sur son site internet un protocole pour la réalisation des études d'impact et de surveillance des projets de sites d'implantation d'éoliens offshore posés (<http://wwz.ifremer.fr/drogm/Activites/Cartographie/Plateau-continentale/Energies-marines-renouvelables/Protocole>).

D'une façon générale, il est préconisé que les protocoles d'évaluations environnementales restent homogènes tout au long du suivi - de la définition de l'état initial et phase de démantèlement incluses - afin de faciliter la mise en évidence d'impacts pour un projet donné, la comparaison inter-sites des évaluations réalisées pour différents projets et l'expertise-avis de ces évaluations. Cependant, les caractéristiques physiques et biologiques du milieu marin peuvent être très différentes d'un site à l'autre, les protocoles seront donc amenés à être adaptés, cependant, une similarité dans les indicateurs associés à ces protocoles doit être recherchée pour faciliter la comparaison inter-sites.

Evaluation des impacts

En règle générale, les impacts sont évalués en comparant les données issues des suivis environnementaux avec les données de l'état initial et/ou avec les données issues du suivi de la zone de référence (méthode « BACI » ; *Before-After-Control-Impact*) (Smith et al, 1993). La méthode du MarLin, préconisée pour le milieu benthique, est également utilisée (*The Marine Life Information Network - MarLin* - <http://www.marlin.ac.uk/>) ainsi que le cadre de lecture des impacts environnementaux présenté par (Boehlert and Gill, 2010).

La méthode du MarLin va proposer une hiérarchisation des impacts suivant la sensibilité d'une espèce ou d'un habitat à un effet par combinaison de sa tolérance et de sa résilience à cet effet selon des échelles de valeurs prédéfinies (sensibilité de l'espèce et sensibilité de l'écosystème).

Le cadre de lecture proposé par (Boehlert and Gill, 2010) (Figure 6-10) distingue six séquences ayant pour objectif l'évaluation des impacts environnementaux (pressions, récepteurs, effets et impacts). Les effets sur l'environnement (soit la modification des facteurs environnementaux) n'impliquant pas toujours d'impact sur ce dernier (soit un changement dans les composés de l'écosystème).

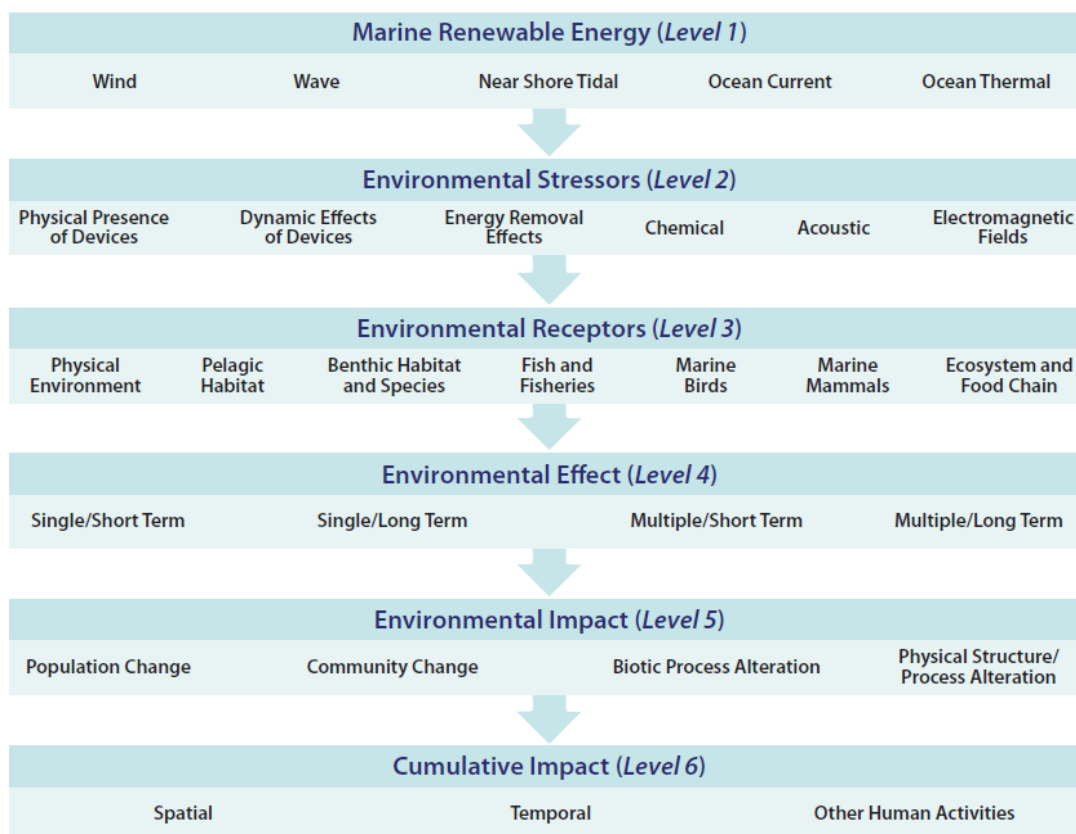


Figure 6-10 Cadre de lecture des impacts environnementaux liés aux énergies marines renouvelables (Boehlert and Gill, 2010).

En Allemagne, la mise en place de sites d'essai comprenant des suivis environnementaux servira également à cette évaluation (programmes FINO-1, 2 et 3 et AlphaVentus associés à des plateformes expérimentales).

Mesures pour éviter-réduire-compenser les impacts

Les études d'impact demandent aux maîtres d'ouvrage de présenter les mesures pour éviter-réduire et compenser les impacts sur l'environnement. Cette séquence, connue sous le nom *séquence ERC*, a pour objectif l'absence de perte d'habitats ou d'espèces (principe de *no net loss* ou *non perte nette*). A l'heure actuelle, en France, l'installation d'éoliennes posées n'étant pas réalisée, très peu voire aucun retour sur ce type de mesures n'existe. Les retours connus proviennent majoritairement de projets réalisés dans les autres pays européens. D'une façon générale (en France et pour les autres pays européens), les mesures prises par les maîtres d'ouvrage se focalisent sur les deux premiers principes « éviter » et « réduire ». Les impacts compensés sont proposés uniquement pour les impacts résiduels, ne pouvant pas être réduit ou éviter comme par exemple la pose de câbles sur le fond pour transporter l'électricité jusqu'au réseau électrique terrestre (Barillier et al, 2013).

6.4.4.3. La pêche profonde

Les impacts connus

Les impacts des engins utilisés pour la pêche profonde ainsi que l'impact de la pêche sur la ressource sont bien connus. Les engins de pêche vont impacter les fonds marins et la pêcherie, les stocks de pêche.

Impacts des engins

Les impacts des engins sont décrits sur le site internet de l'Ifremer (<http://wwz.ifremer.fr/peche/Les-defis/Les-partenariats/Avec-les-professionnels/Especies-profondes>).

- Chalut de fond.

Le chalut de fond se compose de funes (câbles), de deux panneaux, d'un bourrelet et du filet lui-même. Ce sont essentiellement les panneaux et le bourrelet qui impactent le fond en laissant des traces particulièrement visibles sur les EMV (coraux profonds, champs d'éponges etc.), le filet ayant un impact en termes de captures. Des panneaux « auto-porteurs » qui survolent le fond, sont en cours de développement. Par ailleurs, il est possible d'améliorer la sélectivité du chalut en utilisant des dispositifs sélectifs (comme par exemple les trappes qui pourraient laisser échapper les requins).

- La palangre

L'impact sur le fond est faible mais ce type d'engin est confronté à des problèmes de captures accidentelles d'oiseaux marins et de requins. La pêche à la palangre n'est possible que pour certains types de poissons.

- La nasse

Constitué d'un casier rigide recouvert d'un filet, ce type d'engin est en cours d'expérimentation pour la légine australe (*Dissostichus eleginoides*). L'impact de la nasse est faible sur le fond mais dépend de la nature du fond. Tout comme la palangre, la pêche à la nasse n'est possible que pour certains types de poissons.

Impacts sur les stocks de poissons

L'une des principales critiques de la pêche profonde est qu'elle exerce une pression sur les stocks de poissons, à la fois ciblés et non ciblés. Ainsi, la pêche au chalut de fond est peu sélective et induit des captures d'espèces non commerciales et de juvéniles d'espèces commerciales, trop petits pour être vendus ou faisant l'objet d'interdiction de débarquement. Les rejets peuvent être importants dans tous types de pêcheries. Dans les pêches profondes françaises, ils ont été estimés à environ 20% en 2011 (programme Obsmer) (Dubé et al, 2012)

Impacts sur les habitats et sur les écosystèmes marins vulnérables (EMV)

D'autres impacts connus sont la destruction d'habitats vulnérables (comme les coraux d'eau froide), la modification de la topographie, des structures sédimentaires et des processus géochimiques et la remise en suspension du sédiment.

La gestion de la pêche

La gestion de la pêche, pour les espèces dont les données scientifiques sont dites suffisantes, repose sur des évaluations de stocks qui utilisent des modèles de dynamique des populations. Les niveaux de captures recommandés (par le CIEM pour l'Atlantique nord-est) visent une exploitation à un niveau compatible avec le « rendement maximal durable » (RMD). Jusqu'ici de tels modèles n'ont pu être développés que pour un nombre limité de stocks de poissons profonds. Néanmoins les avis du CIEM pour le grenadier de roche et la lingue bleue de l'ouest des Îles Britanniques reposent sur de tels modèles. Pour d'autres espèces, des modélisations sont en cours de développement mais ce n'est pas envisageable pour tous les stocks. Il en est d'ailleurs de même pour les stocks des poissons des plateaux continentaux, ainsi le bar, espèce dont l'intérêt halieutique et économique dans les eaux européennes n'est pas à démontrer ne fait pas l'objet d'évaluation quantitative.

Mesures principales

La gestion actuelle de la pêche profonde en Atlantique Nord-Est repose sur deux principales mesures : **les TAC** (Total Allowable catch, Total autorisé de capture) et **les mesures de protection des écosystèmes marins vulnérables (EMVs)** :

- les TAC et quotas ont été les premiers éléments de gestion des pêches profondes. C'est une approche de gestion par espèce. En 2010, les TAC étaient à leurs niveaux les plus faibles depuis leur mise en place du fait de la surexploitation avérée du début des années 2000. Pour certaines espèces les TAC ont été augmentés en 2012 suite aux estimations du CIEM qui faisaient apparaître des taux d'exploitation devenus inférieurs à ceux correspondant au RMD et des biomasses de stock en augmentation.
- la prise en compte de la protection des écosystèmes marins vulnérables (EMVs) est une approche de gestion par écosystème. C'est la première mesure prise en ce genre. La conservation des EMVs profonds sensibles aux engins de pêche en contact avec le fond peut être faite par la mise en place de zones fermées à la pêche. De telles zones fermées ont été mises en place dans les eaux profondes sous juridiction du Royaume Uni et dans les eaux internationales dans le cadre de la CPANE. Il n'y en a pas dans les eaux profondes sous juridiction française de l'Atlantique.

Mesures complémentaires pour éviter-réduire-compenser les impacts

Une série de mesures complémentaires peuvent être citées. Ces mesures sont considérées comme des mesures d'évitement et de réduction des impacts de la pêche sur la ressource et les écosystèmes qu'ils colonisent :

- l'interdiction d'utilisation de certains engins (ex filet maillant) (mesures d'évitement-réduction-compensation). Cette interdiction a été mise en place notamment à cause des importantes captures accessoires de ces engins mais également parce qu'ils peuvent aussi rester pris dans les EMV, en particulier dans les récifs de coraux,
- la création de cartes identifiant les zones de pêches existantes (notamment par la CPANE pour l'Atlantique Nord-Est),
- l'instauration du principe d'évitement des EMVs (move-on rules) obligeant les navires à cesser toute activité de pêche en cas de rencontre d'un EMV, à s'éloigner d'au moins 2 milles nautiques de la zone avant reprise de l'activité et à rapporter toute observation,
- l'obligation de déposer une étude mesurant les impacts potentiels sur les EMVs auprès de la CPANE avant l'ouverture de toute nouvelle zone de pêche ou la modification de zones déjà existantes,
- l'obligation de posséder un système de repérage des navires (Vessel Monitoring

System – VMS).

- l'obligation de ne débarquer les pêches profondes que dans certains ports afin de faciliter le contrôle de la réglementation,
- l'obligation d'embarquer des observateurs sur les navires de pêche profonde pour améliorer les informations sur les ressources et les écosystèmes,

L'obligation de posséder une licence de pêche profonde pour limiter la puissance de la flottille des états pêcheurs.

Mesures de protection des écosystèmes marins vulnérables

Les pêches profondes et leur gestion ont fait l'objet du projet scientifique européen DEEPFISHMAN, 2009-2012. Ce projet, coordonné par Ifremer, a regroupé treize instituts de recherche et universités de neuf pays différents. L'objectif principal de ce projet était de proposer pour les pêches profondes de l'Atlantique Nord-Est, des options d'exploitation durables. Une des thématiques abordées est la réduction des impacts de la pêche sur la biodiversité et les écosystèmes marins vulnérables (<http://wwz.ifremer.fr/peche/Les-defis/Les-partenariats/Avec-les-professionnels/Especes-profondes>). A ce jour, les conclusions de ce projet ne sont pas encore communiquées.

Le projet CoralFISH a également permis de développer des outils pour la gestion durable des écosystèmes (coraux), comme des méthodes de travail, des indicateurs ou des modèles bio-économiques pour l'évaluation des effets de la gestion sur les coraux et la pêche, et a permis l'identification d'aires d'interaction potentielle entre pêche profonde et coraux.

6.4.4.4. L'offshore pétrolier profond

L'analyse de l'état initial (ou EBS : «Environmental Baseline Study »)

Avant d'initier toute activité offshore, une analyse de l'état initial est obligatoire. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance des caractéristiques environnementales et sociétales de la zone concernée par le projet. Les compagnies pétrolières doivent donc réaliser un état initial qui s'appuie sur des données bibliographiques et généralement une campagne de prélèvements sous-marins. Cette étude d'état initial ou Environmental Baseline Study a pour objectifs de :

- réaliser une étude préliminaire exhaustive du site qui constituera, pour la suite des opérations, un état de référence ;
- déterminer les sites les plus sensibles d'un point de vue écologique et socioculturel, pour lesquels des mesures de préservation ou d'accompagnement s'imposent comme une priorité ;
- d'identifier et évaluer d'éventuelles dégradations et pollutions antérieures, en particulier celles liées à des activités industrielles passées ou présentes.

Le contenu et le déroulement de cette étude d'état initial dépendent du contexte réglementaire local et du contexte général. Dans la plupart des cas, cette étude (pour un environnement Grands Fonds) contient les éléments suivants :

- une étude bibliographique ;
- une étude cartographique intégrant également le littoral et utilisant les techniques de photographie aérienne et d'images satellites ;
- une étude des paramètres physiques de l'environnement (bathymétrie, climatologie, courantométrie, profil hydrographique...);

- une caractérisation de la biodiversité (inventaire de la faune, présence d'écosystèmes particuliers tels que les écosystèmes chimio synthétiques, aires et périodes de reproduction ou de migration ...);
- un programme d'échantillonnage et d'analyses portant aussi bien sur le milieu physique (physico-chimie du sédiment de fond de mer et de la colonne d'eau) que sur la matière vivante (benthos);
- étude de l'activité sociétale à proximité de la zone concernée par le projet (activité de pêche, routes maritimes);
- inventaire (s'il y a) du patrimoine (épaves civiles ou militaires).

Le programme d'étude (incluant le programme d'échantillonnage) est généralement défini par la compagnie pétrolière opératrice, l'étude proprement dite (incluant généralement une mission de prélèvements en mer) est effectuée par une société spécialisée contractée pour l'occasion. Compte-tenu de l'activité d'exploration et de développement en environnement Grands Fonds, de nombreuses études d'état initial ont été réalisées à ce jour. La campagne d'échantillonnage est relativement similaire pour les grands opérateurs pétroliers (mise en œuvre des bonnes pratiques de l'industrie). Cette campagne d'échantillonnage se décompose classiquement comme suit :

- une étude de la colonne d'eau. Cette étude intègre à la fois des mesures en continu telles que la température, la conductivité, l'oxygène dissous, le pH et des analyses réalisées ultérieurement en laboratoire telles que la teneur en hydrocarbures, en certains métaux lourds et en certains éléments nutritifs;
- une analyse physicochimique du sédiment avec des analyses spécifiques telles que le potentiel rédox, la granulométrie, la teneur en matière organique totale, les teneurs en hydrocarbures et en certains métaux lourds (liste non exhaustive);
- des analyses biologiques s'appuyant sur un inventaire qualitatif et quantitatif (si possible) du benthos : richesse spécifique, densité, index de diversité...).

Le nombre et le choix de la position des stations d'échantillonnage sont effectués en fonction de la sensibilité du milieu, la bathymétrie (élément important dans la répartition de la faune en Grands Fonds), les sens des courants dominants, la position future des installations.

La méthodologie d'échantillonnage est adaptée à l'importante profondeur d'eau. Le positionnement des bennes d'échantillonnage est réalisé à l'aide d'un système DGPS ou équivalent), les bennes et les bouteilles d'échantillonnage sont lestées afin de limiter leur dérive et le câble du touret de grue a une longueur suffisante pour atteindre de telles profondeurs. En cas de présence possible d'écosystèmes sensibles (pré-identifiés par l'interprétation des données géophysiques) tels que des coraux froids ou de la faune chimio-synthétiques au cœur de pockmarks, le recours à une imagerie à l'aide d'un ROV (Remotely Operated Vehicle) est à envisager.

Concernant la faune, les caractéristiques propres à l'environnement Profond imposent une prise en compte spécifique :

- la faune est de plus petite taille que celle connue en environnement marin classique. Le tamisage des sédiments doit être plus fin (500 μ m) que celui appliqué traditionnellement (1mm);
- le benthos en Grands Fonds est encore relativement mal connu; aussi sa détermination doit être confiée à des taxonomistes spécialisés, les seuls aptes à donner des résultats fiables;

- la détermination doit être réalisée dans un temps qui soit acceptable par le planning du projet et ne doit pas engendrer de risque de retard préjudiciable à l'ensemble des parties prenantes.

L'étude de l'état initial fait l'objet d'un rapport rédigé par le contracteur environnemental spécialisé. Elle constitue la première étape fondamentale dans l'élaboration de l'étude d'impact environnemental et sociétal.

L'étude d'impact environnemental et sociétal (ou ESIA)

Une étude d'impact environnemental et sociétal est systématiquement entreprise lors des phases d'exploration (acquisition sismique, forage) et de production.

L'étude d'impact n'est pas seulement un outil réglementaire nécessaire au lancement du projet, c'est également un outil de management environnemental majeur. Elle est quasiment systématiquement entreprise dans l'industrie pétrolière même si celle-ci n'est pas requise par la loi du pays hôte. L'étude d'impact a pour but de guider les options techniques pendant la durée du projet, et ce afin de minimiser l'impact tant environnemental que sociétal.

Si d'une manière générale l'étude d'impact traite simultanément les aspects environnementaux et sociétaux, il pourra en être différent pour les grands projets où de ux études séparées pourront être conduites. En Grands Fonds, cela peut être le cas pour les développements majeurs où les aspects sociétaux revêtent une grande importance.

Le contenu des études d'impact s'appuie avant tout sur la réglementation locale en vigueur mais également sur des spécifications propres à chaque opérateur.

L'étude d'impact comprend généralement les éléments suivants :

- une revue des réglementations (conventions internationales, lois, décrets...)
- concernant potentiellement le projet ;
- la description du projet, de ses objectifs et de ses caractéristiques techniques ;
- l'analyse de l'état initial environnemental et sociétal du site. C'est au sein de cette partie que sont intégrés les résultats de l'étude précédemment décrite (EBS) ;
- l'étude exhaustive des impacts potentiels et leur ampleur et cela en fonction de la sensibilité et de la spécificité du milieu ;
- la description des mesures nécessaires pour réduire, voire éliminer, ces impacts potentiels, leur justification au regard de solutions alternatives ;
- une estimation des impacts résiduels du projet ;
- des recommandations pour la mise en œuvre d'un système de management environnemental et sociétal.

Le processus d'évaluation de l'impact est classique à savoir : mesurer la sévérité de cet impact en combinant l'intensité de l'impact versus la sensibilité du milieu récepteur. La sévérité de l'impact est qualifiée selon une échelle allant de « négligeable » à « majeur ». L'étendue géographique de l'impact et son caractère direct ou indirecte sont également pris en compte.

Dans certains cas, lorsque l'effet peut être quantifié, une modélisation peut être envisagée : par exemple dans le cas d'émissions d'effluents liquides tels que des eaux traitées de production.

Les services rendus par les écosystèmes (services écosystémiques) sont intégrés afin de mieux quantifier l'impact d'un projet sur l'environnement. Néanmoins, cette approche en environnement Grands Fonds est à ce jour très délicate car sa faune spécifique est encore mal connue ; l'approche traditionnelle d'évaluation des impacts sur de tels environnements reste alors privilégiée.

En domaine grands Fonds, les impacts plus spécifiquement étudiés sont

- l'impact potentiel sur la faune vivant sur le fond de la mer : coraux froids, faunes chimio-synthétique vivant au sein de pockmarks ;
- l'impact sur les mammifères marins et les autres espèces migratrices telles que les tortues ;
- l'impact potentiel du rejet des déblais et de la boue de forage ;
- l'impact sociétal potentiel sur les activités telles que la pêche ou du transport maritime.

Si les mesures d'atténuation envisagées ne sont pas considérées comme suffisantes, l'étude d'impact pourra recommander la mise en place de mesures dites compensatoires.

Tout comme pour l'analyse de l'état initial, l'étude d'impact est confiée à une société spécialisée contractée. Ce contractant n'est pas nécessairement le même que celui qui fut en charge de l'analyse de l'état initial.

Le Plan de Gestion Environnementale (ou EMP)

Le Plan de gestion Environnemental, dans l'industrie pétrolière, a pour but de définir les moyens nécessaires à la réalisation des objectifs environnementaux en s'appuyant sur des contrôles et des audits réguliers. Il intègre donc :

- La mise en œuvre d'un plan de lutte anti-pollution
- La mise en œuvre de plans spécifiques tels que ceux rattachés à la gestion des produits chimiques, des déchets et en s'assurant que ceux-ci respectent à la fois les contraintes réglementaires et les engagements de l'étude d'impact.
- Un programme de contrôle ou de surveillance (« monitoring ») permettant de vérifier les résultats en regard des engagements préalablement fixés. Au vu de ce programme de contrôle, il pourra être recommandé un ensemble d'actions correctives permettant une amélioration en termes d'impact environnemental ou sociétal. A ce programme de contrôle devront être rattachés des indicateurs et des mesures associées de contrôle.
- Un programme d'audit environnemental du site de production. Ce programme s'applique aussi bien à la gestion de l'environnement qu'à des aspects techniques particuliers. Il permet de s'assurer que les procédures, les réglementations et les objectifs du plan de management environnemental sont connus et bien respectés pendant la durée de vie des installations.

D'une manière générale le Plan de Gestion environnemental est un outil intégrateur de tous les aspects environnementaux et sociétaux liés au projet puis tout au long de la durée de vie d'un site en production en gardant bien pour objectif la minimisation des impacts tant environnementaux que sociétaux. Dans ce plan, le rôle et la responsabilité des différents intervenants en matière d'environnement et sociétal sont clairement précisés.

A la différence des précédentes études confiées à des sous-traitants, les plans associés à des développements pétroliers sont généralement rédigés par l'opérateur pétrolier témoignant de sa véritable prise en main du dossier environnemental et sociétal. Toutefois pour les opérations d'exploration sensu stricto, le plan de management environnemental du contracteur sismique ou de forage, revu avec l'opérateur, sera utilisé. En effet, il est assez normal, par exemple, que le plan de gestion environnemental d'une acquisition sismique soit rattaché à celui qui possède et opère le bateau d'acquisition, à savoir le contracteur sismique lui-même.

La rédaction de ce type de plan s'appuie généralement sur la norme internationale ISO 14001 intégrant une phase de planification, de mise en œuvre, de contrôle et d'amélioration, ce afin de faire progresser de façon continue la performance environnementale associée au projet.

Concernant le contexte « Grands Fonds », les points majeurs abordés sont les suivants :

- Revue des conventions internationales et des réglementations environnementales se rattachant à la gestion de tous ces aspects environnementaux ;
- Etablissement des programmes de gestion des déchets et des produits chimiques. Le plan de gestion des déchets est souvent un sujet délicat en raison de la distance au littoral et de l'absence de structures fiables de gestion des déchets dans de nombreux pays hôtes. Le Plan de gestion des déchets devra caractériser chaque catégorie de déchets (dangereux ou non, déblais de forage, déchets ménagers, déchets médicaux), les filières de traitement et d'élimination et les procédures de traçabilité et de contrôle des volumes ;
- Etablissement du Plan de lutte anti-pollution. Le plan de lutte antipollution (Oil Spill Contingency Plan) fait partie intégrante du plan de management environnemental (comme pour le plan de gestion des déchets ou des produits chimiques) mais compte-tenu de son importance, en particulier en environnement marin, il est traité de façon entièrement autonome. Le processus d'élaboration d'un OSCP est lancé de préférence un an avant que le risque hydrocarbure n'apparaisse pour permettre la rédaction du plan, son approbation par les autorités si nécessaire, la formation du personnel, et l'approvisionnement des moyens dédiés.

Il contient :

- une procédure d'alerte et notification de pollution qui inclut également les parties prenantes externes susceptibles d'être impliquées, conformément aux réglementations locales en vigueur ;
- la description des scénarios de pollution retenus suite à l'analyse des risques ;
- les stratégies de réponse à mettre en œuvre en adéquation avec ces scénarios ;
- la définition de l'ensemble des ressources techniques et organisationnelles internes et externes nécessaires pour la mise en œuvre de ces stratégies ; site, filiale, accord interpétroliers, plan antipollution du pays, accords entre états le Groupe, les coopératives de l'industrie et les experts et sous-traitants.
- Les éléments à prendre en compte pour la mise en place du suivi des impacts sanitaires et environnementaux de la pollution.
- Définition du programme de suivi environnemental avec réalisation périodique de campagne de prélèvements de fond de mer. Il est alors important d'en préciser la périodicité, le nombre et la position des stations, le choix des analyses qui seront effectuées et de définir si possible des bio-indicateurs appropriés (index de diversité par exemple). Ce programme de suivi (ou monitoring) sera généralement proche du programme d'échantillonnage réalisé lors de l'étude d'état initial, et ce afin de réaliser une comparaison fiable et argumentée de l'environnement tout au long de la vie du projet. En environnement Grands Fonds, le benthos est considéré comme le meilleur bio-indicateur car il est sensible aux différentes modifications de l'environnement avec une réponse homogène ; il vit sur le fond de la mer où l'exposition aux contaminants peut être importante et sa mobilité est réduite : il ne peut donc migrer pour fuir les variations de stress environnemental ;
- Pour les opérations sismiques, le plan (généralement établi comme déjà indiqué par le contracteur sismique) devra intégrer les procédures de suivi, d'identification des mammifères marins et des mesures opérationnelles qui sont prises en leur présence. Le plan précisera les modalités de reporting associé.

6.4.5. Difficultés de mise en œuvre

6.4.5.1. *Les granulats marins*

Les problématiques majeures soulevées par l'exploitation de granulats sont le conflit d'usage (ex. pour l'halieutique) et l'atteinte au milieu (ex. pour le trait de côte). Le MEDDE a ainsi confié en 2004 à l'Ifremer, une étude globale visant à identifier des zones de moindre contrainte où l'exploitation des granulats marins sera possible en regard des ressources et activités halieutiques et de l'environnement biologique (fin étude 2013). Les résultats sont accessibles sur :

<http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Materiaux-marins/Inventaire-des-ressources>

Concernant l'expertise-avis des suivis environnementaux, le principal problème actuel est le nombre croissant de demandes d'expertises envoyées - l'Ifremer reçoit environ une demande d'expertise par mois - *versus* le nombre d'experts existants et disponibles à l'étude de ces expertises. Il faut également noter que le niveau d'analyse des expertises reçues est de plus en plus élevé. Le temps d'expertise associé est donc de plus en plus long. Enfin, la qualité des expertises et donc la pertinence des avis dépendent des programmes de recherche qui sont menés en amont. Il existe donc un fort intérêt à soutenir et/ou développer ces programmes de recherche. Il serait notamment important de soutenir des programmes de de recherche pour une meilleure compréhension des modifications sur l'écosystème ou pour mettre à jour les protocoles de suivis environnementaux.

6.4.5.2. *Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé*

L'établissement de suivis environnementaux efficaces associés aux éoliens posés en mer nécessiteraient un important travail d'acquisition de connaissances fondamentales sur les milieux ciblés mais également sur l'évaluation des impacts cumulés (impacts liés à la multiplication des projets dans l'espace et dans le temps) et l'évaluation des impacts liés au démantèlement en fin de vie des projets

L'établissement de ces suivis est également confronté à des difficultés techniques permettant d'évaluer les modifications de certains paramètres environnementaux (le bruit par exemple) et le niveau de sensibilité des espèces vis-à-vis de certains paramètres (bruit, électromagnétisme). Pour pallier ces manques, l'établissement de projets pilotes aurait été particulièrement pertinent à mettre en place, comme c'est le cas en Allemagne (programmes FINO-1, 2 et 3 et AlphaVentus associés à des plateformes expérimentales) depuis 2003.

Un effort de standardisation serait également à mettre en avant (standardisation des protocoles, des indicateurs) tout en tenant compte des spécificités techniques et géographiques de chaque projet.

6.4.5.3. *La pêche profonde*

La gestion des pêches profondes dans le Nord Est Atlantique repose actuellement sur la définition de TACs en ligne avec le RMD et sur la fermeture à la pêche des zones de présence d'écosystèmes marins vulnérables (EMV). Comme pour l'ensemble des pêcheries, la définition de TAC ne peut pas reposer sur des estimations quantitatives de la mortalité par pêche et de la biomasse pour tous les stocks. Pour les stocks moins abondants ou moins bien connus le CIEM a mis en place une démarche spécifique ou "Data Limited Stocks" qui permet de définir des TACs en accord avec le RMD présumé avec une marge de précaution plus élevée que pour les stocks qui font l'objet d'évaluations quantitatives.

La gestion de l'impact des pêcheries profondes sur les écosystèmes s'est beaucoup focalisée sur les impacts sur les EMV. Dans l'Atlantique nord-est, de larges zones sont déjà fermées pour protéger ces écosystèmes et des révisions des limites des zones protégées sont proposées par le CIEM au fur et à mesure de l'avancement des connaissances.

La gestion des pêcheries profondes est actuellement en cours de révision par les instances européennes. La commission Européenne a proposé une interdiction de tout le chalutage profond, qui ne laisserait que les palangres et les nasses comme options techniques d'exploitation des ressources halieutiques profondes. Les palangres ont un impact moindre sur le fond marin et les écosystèmes benthiques. En revanche, les requins sont hautement vulnérables aux palangres de sorte qu'en changeant le mode de gestion, aujourd'hui basé sur des TACs et des zones fermées vers une gestion par TACs limités aux palangres pour les poissons (les nasses ne semblent avoir un potentiel que pour les ressources limitées de crabe profond *Chaceon* spp.) il existe un risque d'augmenter l'impact de la pêche sur les requins profonds, un autre compartiment écologique vulnérable.

Néanmoins, dans le cadre de pêcheries au chalut, il n'existe pas d'évaluation de la proportion des fonds marins profonds qu'il serait nécessaire de protéger pour assurer le bon état écologique au sens de la DCSMM.

6.4.5.4. *L'offshore pétrolier profond*

Processus d'amélioration - Actions de Recherche et Développement

La connaissance de l'environnement profond, à proximité des marges océaniques, est relativement récente, cela en fonction des contraintes opérationnelles et environnementales particulièrement difficiles : pression élevée, températures basses de l'ordre de 2 à 4 °C, absence de lumière, etc.

Lors des premières campagnes environnementales, les opérateurs pétroliers se sont aperçus que certaines approches traditionnelles mises au point pour l'offshore « classique » peu profond, n'étaient pas adaptées. Ce fut particulièrement le cas en Angola où les premiers développements pétroliers ont été engagés dans de tels environnements.

C'est donc dans ce cadre qu'a été lancé un très important programme de recherches conjoint entre la société pétrolière TOTAL et Ifremer. Situé régionalement en Afrique (Angola, Congo, Gabon), en raison de forte activité d'exploration régionale, ce programme avait pour buts principaux :

- d'établir une méthodologie d'échantillonnage adaptée aux caractéristiques de la faune Grands Fonds ;
- de comprendre le fonctionnement des écosystèmes présents afin de mieux appréhender

l'impact potentiel des activités pétrolières sur ceux-ci.

Coordonné par Ifremer, ce programme de recherches a intégré d'autres laboratoires parmi lesquels le CNRS, les Instituts de recherche allemand Alfred Wegener et Max Planck, le centre de recherche norvégien IRIS et les centres de recherches norvégien (Stavanger) et français (Pau) de Total. Ce programme a nécessité une importante logistique à savoir plusieurs campagnes de bateaux océanographiques au large des côtes africaines avec un matériel scientifique important : courantomètre, pièges à sédiments, respiromètres, ROV, appareils de carottage, etc.

Lors de ces campagnes scientifiques, l'accent a été mis sur l'étude des deux écosystèmes présents :

- les écosystèmes détritiques, se nourrissant des apports détritiques de surface et/ou transportés offshore par le fleuve Zaïre : nourriture issue d'éléments vivant initialement en surface ou à terre puis se déposant sur le fond de la mer après leur mort. Ces écosystèmes sont donc liés directement à la photosynthèse ;
- les écosystèmes chimiosynthétiques vivant à proximité de « fuites » naturelles de méthane sur le fond de la mer et dont la faune utilise certains éléments chimiques (méthane, sulfure) comme source énergétique. Ces communautés faunistiques se développent grâce à des symbioses avec des bactéries/archéobactéries méthanotrophes et thiotrophes.

Cette étude a conduit à une meilleure connaissance de la biodiversité dans les grands fonds du Golfe de Guinée et ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques. Parmi ces résultats, on citera une méthodologie d'échantillonnage revue pour tenir compte de la petite taille de la faune Grands fonds et une meilleure compréhension du fonctionnement de certains écosystèmes tels que les coraux froids et ceux présents au sein des pockmarks. Cette connaissance a permis d'établir une méthode de reconnaissance basée sur une cartographie des grands fonds qui permet d'identifier les zones où ces écosystèmes peuvent être présents.

Ces résultats ainsi que leur application aux études environnementales ont été partagés avec l'industrie *via* des associations professionnelles environnementales propres à l'industrie pétrolière.

Des programmes de même type ont été initiés pour comprendre le fonctionnement et la sensibilité des coraux froids. L'utilisation de méthodes techniques d'identification faunistiques basées sur la métagénomie est également envisagée par l'industrie pétrolière.

Le partenariat entre compagnies pétrolières et communauté scientifique est d'intérêt mutuel : il contribue à une meilleure connaissance de l'environnement où l'industrie opère (en particulier de la biodiversité d'environnements extrêmes tels que les Grands Fonds), et en même temps il permet d'affiner les mesures de protection et de suivi environnemental adéquates et propres à chaque projet.

6.4.6. Organismes impliqués dans les suivis environnementaux

6.4.6.1. *Les granulats marins*

L'exploitation des granulats marins est ancienne (années 1980). Le cadre réglementaire ainsi que les procédures de suivis des impacts environnementaux et les rôles des différents organismes impliqués dans l'analyse des impacts environnementaux sont bien établis.

Tableau 6-6 Organismes impliqués dans les suivis environnementaux pour les granulats marins
(source : Ifremer Géosciences Marines)

Actions	Organisme impliqué
Maîtrise d'ouvrage étude d'impact	Armateurs-extracteurs de matériaux marins
Réalisation des suivis environnementaux	Bureau d'études
Expertise et avis sur la réalisation des suivis environnementaux	Ifremer (conseiller scientifique et technique des décideurs publics)
Autorisation d'exploitation (permis)	Pouvoirs publics

Dans ce cas particulier des granulats marins, c'est l'Ifremer qui a établi les protocoles de suivi environnementaux.

Les études d'impacts sont une obligation des contractants. Les sociétés armateurs-extracteurs de matériaux marins sous-traitent généralement l'étude d'impact à des bureaux d'étude. L'étude d'impact sera expertisée par l'Ifremer.

L'Ifremer est le conseiller scientifique et technique des décideurs publics (ministères, préfetures, services déconcentrés de l'État) pour fournir des avis sur les demandes de permis d'exploitation ou d'exploration de matériaux marins (décret 71-360 du 6 mai 1971, décret 85-448 du 23 avril 1985, décret 95-427 du 19 avril 1995, décret 95-696 du 9 mai 1995, décret 98-970 du 26 octobre 1998). Il est également associé à la réflexion qui doit conduire à la refonte des textes réglementaires. L'Ifremer a donc l'obligation d'expertiser et de donner un avis sur les dossiers soumis par les décideurs publics (cf. mandat de création de l'Ifremer, 1984 et différents textes réglementaires cités *supra*). L'Ifremer émet ainsi un avis sur le fait que les impacts aient été bien vus/anticipés par rapport au rapport qui leur a été envoyé. L'Ifremer émet donc un avis sur le dossier et non sur l'impact en lui-même. Par contre, il est important de noter que l'Ifremer n'intervient pas dans la réalisation des études d'impact.

Lors de ces expertises, l'Ifremer reste très vigilant sur :

- l'état de mise à jour des références bibliographiques ;
- le suivi des protocoles ;
- la restitution des données (en vue de la comparaison avec l'état précédent).

Les problématiques majeures soulevées par l'exploitation de granulats sont le conflit d'usage (ex. pour l'halieutique) et l'atteinte au milieu (ex. pour le trait de côte).

L'Ifremer a mis en place un réseau d'experts destiné à organiser ces travaux tout en assurant les relations avec les décideurs publics, les divers usagers de la mer (dont les pêcheurs et les extracteurs) et la société en général.

Afin d'expertiser les dossiers, le coordinateur du réseau s'appuie sur des chercheurs-experts au sein de l'Ifremer. Les disciplines suivantes sont sollicitées :

- biologie
- halieutique
- géologie-sédimentologie
- physique
- plus occasionnellement chimie

Certains sujets, comme l'interaction entre extraction et stabilité du littoral, ne pouvant plus être traités, il sera indiqué dans le rapport d'expertise que l'Ifremer n'est pas en mesure de répondre à ce volet.

Le président-directeur général de l'Ifremer est l'unique signataire de l'expertise réalisée et de l'avis rendu.

6.4.6.2. *Les énergies marines renouvelables, cas de l'éolien posé*

Actuellement, en France, l'expertise-avis n'est pas dédié à un organisme/institut spécifique. Les suivis environnementaux sont une obligation des contractants qui les sous-traitent généralement à des bureaux d'études en environnement.

Les modalités de mise en place des suivis semblent être très différentes dans les autres pays. En Belgique, un institut de recherche public a été missionné pour réaliser l'expertise-avis des suivis environnementaux. Au Danemark, ce rôle a été attribué au Danish environmental monitoring programme (consortium public-privé : ministères de l'énergie et de l'environnement et industriels de l'éolien offshore) ; ce consortium est encadré par un groupe d'expert indépendant (International Advisory Panel of Experts on Marine Ecology).

6.4.6.3. *La pêche profonde*

Le Conseil International pour l'exploration de la mer (CIEM) est en charge de l'évaluation des stocks dans l'Atlantique Nord-Est. Le CIEM a un groupe de travail d'évaluation des stocks de poissons profonds espèces profondes *working group on biology and assessment of deep-sea fisheries resources* (WGDEEP) qui fait les évaluations de stocks support aux avis sur les niveaux de captures pour les pêcheries profondes. Le groupe d'expert sur les pêcheries arctiques qui évaluent les stocks de sébastes et de flétan noir porte aussi sur des pêcheries qui opèrent essentiellement dans des écosystèmes profonds. Il en est de même des groupes qui évaluent certaines espèces démersales comme le merlu et les baudroies exploitées en partie sur la pente continentale jusqu'à des profondeurs de 700 à 1000 m.

Le CIEM a aussi un groupe d'expert dédié à l'évaluation des écosystèmes profonds (ICES-NAFO joint Working Group on Deep-water Ecology (WGDEC)). Des scientifiques de l'Ifremer contribuent à ces groupes d'experts.

Dans la zone OSPAR, les pêcheries sont réglementées par diverses dispositions. Celles-ci incluent des politiques et réglementations nationales, la Politique commune de la pêche de l'UE, des accords bilatéraux et multilatéraux entre pays partageant des stocks et des mesures, adoptés par les trois organisations régionales de gestion de la pêche : CPANE, CICTA, et OCSAN.

La Convention OSPAR reconnaît pleinement la compétence de ces autorités dans le domaine de la réglementation de la pêche. Elle informe ces autorités de pêche lorsqu'elle considère que des questions appellent des actions de protection et de conservation de l'Atlantique du Nord-

Est dans le domaine des pêcheries. En 2008, OSPAR et la CPANE ont adopté un mémorandum d'entente qui définit dans le détail leurs rôles en matière de conservation de la biodiversité marine dans leurs zones respectives.

6.4.6.4. *L'offshore pétrolier profond*

Actuellement, l'expertise-avis n'est pas dédié à un organisme/institut spécifique. Les suivis environnementaux sont une obligation des contractants qui les sous-traitent généralement à des bureaux d'études en environnement.

6.4.7. Conclusion

La mise en regard de ces différents cas, est intéressante dans le cadre de cette expertise car elle pose les problèmes déjà rencontrés lors de l'exploitation de ressources marines.

L'évaluation des impacts d'une activité industrielle sur l'environnement est difficile, même en milieu côtier où les sites sont souvent plus accessibles qu'en milieu profond. Un certain nombre d'éléments est attendu dans la plupart des cas (sauf pour la pêche profonde) :

- Une évaluation initiale de l'environnement
- Une étude d'impacts et des mesures de réduction des impacts
- Des suivis environnementaux périodiques

Ces documents sont réalisés à la demande de l'industriel le plus souvent par des bureaux d'études en environnement. Seuls, les études réalisées pour l'exploitation des granulats marins sont expertisées par un institut scientifique dédié (Ifremer).

Il apparaît ainsi nécessaire de mettre en place un système de management et d'expertise afin de valider l'ensemble des études réalisées, dans un souci de gestion intégrée qui prend en compte les impacts cumulatifs des différentes activités.

6.5. Stratégies de gestion des impacts

Cette partie reprend et résume les stratégies de gestion des impacts mises en place ou prévues dans trois cas :

- 1- Le permis déposé par l'Ifremer pour la France en 2012 sur la dorsale médio-atlantique, dans la Zone,
- 2- Le projet d'exploitation des SMS dans la ZEE japonaise, mené par le JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) sous contrat avec le METI (Ministry of Economy, Trade and Industry),
- 3- La notice d'impact effectuée dans le cadre du projet d'exploitation Solwara 1 en Papouasie Nouvelle Guinée.

6.5.1. Permis français; extrait du permis sulfure en cours de signature

Référence : Cette partie reprend la stratégie d'études écologiques et océanographiques présentées dans le cadre de dépôt du permis par l'Ifremer sur la dorsale médio-atlantique. Ce permis a été présenté à l'AIFM et est en cours de signature.

Stratégie d'études écologiques et océanographiques

Description générale des études concernant les facteurs écologiques

En accord avec le Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques dans la Zone, le programme d'études écologiques a trois objectifs :

- Définir des profils écologiques témoins.
- Mettre en œuvre un programme de surveillance de l'environnement.
- Evaluer l'impact des activités proposées.

Le programme d'études écologiques comprendra un volet benthique et un volet pélagique. Il cherchera non seulement à évaluer la biodiversité des zones explorées mais également à identifier les facteurs environnementaux structurant ces communautés ainsi que les échanges biologiques et trophiques entre écosystèmes, en particulier :

- Des sites hydrothermaux actifs, principalement basés sur une ressource trophique d'origine chimiosynthétique.
- Des sites inactifs, principalement basés sur une ressource trophique d'origine photosynthétique, mais éventuellement aussi sur des voies métaboliques d'oxydation du soufre et des métaux.
- La biodiversité en dehors des zones hydrothermales sera également étudiée lors des plongées d'exploration.

Dans ces environnements, les micro-organismes ont un rôle fonctionnel prépondérant. Qu'ils vivent libres ou en symbiose avec des invertébrés de grande taille, ils sont à la base du réseau trophique chimiosynthétique et interviennent également dans le recyclage de la matière organique d'origine détritique. Ils jouent également un rôle majeur dans le cycle géochimique de certains métaux et la détoxification de l'environnement. L'étude des compartiments benthiques et pélagiques du programme d'environnement inclut donc le compartiment microbien.

La stratégie générale de ces études d'environnement reprend et accompagne les trois étapes de stratégie en géosciences (Tableau 6-7) :

- Etape 1 – Evaluation qualitative des assemblages benthiques et pélagiques.
- Etape 2 – Evaluation quantitative des assemblages et des relations faune-habitat.

- Etape 3 – Etudes du fonctionnement et de la dynamique des communautés benthiques. La mise en œuvre de cette stratégie nécessitera une synergie de moyen avec le programme de géosciences tout en respectant les objectifs et contraintes de chacun des deux programmes.

Tableau 6-7 Stratégie générale des études d'environnement.

	Etape 1	Etape 2	Etape 3
Objectif général	Description préliminaire des assemblages benthiques et pélagiques à l'échelle de la zone	Quantification de la structure des assemblages et des relations faune-habitat	Fonctionnement et des écosystèmes
Durée	60 h temps bateau (environ 15 traits de scampi de 4 h, mise en œuvre incluse)	1 mois	1 mois (pluriannuel)
Navire	L'Atalante ou Pourquoi pas ?	L'Atalante ou Pourquoi pas ?	L'Atalante ou Pourquoi pas ?
Engins		Victor + Module Route et module échantillonnage	Sous-marin ou ROV
Opérations	<ol style="list-style-type: none"> 1. Radiales vidéo pour la description des assemblages de mégafaune benthiques et benthos-démersale. 2. Prélèvements d'eau pour caractérisation du zooplancton. 3. Prospection acoustique des poissons pélagiques. 4. Initiation du suivi temporel des flux de matière organique et de l'hydrodynamisme. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Module route : mosaïques photographiques des sites actifs et inactifs. 2. Mesures in situ dans les fluides hydrothermaux. 3. Prélèvements fluides, substrats, faune et micro-organismes dans les différents types d'environnements (hydrothermaux, volcaniques, sédimentaires). 4. Initiation des expériences de colonisation 5. Initiation du suivi temporel d'un site hydrothermal. 6. Prélèvements d'eau pour caractérisation du zooplancton, y compris les larves d'invertébrés benthiques 7. Prospection acoustique des poissons pélagiques 8. Poursuite du suivi temporel des flux de matière organique et de l'hydrodynamisme. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Radiales vidéo et/ou mosaïques photographiques des sites actifs et inactifs : évolution temporelle. 2. Prélèvements de faune pour analyse du réseau trophique, espèces cibles pour études génétiques des populations. 3. Prélèvements de faune, substrats, tapis bactériens en condition de pression contrôlée, expérimentation ex-situ. 4. Poursuite des expériences de colonisation in-situ. 5. Poursuite du suivi temporel des flux de matière organique et de l'hydrodynamisme. 6. Prélèvements d'eau pour caractérisation du zooplancton, y compris les larves d'invertébrés benthiques.
Outils	Etape 1	Etape 2	Etape 3
	Sondeur monofaisceau 200 kHz	Sondeur monofaisceau 200 kHz	Préleveur et aquarium sous pression

	Bathysonde - Rosette	Bathysonde - Rosette	
	Caméra tractée Scampi	Modules de colonisation in-situ	Modules de colonisation in-situ
	Ligne de pièges à particules + courantomètre	Ligne de pièges à particules + courantomètres	Ligne de pièges à particules + courantomètres
		Mosaïque photos OTUS sur module route	
		Module Tempo ?	Module Tempo ?
		Drague épibenthique	
		Carottiers USNEL et multitube	
		ADCP	ADCP
Opérations à bord	Supervision des radiales de caméra tractée et premières descriptions de la mégafaune.	Description faune, conditionnement des spécimens et des échantillons de substrats.	Description faune, conditionnement des spécimens et des échantillons de substrats.
	Filtration des prélèvements d'eau et conditionnement des échantillons.	Filtration des prélèvements d'eau et conditionnement des échantillons.	Préparation d'échantillons de roches pour études de biodiversité bactérienne et interactions géobiologiques bactéries métaux.
	Supervision des prospections acoustiques de poissons pélagiques.	Supervision des prospections acoustiques de poissons pélagiques. Préparation d'échantillons de roches pour études de biodiversité bactérienne et interactions géobiologiques bactéries métaux.	Expérimentations en aquarium pressurisé.

Etape 1 – Biodiversité descriptive

L'objectif est de fournir un premier inventaire des espèces et habitats de la zone explorée ainsi que d'initier les suivis temporels relevant de l'étape 3 et concernant l'étude de la dynamique des écosystèmes.

Des radiales de la caméra tractée Scampi permettront d'établir une première cartographie des habitats et de leur mégafaune associée. Les traits de Scampi seront réalisés en priorité sur les sites identifiés comme présentant un intérêt pour l'étude, soit qu'un panache hydrothermal ait été détecté, soit qu'un dragage ait été planifié sur ces sites. Idéalement, la caméra tractée sera déployée avant les opérations de dragage afin de s'assurer qu'aucune espèce ou habitat particulièrement vulnérable n'est menacé.

Des prélèvements d'eau à la bouteille Niskin, à différentes profondeurs, seront filtrés et les filtrats conditionnés pour permettre un inventaire des espèces planctoniques incluant les micro-organismes (métagénomique).

La biomasse des poissons pélagiques sera évaluée à partir de relevés acoustiques au sondeur monofaisceau.

Des lignes de pièges à particules, courantomètres et néphélomètres seront mouillées afin d'évaluer les flux de matière particulaire, l'hydrodynamisme et la charge en particules sur la zone prospectée.

Etape 2 – Biodiversité quantitative

L'objectif est de quantifier l'abondance et la richesse spécifique des sites d'intérêt minier potentiel ainsi que de décrire les interactions faune / habitat sur ces sites, y compris les micro-organismes. Un site hydrothermal actif et un site inactif seront sélectionnés afin d'y initier un suivi temporel des assemblages et d'évaluer les capacités de recolonisation.

Des mosaïques photographiques sur des sites hydrothermaux actifs et des sites inactifs fourniront une cartographie haute-résolution de la distribution des espèces de mégafaune et des tapis microbiens. L'abondance ou le taux de couverture de ces espèces seront quantifiés.

Un échantillonnage systématique de la mégafaune ainsi qu'un échantillonnage aléatoire de la macrofaune, la méiofaune et des micro-organismes fourniront un inventaire des espèces et une estimation de la richesse spécifique sur chacun des sites étudiés. Les méthodes d'échantillonnage seront adaptées aux types de substrats rencontrés. Sur substrat dur, l'échantillonnage sera réalisé à l'aide des outils de prélèvement de l'engin sous-marin, sur substrat meuble, l'échantillonnage pourra éventuellement être réalisé par des engins à câble, carottiers et dragues épibenthiques.

L'acquisition de paramètres environnementaux pertinents à chaque habitat tels que les caractéristiques physico-chimiques des fluides hydrothermaux purs et dilués, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de fond, les caractéristiques physico-chimiques du substrat, la charge en particules et l'hydrodynamisme dans la couche limite benthique permettront de décrire et quantifier les interactions faune-habitat.

Des prélèvements de substrats dans différents contextes d'hydrothermalisme actif ou de dépôts sulfurés inactifs seront dédiés à l'étude des interactions géobiologiques fluides/minéraux/bactéries.

Un suivi temporel des assemblages de mégafaune et des paramètres environnementaux pertinents sera initié par déploiement d'un observatoire tempo sur un site actif et un site inactif. Sur ces mêmes sites, des modules de colonisation ou des expériences de défaunation seront mises en œuvre afin d'évaluer et comparer les capacités de colonisation.

L'étude du pélagos se poursuivra par l'inventaire des espèces de zooplancton et de biomasse du necton.

Etape 3 – biodiversité fonctionnelle

L'objectif est d'apporter des éléments de connaissance suffisants sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes afin de pouvoir évaluer l'impact direct et indirect d'une exploitation minière, les capacités de résilience des écosystèmes ainsi que de définir le cas échéant des zones témoins d'impact et des zones témoins de préservation.

La cartographie de la faune benthique des sites, comparée à celle réalisée au cours de l'étape 2, ainsi que les résultats des observatoires déployés à l'étape 2 permettront d'évaluer la variabilité naturelle à deux échelles spatiales et temporelles.

L'étude du réseau trophique, basée sur les rapports isotopiques du Carbone, de l'Azote et du Soufre, permettra d'évaluer l'origine des ressources trophiques ainsi que la complexité trophique des écosystèmes. Cette étude sera complétée par une approche de métagénomique et métatranscriptomique sur les communautés microbiennes.

L'étude de la structure génétique de populations d'espèces cibles permettra d'évaluer la connectivité de ces populations. Pour être pertinentes, ces études devront inclure plusieurs populations à l'échelle régionale.

L'étude de la faune colonisatrice des modules déployés ou des quadrats défaunés à l'étape 2 permettra de décrire les premiers stades de succession écologique.

L'étude des flux larvaires basés sur l'analyse des pièges à particules et du zooplancton ainsi que l'étude du cycle de vie d'espèces cibles, y compris leur mode d'acquisition des

symbiontes autotrophes, couplés à la structure génétique des populations et leur cinétique de colonisation permettront de mieux comprendre la dynamique des écosystèmes et d'évaluer leur capacité de résilience.

Des expérimentations en laboratoire, en conditions de température et de pression contrôlées, seront réalisées au cours de la campagne océanographique afin de tester la réponse physiologique au stress d'individus d'espèces cibles, y compris des micro-organismes.

- *Représentativité des profils écologiques témoins, des zones témoin d'impact et des zones témoin de préservation*

La finalité des études d'environnement est de pouvoir définir des profils écologiques témoins, des zones témoin d'impact et des zones témoin de préservation dans la perspective d'une exploitation des ressources minières. La réalisation de ces objectifs nécessite d'évaluer la représentativité structurelle et fonctionnelle des profils et zones sélectionnés et par conséquent d'acquérir des connaissances préalables sur la variabilité naturelle de la structure des communautés, la distribution des espèces vulnérables au cours de leur cycle de vie, le mode d'acquisition des symbiontes par les larves ou juvéniles d'espèces hydrothermales structurantes, et la connectivité entre populations.

- *Profils écologiques témoins et zones témoins d'impact*

Les profils écologiques témoins et les zones témoins d'impact ont pour objectif d'évaluer les conséquences directes et indirectes de l'exploitation minière sur la structure d'assemblages faunistiques naturellement variables. Les composantes spatiales et temporelles de la variabilité naturelle, ainsi que leurs interactions, influenceront la représentativité des profils et zones témoins d'impact. Dans un environnement aussi hétérogène qu'une ride océanique et aussi dynamique qu'un écosystème hydrothermal, la structure des assemblages benthiques peut être extrêmement variable dans l'espace à l'échelle métrique et dans le temps à l'échelle sub-annuelle. Les profils écologiques témoins doivent tenir compte de cette hétérogénéité afin de fournir des indicateurs fiables de l'influence de forçages anthropiques. La variabilité temporelle des communautés associées à des habitats menacés sera évaluée au cours des étapes 2 et 3 de la stratégie d'études en environnement. Afin d'intégrer la variabilité spatiale, il sera important d'obtenir une cartographie haute-résolution de la distribution de la faune à l'échelle de chacun des sites, actifs et inactifs. Afin d'intégrer la variabilité temporelle, il est également nécessaire d'initier des suivis le plus tôt possible et de poursuivre ces études sur un minimum de deux ans. Les sites d'études seront sélectionnés en fonction de leur potentiel minier, tel que défini au cours des étapes 2 et 3 du programme d'études en géosciences.

- *Zones témoins de préservation*

L'objectif des zones témoins de préservation est de fournir un vivier d'espèces à partir duquel s'opérera la recolonisation des sites impactés par l'exploitation minière. Sur la ride médio-Atlantique, les habitats remarquables et les espèces particulièrement vulnérables que sont les écosystèmes hydrothermaux et les coraux profonds ont une distribution fragmentée. Compte-tenu de cette fragmentation, la représentativité des zones témoins de préservation ne peut être évaluée que par l'étude des métapopulations, c'est-à-dire un ensemble de populations distantes formant un réseau interconnecté par des flux larvaires. Il est important de pouvoir décrire la topologie de ce réseau afin d'une part de définir le rôle du site impacté dans la structure et la dynamique de la métapopulation, d'autre part d'identifier les populations alimentant le site impacté et pouvant jouer le rôle de témoin de préservation.

L'étape 1 de la stratégie d'études en environnement fournira une première cartographie des habitats et assemblages benthiques et permettra d'identifier les différents nœuds des réseaux de métapopulation. Au cours des étapes 2 et 3, l'analyse des larves et micro-organismes

associés, collectées dans les pièges à particules et les prélèvements d'eau, renseignera sur les flux de larves entrant les différents sites instrumentés. Les expériences de colonisation permettront également d'identifier quelles larves sont susceptibles de coloniser les sites et dans quelles conditions environnementales. Enfin, la génétique des populations d'espèces cibles devrait permettre d'identifier l'origine de ces larves et d'évaluer la connectivité entre populations.

Evaluation préliminaire de l'impact des activités d'exploration

Les activités d'exploration potentiellement dommageables pour l'environnement sont principalement liées à l'échantillonnage intrusif. On entend par échantillonnage intrusif le prélèvement de substrat et/ou de faune par des engins trainants tels que les dragues ou les chaluts. Ces techniques de prélèvements sont classiquement utilisés par les scientifiques pour décrire les substrats et leurs faunes associées, leur impact est considéré comme marginal hormis dans les cas suivants :

- Un échantillonnage intensif sur une aire restreinte,
- Un échantillonnage d'une communauté hydrothermale,
- Un échantillonnage d'un massif corallien.

Afin de limiter l'impact potentiel d'un échantillonnage intrusif, plusieurs mesures seront mises en œuvre :

- Limiter l'échantillonnage intensif en privilégiant l'observation par caméra tractée et/ou submersible,
- Là où existent de fortes suspicions d'activité hydrothermale, procéder à des observations vidéo par caméra tractée avant tout échantillonnage intrusif,
- Proscrire l'échantillonnage intrusif de communautés hydrothermales,
- Là où existent de fortes suspicions de présence d'un massif corallien d'après les données de bathymétrie et d'imagerie haute-résolution, procéder à des observations vidéo par caméra tractée avant tout échantillonnage intrusif,
- Proscrire l'échantillonnage intrusif de massifs coralliens.

6.5.2. Cas de Jogmec dans la ZEE japonaise

Référence : International Workshop on Environmental Management Needs for Exploration and Exploitation of Deep Seabed Minerals , Fiji Islands, 29 November – 3 December 2011, Tetsuhiko TOYOHARA and Nobuyuki OKAMOTO, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: Concept of EIA and Conservation Strategy to Protect Biodiversity for Seafloor Massive Sulphides Mining

Le projet d'exploitation des SMS dans la ZEE japonaise est mené par le JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) sous contrat avec le METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). JOGMEC est une Institution administrative indépendante japonaise (**Independent Administrative Institution**) créée en 2004 lors de la fusion de la National Oil Corporation avec l'Agence des mines de métaux du Japon.

Ce projet d'exploitation a débuté en 2009 et a pour objectif de définir un plan à 10 ans de commercialisation des SMS. Les sulfures polymétalliques ciblés sont situés dans le bassin arrière arc d'Izu Bonin et dans la dépression d'Okinawa, respectivement au sud-est et sud du Japon. Ce plan d'exploitation des SMS comporte plusieurs volets : depuis l'évaluation des ressources et de l'impact environnemental jusqu'à des études sur la technologie d'exploitation, de séparation et de raffinage du minerais. JOGMEC est en charge de toutes ces activités.

Ce plan s'organise en 2 étapes. La première (2008-2012) a pour but l'évaluation de la ressource dans les zones cibles, le développement de la procédure d'étude d'impact environnemental (comprenant une *Environmental Baseline Study (Etat Initial)* et le développement d'une approche de modélisation physico chimique et écologique), le développement d'équipements d'exploitation test et d'une usine pilote de traitement du minerai. La première phase sera évaluée avant le passage à la seconde étape (2012-2017). La seconde étape a pour objectif de proposer une étude de faisabilité après une évaluation précise de la ressource et des impacts, un test du système d'extraction à échelle commerciale et du système de traitement à l'échelle 1/2. La notice d'impact environnemental sera accompagnée de la mise en place d'une approche de surveillance, de la vérification des modèles écologiques et physico chimiques ainsi que la proposition de mesures de conservation.

Ce projet est réalisé par le JOGMEC, sous contrat du METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Un comité de projet (SMS project committee) consultatif est coordonné par le Prof. Taira (Directeur du JAMSTEC) a pour tâche d'examiner les résultats présentés par JOGMEC et de proposer des suggestions. Ce comité est organisé en 4 groupes de travail thématiques : 1- évaluation de la ressource, 2- Environmental Impact Assesment, 3- Technologies d'extraction, 4- Traitement du minerais). Les résultats sont également publiés à destination d'un groupe de parties prenantes (industriels, scientifiques et décideurs) – Ocean Mining Industry.

Dans ce type de projet, Le JAMSTEC semble avoir un rôle d'expertise soit en amont (définition de stratégies d'évaluation d'impact) soit en aval (avis sur les demandes d'exploration) de l'exploration des ressources minérales. L'exploration, l'évaluation de la ressource et de l'impact environnemental sont conduits par le JOGMEC, au moins pour les sulfures polymétalliques de la ZEE japonaise.

L'acquisition de données nécessaires à l'établissement de l'état initial (Environmental Baseline Study) a été effectuée au cours de 12 campagnes (presque 200 jours) de entre 2008 et 2010. Ces campagnes se sont déroulées sur des navires du JOGMEC ou du JAMSTEC, utilisant pour certaines l'AUV Urashima, le ROV KAIKO7000II ou le submersible habité Shinkai 6500. Les deux cibles (Okinawa Trough et Izu Bonin) ont été étudiées suivant les approches suivantes : cartographie, étude des différents compartiments biologiques (benthos, plankton, nekton) et de l'environnement (qualité de l'eau, du sédiment, flux particulaire, courantologie).

Cette étude prévoit également de développer une méthodologie d'évaluation de l'impact (EIA) de l'exploitation des SMS, et de réaliser cette évaluation lors de tests miniers. Cette étude d'impact s'articule autour de 3 composantes : recherche, prédiction et évaluation. La base de données disponible sur les zones cibles s'avère insuffisante pour conduire une étude d'impact correcte. Il est donc nécessaire de réaliser des recherches supplémentaires pour enrichir cette base de données. Le volet Prédiction quantitative sera assuré par le développement d'un modèle écologique associé à un modèle 3D de courantologie. Enfin, l'évaluation de l'impact prendra en compte la législation environnementale japonaise et les recommandations internationales.

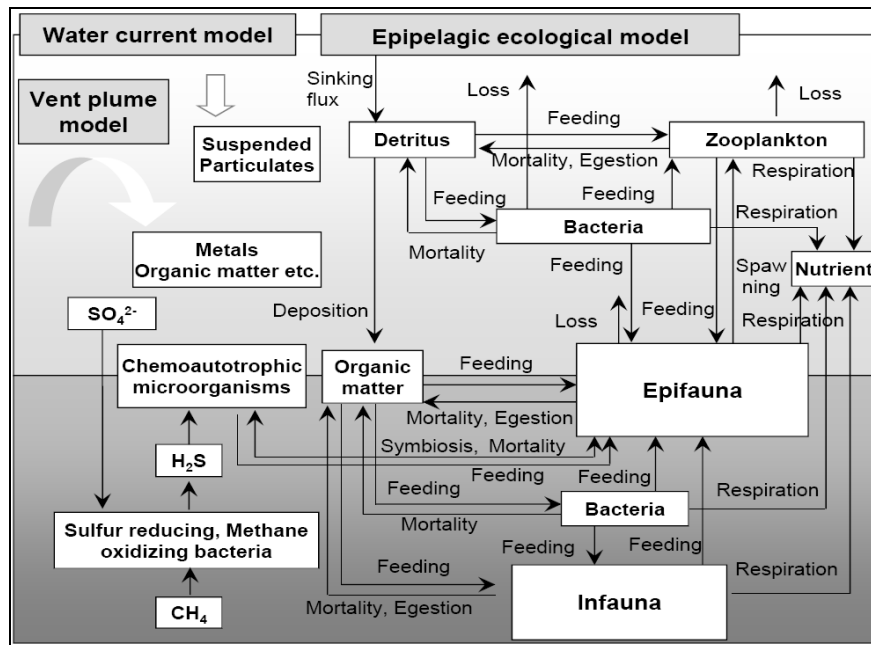


Figure 6-11 Construction d'un modèle écologique.

Ce plan intègre une stratégie de protection de la biodiversité ciblée sur les espèces endémiques du pôle chaud. Les études menées (structure des communautés et génétique des populations) indiquent une connectivité génétique des plusieurs espèces hydrothermales entre les différents sites hydrothermaux échantillonnés. La stratégie de préservation et de restauration de l'écosystème serait basée sur la mise en réserve de zones abritant des populations « sources », zones connectées génétiquement aux zones exploitées.

6.5.3. Cas de Nautilus en Papouasie-Nouvelle-Guinée

Références : *Environmental Impact statement, Nautilus Minerals Niugini Limited, Solwara 1 Project, Executive summary- September 2008-CR7008-9-v4*

La société Nautilus Minerals Niugini Limited (Nautilus) propose de passer à la phase d'exploitation des sulfures polymétalliques (projet Solwara 1). Le gisement ciblé est situé à 1600m de profondeur, dans la mer de Bismarck, dans la zone économique exclusive de la Papouasie Nouvelle Guinée (PNG). Ce projet rentre dans la juridiction du code minier local (*Mining Act 1992*). Il requiert la réalisation d'une étude d'impact environnemental (EIS – *Environment Act 2000*) et sa soumission au *Department of Environment and Conservation*. L'approbation par le gouvernement de la Papouasie Nouvelle Guinée de l'EIS et des mesures d'atténuation proposée par Nautilus est un prérequis pour le démarrage des opérations.

Le projet comprend 2 étapes : extraction puis traitement du minerai. La seconde étape de traitement doit être effectuée localement en Papouasie Nouvelle Guinée. L'étude de faisabilité de l'étape 2 commencera lorsque l'étape 1 aura démontré l'efficacité des procédés d'extraction et de transfert et que le projet aura validé l'intérêt économique.

Cette partie reprend les grandes lignes des travaux effectués dans le cadre de l'évaluation de l'impact environnemental (EIS) correspondant à la phase 1 du projet (extraction et transfert sur le navire).

La zone concernée

La zone cible (Solwara 1) est située sur le flanc nord-ouest du volcan actif North Stu (Figure 6-12). La surface de la zone à exploiter est de 0,112 km². Solwara 1 est constituée d'un champ de cheminées sur des dépôts de sulfures massifs. Ces dépôts sont partiellement recouverts d'une couche de sédiment.

La zone sud (South Stu) est située à 2 km de Solwara 1. Elle abrite des cheminées actives et est une zone de référence potentielle.

Méthode d'exploitation

L'étape d'évaluation de la ressource a permis d'identifier 5 zones de minéralisation sur Solwara 1. La couverture de sédiment à déplacer avant l'exploitation est évaluée à 130 000 t, en plus des 115 000 t de résidus rocheux.

La méthode d'exploitation est schématisée sur la Figure 6-13. Un « Seafloor mining Tool » (SMT – 250t) sera déployé et opéré depuis un navire de surface (Mining Support Vessel – 135 m de long), avec l'appui de 2 ROV. Le minerai extrait par le SMT sur les zones cibles sera désagrégé puis pompé vers le navire support en utilisant un riser (Riser and Lift system – RALS). En surface, le minerai sera séché, stocké dans des barges avant son transfert vers la terre. L'eau résultant de l'étape de séchage, associée à des particules fines (<8µm), sera redirigée vers le fond et déchargée à proximité de la zone d'extraction, entre 25 et 50 m au-dessus du fond.

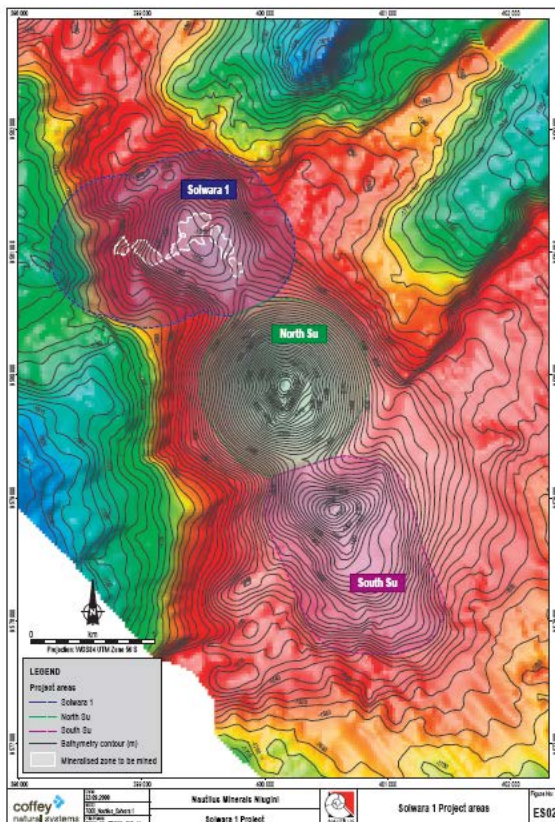


Figure 6-12 Zone d'exploitation et zone de réserve potentielle.

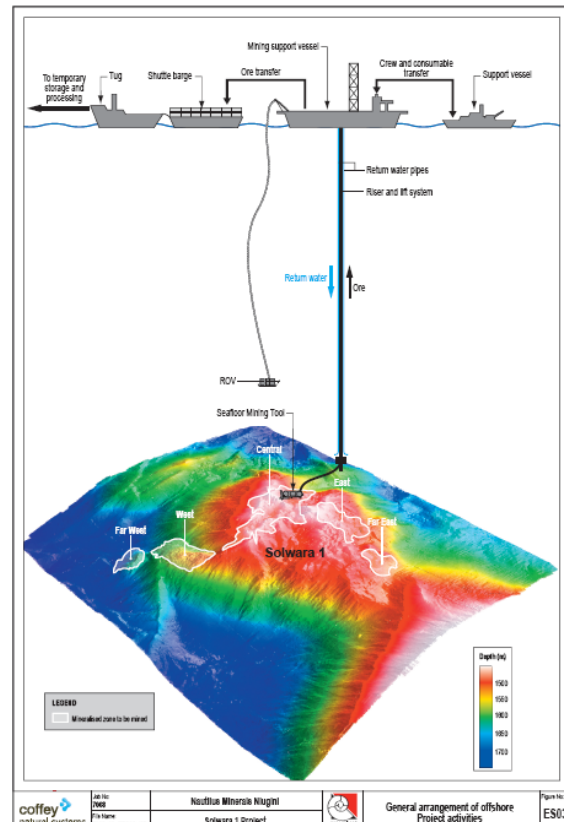


Figure 6-13 Procédure d'exploitation.

Procédure d'évaluation de l'impact environnemental

La Figure 6-14 présente la procédure d'évaluation de l'impact environnemental (EIA) suivie dans le cadre d'une demande de permis. La procédure est encadrée selon la réglementation locale par le *Department of Environment and Conservation* (DEC), avec une décision au niveau ministériel. Cette procédure d'évaluation de l'impact environnemental comprend un rapport initial (*inception report*), suivi après approbation par le DEC de l'étude d'impact environnemental (EIS- Environmental Impact Statement).

La revue de l'EIS est dirigée par le Directeur du DEC qui peut en référer aux Provinces concernées, demander des informations complémentaires et faire appel à des groupes consultatifs (grand public, parties prenantes, ...). La consultation des parties prenantes est une étape importante et réglementée dans le processus d'évaluation et d'approbation de l'EIS. L'EIS est ensuite rendue publique durant une période déterminée, suite à laquelle le Directeur du DEC accepte ou rejette l'EIS. L'approbation finale relève alors du ministre, afin que le proposant finalise sa demande de permis.

La procédure d'évaluation de l'impact environnemental a trois objectifs :

- Comprendre le fonctionnement de l'environnement (Evaluation de l'état initial, Environmental Baseline Study)
- Evaluer les impacts potentiels de l'activité,
- Proposer des méthodes de réduction ou d'atténuation de l'impact (stratégie Evaluer, Réduire, Compenser).

Les impacts socio-économiques et impacts sur le changement climatique sont également présentés dans le rapport final, mais non repris dans ce document qui se limite aux aspects offshore.

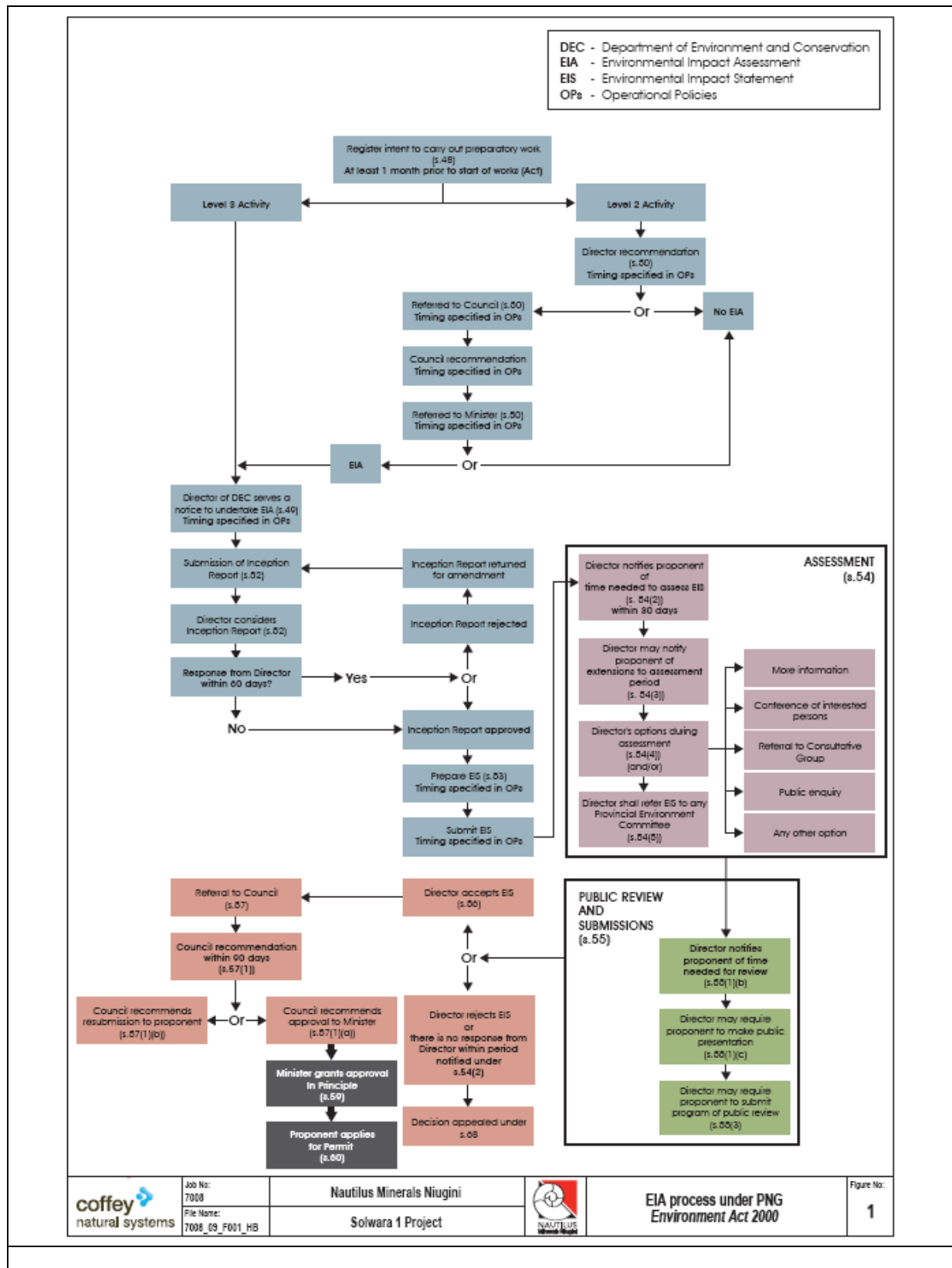


Figure 6-14 Procédure d'évaluation environnementale du projet Nautilus.

Réalisation de l'EIA

L'évaluation de l'impact environnemental a été réalisée par la société australienne Coffey Natural Systems sous la direction du Dr. Samantha Smith, responsable du groupe "Environnement" dans la société Nautilus.

Coffey Natural Systems, (Australia) est une entreprise spécialisée dans l'évaluation d'impact environnemental et social dans le secteur des mines, du pétrole, du gaz et de l'infrastructure. Nautilus a également fait appel à des scientifiques renommés pour réaliser des études supplémentaires en environnement marin profond. Huit campagnes à la mer ont été réalisées dans ce cadre. Le tableau suivant liste les domaines abordés durant les études environnementales, ainsi que les acteurs impliqués (liste non exhaustive).

Tableau 6-8 Scientifiques consultés pour la réalisation des études complémentaires.

Thématique	Organisme consultés
Macrofaune de substrats durs	College of William and Mary, Duke University
Macrofaune et méiofaune sédimentaires	Scripps Institution of Oceanography
Méiofaune abyssale	Dr John Moverley and Coffey Natural Systems
Géologie sédimentaire	University of Toronto
Géochimie sédimentaire, – tests de lixiviation et de toxicité	CSIRO and Charles Darwin University
Biomasse, biodiversité et bioaccumulation	Hydrobiology
Qualité de l'eau	CSIRO and Coffey Natural Systems
Risques naturels	Rabaul Volcano Observatory
Océanographie	Coffey Natural Systems
Modélisation acoustique sous-marine	Curtin University of Technology
Modélisation de la dispersion du panache	Asia-Pacific Applied Science Associates

Les objectifs et approches mis en œuvre durant l'EIA pour la partie océanique sont présentés dans le tableau suivant. Les résultats sont développés dans le rapport final (*Environmental Impact statement, Nautilus Minerals Niugini Limited, Solwara 1 Project, Volume A - Main report*).

L'EIS a été soumise au gouvernement de PNG en Septembre 2008 dans le cadre du processus d'approbation des projets d'exploitation minière. Le permis environnemental final pour le développement du projet Solwara 1 a été reçu le 29 Décembre 2009, de la Direction de l'Environnement et de la Conservation (DEC) de la Papouasie-Nouvelle-Guinée pour une durée de 25 ans, venant à échéance en 2035.

Tableau 6-9 Objectifs et approches mis en œuvre durant l'EIA pour la partie océanique.

Objectif	Approche
Evaluation des risques naturels	
Identifier et caractériser les dangers et les risques potentiels associés à la construction et l'exploitation du projet, y compris les risques sismiques	Organiser un atelier pour identifier et caractériser les dangers potentiels posés par le projet
Estimer la probabilité de provoquer un événement (tremblement de terre, éruption volcanique, etc...)	Utiliser les données et informations pertinentes, y compris l'activité sismique
Ecrire les procédures de conception et d'exploitation du projet afin les risques soient réduits à être aussi bas qu'il est raisonnablement possible	
Gestion des déchets	
Développer un plan de réduction et de gestion des déchets	Le plan de réduction et de gestion des déchets répondra aux réglementations

Objectif	Approche
	nationales et internationales pertinentes (par exemple Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires [MARPOL])
Utilisation des ressources existantes	
<p>Décrire la nature de la pêche commerciale et de subsistance</p> <p>Évaluer l'impact potentiel du projet sur ces pêcheries</p> <p>Élaborer des procédures pour communiquer avec les navires de pêche au cours du projet</p> <p>Décrire les routes maritimes commerciales et les mesures de coordination à développer</p>	<p>Consultations avec les pêcheries, les agences de transport maritime, et de la communauté en PNG.</p> <p>Consultation avec l'autorité Nationale des Pêches et d'autres experts ayant une expérience pertinente dans le pays</p>
Météorologie	
<p>Rassembler toutes les données météorologiques et océanographiques disponibles sur la mer de Bismarck</p> <p>Utiliser les données collectées et acquises durant l'EIA pour modéliser les courants dans la mer de Bismarck</p>	<p>Étude bibliographique pour rassembler les données (vent, vagues, courants, niveau de la mer) sur la mer de Bismarck à l'intérieur et à l'extérieur de la PNG</p>
Océanographie	
<p>Obtenir 12 mois de profils de courant sur toute la colonne d'eau à Solwara 1</p> <p>Utiliser les données collectées et acquises durant l'EIA pour modéliser les courants dans la mer de Bismarck</p>	<p>Déploiement de quatre ADCP à différentes profondeurs avec des données téléchargées tous les trois mois</p>
Modélisation hydrodynamique - processus de déshydratation du minerais	
<p>Déterminer la composition de l'eau devant être évacuée pendant le processus de déshydratation</p> <p>Modéliser la dispersion de l'eau déchargée à des profondeurs différentes en tenant compte de la densité de l'eau de décharge, la teneur en sédiment, la taille des particules, les courants marins latéraux / verticaux et la présence d'un upwelling</p> <p>Déterminer la profondeur la plus appropriée de la décharge en tenant compte la position de la zone de minimum d'oxygène et de la zone photique</p> <p>Déterminer les contours des concentrations de contaminants et les limites de la zone de mélange</p> <p>Évaluer la conformité aux normes de qualité de l'eau ambiante</p>	<p>Recueillir des données hydrologiques locales annuelles telles que la direction et la vitesse du courant pour les utiliser dans la modélisation hydrodynamique</p>
Modélisation hydrodynamique - fonds marins	
<p>Déterminer la génération et l'étendue de panaches provenant du matériel d'exploitation minière des fonds marins</p> <p>Modéliser la dispersion du panache sur le fond marin</p>	<p>Modélisation hydrodynamique en utilisant les données obtenues sur Solwara 1</p>
Taux de sédimentation – Environnement profond	
<p>Déterminer le taux de sédiments / dépôt de matière particulaire sur Solwara 1 et sur le site de référence (18 mois)</p>	<p>Installation de pièges à particules (x12) autour de Solwara 1 et South Su</p>
Géochimie des sédiments	
<p>Déterminer la ligne de base de la géochimie des sédiments sur Solwara 1 et le site de référence</p>	<p>Prélèvements par le ROV de carottes de sédiments et comparaison avec les données antérieures</p>
Qualité de l'eau	
<p>Déterminer la qualité initiale de l'eau (colonne d'eau et</p>	<p>Prélèvements d'eau effectués par le ROV</p>

Objectif	Approche
eau de fond) à Solwara 1 et South Su	(Bouteilles Niskin)
Évaluation des habitats benthiques	
Caractériser les habitats marins à proximité des sites actifs	Évaluation visuelle de transects vidéo, échantillons de sédiments pour la caractérisation de la faune
Macrofaune	
Etablir la liste des espèces présentes à Solwara 1 Etablir la liste des espèces présentes sur le site de référence	Identification des espèces prélevées en utilisant des approches morphologiques et génétiques Comparer Solwara 1 avec le site de référence (South Su) et d'autres données régionales
Archivage des observations visuelles	
Enregistrer les observations visuelles à Solwara 1 et le site de référence	Utilisation de flux vidéo en direct de la ROV, les observations ont été enregistrées par des scientifiques dans une base de données pour caractériser le fond marin. Plus de 8000 observations ont été faites à ce jour
Imagerie vidéo, observations visuelles	
Enregistrer les observations visuelles à Solwara 1 et sur le site de référence Enregistrement des habitats benthiques à Solwara 1	Archivage des observations visuelles effectuées par les scientifiques dans une base de données pour caractériser le fond marin. durant les plongées du ROV. Archivage des vidéos et des photos obtenues par le ROV sur la zone.
Bioaccumulation	
Déterminer la bioaccumulation le long de la chaîne trophique jusqu'aux espèces de surface (maquereau, thon)	Utiliser un modèle biophysique intégrée de la dispersion et de l'absorption de métaux par plusieurs niveaux trophiques. Valider le modèle avec les échantillons de tissu Caractériser la biomasse de la faune profonde
Bioluminescence	
Prédire les effets des activités minières sur les espèces profondes (y compris les poissons) qui dépendent de la bioluminescence	Etude bibliographique pour estimer la présence d'espèces bioluminescentes dans la colonne d'eau et sur le fond Utiliser les résultats de la modélisation hydrodynamique pour évaluer les impacts de l'augmentation de la turbidité de l'eau sur les animaux dépendant de bioluminescence
Bruit, lumière, vibrations	
Déterminer le bruit sous-marin des navires et des équipements du projet Évaluer les distances de la source de bruit à atténuer à des niveaux de seuil et de déterminer les impacts probables sur la vie marine, en particulier les cétacés Gérer les interactions potentielles avec les cétacés par l'application de procédures définies pour les activités telles navires plates-formes de forage sur d'autres grandes voies de migration (par exemple nord-ouest du	Etude bibliographique utilisant les résultats de recherche provenant de l'exploitation de pétrole et de gaz offshore• revue des données de présence de cétacés et d'activité de tortues dans la zone (y compris la consultation avec DEC et d'autres sources d'expertise identifiées en PNG) Modélisation acoustique sous-marine Consultation locale

Objectif	Approche
Plateau de l'Australie) Décrire les effets d'attraction potentiels de la présence de navires en surface	

Evaluation de l'impact

Les principaux impacts environnementaux potentiels au cours de la phase de production ont été identifiés :

- Destruction des habitats
- Génération d'un panache de particules au niveau de l'engin de coupe et du riser,
- Bruit / Vibrations (sur le fond et à la surface).

Les critères d'évaluation de l'impact ont été discutés durant plusieurs réunions (internes ou externes). Les résultats de ces workshops sont résumés dans un document global : le registre des risques. Les critères sont basés sur trois caractères :

- L'étendue avec 3 échelles : le site (< 1 km), locale (1-10 km), Régionale (> 10 km),
- La durée : prolongée (> 1 an après la fin du projet), courte (limitée à la durée du projet)
- La sévérité : négligeable (non détectable), faible (détectable mais non significatif), modéré (détecté mais sans effet majeur), élevé (impact négatif et élevé sur la survie d'une population, d'une communauté ou d'un écosystème).

Mesures d'atténuation :

La proposition de mesures d'atténuation est une partie intégrante de la procédure d'évaluation de l'impact. Les stratégies proposées dans le document ont été élaborées en consultation avec une équipe internationale d'experts en sciences de la mer, groupe ayant également contribué à l'acquisition de données durant la procédure. Quelques stratégies d'atténuation proposées sont résumées ci-dessous :

L'hypothèse principale est que l'activité hydrothermale reprendra rapidement sa place, suivie par une recolonisation rapide.

La zone South Su, non exploitée, est mise en réserve. Elle permet de continuer les études de variations environnementales en conditions naturelles et peut servir de sources d'organismes. L'activité minière sur la zone propose de terminer par les zones les plus à l'Est. Cette zone servira de refuge et de sources de larves durant une grande partie du projet. Cette zone est ainsi appelée « zone de refuge temporaire ». Il est indiqué que cette zone sera exploitée seulement lorsque les critères de récupération auront été atteints sur les premières zones exploitées.

- Recolonisation : pour améliorer la recolonisation - certains animaux seront déplacés de zones à exploiter vers des zones où l'exploitation est terminée. Le déploiement de substrats artificiels de colonisation pourra également augmenter les chances de recolonisation.
- Gestion des déchets solides : le dépôt de sulfures à Solwara est, par endroit, couvert d'une couche de sédiments (150 000t). Ces sédiments ainsi que les déchets solides produits par les opérations minières (estimation 115 000t) seront stockés au Nord de la zone minière. Ce déplacement sur le fond serait moins impactant que sa remontée et son stockage en surface.

Pour limiter les impacts des eaux de rejet sur les récifs coralliens, les poissons et les mammifères marins, il est proposé de i) relarguer cette eau de rejet chargée en particules à des profondeurs de 25 à 50 mètres au-dessus du fond à proximité de la zone d'origine des sédiments, ii) filtrer cette eau de rejet (8 µm) avant son relargage pour limiter sa charge particulaire et iii) limiter le temps d'exposition de l'eau de rejet à des températures et à l'oxygénation de surface, réduisant ainsi le potentiel de changements géochimiques.

Plan de gestion environnementale

La procédure d'évaluation de l'impact spécifie la mise en place d'un plan de gestion Environnementale (Environmental Management Plan – EMP). Ce plan n'est pas encore disponible mais devrait proposer les procédures de mise en œuvre, de gestion et de reporting des différentes phases du projet, allant jusqu'aux opérations de démantèlement. Ce plan comprend notamment la validation des impacts prédits, l'identification des effets imprévus et les besoins de mesures de gestion supplémentaires.

La critique de l'EIA par les ONG - La campagne « Deep sea mining »

Références :

Out of Our Depth: Mining the Ocean Floor in Papua New Guinea, November 24, 2011 | Dr. Helen Rosenbaum, Deep Sea Mining Campaign

Physical Oceanographic Assessment of the Nautilus Environmental Impact Statement for the Solwara 1 Project – An Independent Review, November 6, 2012 | Prepared for the Deep Sea Mining Campaign (affiliated with Friends of the Earth Australia) by John L Luick, PhD, Austides Consulting, Adelaide, Australia

Independent Review of the Environmental Impact Statement for the proposed Nautilus Minerals Solwara 1 Seabed Mining Project, Papua New Guinea, January 10, 2009 | Professor Richard Steiner

La campagne Deep Sea Mining (<http://www.deepseaminingoutofourdepth.org/>) est une association d'ONG et de citoyens des îles du Pacifique, d'Australie et du Canada. Cette association s'inquiète des impacts probables du DSM sur les écosystèmes marins et côtiers et les communautés. L'objectif de la campagne DSM est de proposer une réponse de la société civile aux projets d'exploitation minière grands fonds dans la région du Pacifique. La campagne DSM est un projet de l'Ocean Foundation (<http://www.oceanfdn.org>) et de la Deep Sea Conservation Coalition (<http://www.savethehighseas.org/>).

Les trois documents cités insistent sur le caractère précurseur de ce projet, qui sera la première exploitation minière grande échelle dans l'océan profond et sur la nécessité de le considérer avec une attention exceptionnelle.

Deux rapports ont été publiés par la campagne Deep Sea Mining. Le premier « Out of our Depth : Mining the Ocean Floor in Papua New Guinea » critique les études présentées par Nautilus Minerals dans le cadre de son EIS et notamment les nombreux risques qui restent à identifier, évaluer et modéliser. Ce document expose également la nécessité de mettre en place une procédure d'enquête publique après la présentation du plan de gestion environnementale (EMP) et avant le début des opérations minières. Le rapport souligne la nécessité de réaliser une évaluation sociale et économique de l'impact des opérations minières (ressources halieutiques, santé publique, culture, création d'emplois et retour sur investissement...). Enfin les auteurs concluent sur la portée trop locale de l'étude d'impacts menée par Nautilus, et la nécessité de développer un cadre réglementaire s'intéressant aux impacts cumulés de plusieurs exploitations minières à l'échelle, pour ce cas, de la mer de Bismarck ou du Pacifique.

Le second rapport (Physical Oceanographic Assessment of the Nautilus Environmental Impact Statement for the Solwara 1 Project – An Independent Review) est un examen plus détaillé des données et analyses d'océanographie physique, de sédimentation et de dispersion du panache de l'EIS présentée par Nautilus.

Cet avis remet en cause les conclusions qui souffrent d'un manque de rigueur dans la présentation, l'analyse et la modélisation des données. L'auteur reconnaît cependant la qualité du plan d'échantillonnage et du protocole d'acquisition de la donnée. Les critiques portent notamment sur l'absence de résultats présentés sur les courants de surface, la non prise en compte des possibilités d'upwelling et la sous-estimation des vitesses de courant verticales. Enfin, le calcul de la flottabilité du panache rejeté est remis en cause, calcul qui après modification positionnerait le panache rejeté dans une zone de courants en direction de la côte. D'après ce rapport, le document produit par Nautilus minimise considérablement les risques auxquels pourraient faire face les communautés locales et l'environnement marin.

Enfin, le site présente également une revue indépendante de l'EIS publiée par Nautilus Minerals (Independent Review of the Environmental Impact Statement for the proposed Nautilus Minerals Solwara 1 Seabed Mining Project, Papua New Guinea), revue effectuée à la demande du « Bismarck-Salomon Seas Indigenous Peoples Council ». Les conclusions de cette revue sont comparables à savoir que l'EIS n'apporte pas suffisamment d'informations pour que l'impact des activités minières soit correctement évalué, et que cet impact affectera les écosystèmes profonds à une échelle beaucoup plus large que la seule zone Solwara.

Cette revue s'appuie notamment sur le manque de données acquises sur la variabilité génétique des populations entre les différents sites et le nombre important d'espèces endémiques découvertes, espèces qui pourraient être irrémédiablement détruites par le projet. Le manque de données sur le compartiment pélagique, la sous-estimation des risques associés au relargage du panache, à l'augmentation du bruit et de la lumière et enfin aux accidents sont également soulignés.

6.6. Mesures de compensation et de restauration

La doctrine éviter-réduire-compenser (ou séquence ERC) fait partie, en France, des éléments à mentionner lors de l'établissement d'études d'impact (code de l'environnement, article L122-1). Le maître d'ouvrage doit ainsi proposer des mesures visant l'absence de perte d'habitat ou d'espèce (principe du « no net loss »). La logique de la séquence doit être respectée : l'évitement des impacts - par le choix du lieu du projet, du choix des techniques, du type de projet... - la réduction des impacts afin de les rendre résiduels (ou non significatifs), enfin, lorsque les impacts n'ont pu être, ni évités, ni réduits, des mesures de compensation sont proposées. La proposition de mesures de compensation ne peut être utilisée pour justifier de ne pas chercher à éviter et réduire les impacts du projet. Cette doctrine existe en France mais également dans d'autres pays, comme les Etats-Unis, l'Australie, la Grande-Bretagne...

Dans le cas de projets particulièrement impactant, la notion d'utilité publique doit être démontrée et justifiée au préalable. Enfin, la compensation doit correspondre à des actions de terrain avec une obligation de résultats, et non à un dédommagement financier. Les financements dédiés à la compensation doivent servir à la réalisation des actions.

La compensation est un mécanisme qui ne doit intervenir qu'après la mise en place de mesures d'évitement et de réduction des impacts initialement identifiés. Les mesures

compensatoires ne concernent donc que les dommages résiduels, inévitables, du projet sur la biodiversité (UICN, 2011).

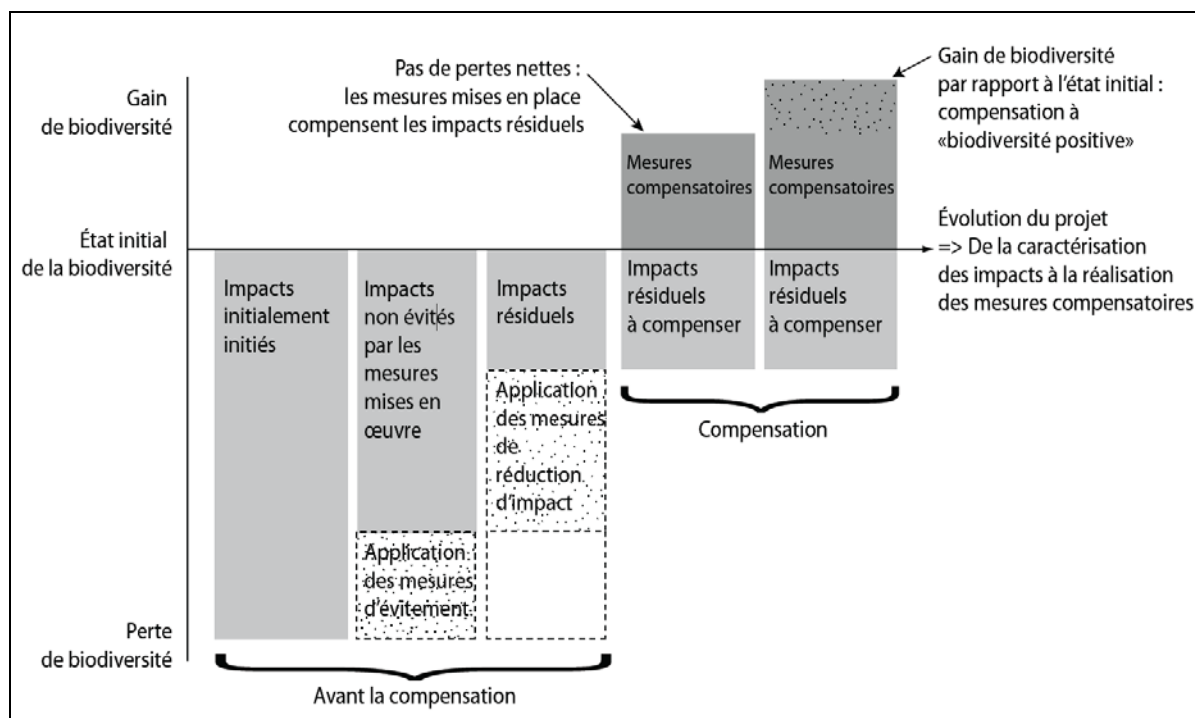


Figure 6-15 Hiérarchisation des mesures d'évitement, d'atténuation et de compensation (adaptation du schéma du BBOP in UICN France, 2011).

Il existe quatre grands types de mesures de compensation : la création (création d'un nouvel écosystème), la restauration (remise en état l'écosystème dégradé par la restauration de la biodiversité et du fonctionnement de l'écosystème, de la santé et de l'intégrité des humains et des autres organismes) (Clewell and Aronson, 2013; SER, 2004), l'amélioration (amélioration de la qualité de l'environnement), la préservation (achat de terrain qui seront protégés de tout usage anthropique) (Levrel, 2012).

6.6.1. Mesures compensatoires existantes en milieu marin côtier

Référence : CGDD et MEDDE, 2013. Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. Collection « Références » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). Octobre 2013. 232 p.

La mise en place de mesures compensatoires doit tenir compte des spécificités du milieu marin : les écosystèmes marins sont moins cloisonnés que les écosystèmes terrestres ; ils communiquent et sont interdépendants sur des distances considérables ; l'acquisition foncière est exclue car le domaine public maritime (DPM) est inaliénable et imprescriptible ; les actions de restauration sont plus difficiles et coûteuses à mettre en place qu'à terre, et leur efficacité est incertaine.

Le guide pour l'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000 reconnaît la difficulté à appliquer le principe de mesures compensatoires en mer.

« En milieu marin, la reconstitution d'un habitat (par exemple, un banc de sable en lieu et place d'un site d'extraction) se heurte à de nombreuses difficultés inhérentes :

- au statut juridique même du milieu marin (domaine public maritime) ;
- à l'exercice de plusieurs usages aux objectifs souvent contradictoires, au sein de mêmes espaces ;
- à la faisabilité technique de la reconstitution : disponibilité de la source des matériaux d'emprunt [...];
- au contrôle de l'efficacité de la mesure et à la pérennité de celle-ci : difficulté du suivi nécessitant des moyens à la mer importants, pression des autres usages non maîtrisables sur le site ou à proximité et pouvant conduire à rendre caduque la mesure compensatoire ».

Toutefois, il existe des expérimentations en la matière, par exemple la création d'éco-récifs ou de récifs artificiels, la restauration des fonds par des apports coquilliers, la recolonisation d'habitats coralliens ou la transplantation d'herbiers marins.

Ces expérimentations permettent notamment de perfectionner les protocoles de restauration. Elles sont néanmoins à réaliser avec précaution car elles peuvent avoir des conséquences négatives pour l'écosystème que l'on essaie de sauvegarder : modification de l'habitat (remplacement du substrat meuble par un substrat dur), propagation d'espèces invasives, etc.

➤ *Exemple de restauration des coraux : cas des coraux de surface*

Les espèces concernées par ces techniques sont des espèces de coraux souvent ubiquistes, primo-colonisatrices relativement résilientes et à croissance régulière.

Les techniques de restauration peuvent être utilisées :

- 1- Ex post, après un dommage non permis (pollution, destruction accidentelle, vandalisme...), en compensation primaire (cf. Dunford et al, 2006, Bas et Gaubert, 2010).
- 2- Ex ante, dans le cadre de compensations complémentaires, liées à des impacts permis (étude d'impact, Natura 2000, etc.).

D'un point de vue opérationnel, deux techniques semblent s'imposer dans le monde : le bouturage de corail et la pose de récifs artificiels « supports » (Abelson, 2006). Nous traiterons premièrement du bouturage puis des récifs artificiels de restauration, dans les cas pour des écosystèmes peu profonds, de coraux de surface (de 0 à 40 m).

L'implantation ou le bouturage de corail, dans les petits fonds, recoupe plusieurs types de systèmes

Il existe trois méthodes :

- **ré-attachement par collage** à la colle époxy ou à l'aide de « spit » d'escalade permettant de visser les grosses formations (Gilliam, 2005), après une tempête ou un dommage (échouage de navire),
- **transplantation à partir d'un site naturel « donneur »**. Cette technique présente des problèmes écologiques liés à l'idée de détruire une partie d'une zone naturelle

pour en repeupler une autre, et peut être risquée car les coraux stressés peuvent mourir prématurément (Murphy et King, 2010),

- **transplantation (bouturage) à partir de nurseries de culture de coraux *in vitro* (en bassin) ou *in vivo*** (en mer comme sur l'exemple présenté ci-après). Le principe consiste à utiliser un grand nombre de fragments de coraux cultivés dans ces « pépinières sous-marine », puis ce corail d'élevage est transplanté sur les zones de récifs endommagés.

L'évaluation des gains et des pertes en services écologiques, et le calcul des surfaces à restaurer pour compenser les destructions sont possibles grâce à des méthodes biophysiques d'équivalence (indicateurs intégrés).

Ces derniers peuvent être très différents selon les sites. Par exemple, la méthode utilisée en Floride pour le calcul du dimensionnement de mesures compensatoires (Pioch, 2010) utilise 3 catégories de groupes d'indicateurs fonctionnels :

- Site et écologie du paysage;
- Environnement aquatique;
- Structure des communautés benthiques.

Les coûts de restauration des écosystèmes coralliens peu profonds sont relativement élevés

- Dans le cas de la Floride et pour des impacts sur des fonds coralliens plats, de petits fonds (Levrel, Pioch et Spieler, 2012) Les coûts moyens de ces projets avec le suivi scientifique, sont de l'ordre de 1 millions de \$ / acres, répartis selon :
 - 6 à 700 k\$ de mise en œuvre (boutures en culture, transports, collage à l'époxy par plongeurs professionnels),
 - 2 à 300 k\$ pour le suivi scientifique (3 à 5 ans en moyenne, parfois 7 ans pour des formes « plates » de haute énergie),
 - 50 à 100k\$ pour les procédures d'autorisation (permis d'immersion délivré par le CORPS).
- Le **suivi écologique** est en moyenne de 3 à 5 ans. Son coût est compris entre 20 et 40% du montant moyen de la restauration écologique compensatoire.
- Il se compose de deux parties, l'une écologique, l'autre physique :
 - Le suivi **biologique** : représente un budget de 50 à 100k\$ par tranche.
 - Le suivi **physique** : se fait en plongée avec par plongée un coût de 3 à 4.5 k\$ (3 plongeurs, un bateau et un contrôleur qualité)

Les récifs artificiels

L'objectif actuel des récifs artificiels de restauration écologique est, soit de mimer les habitats détruits, soit de protéger indirectement les milieux du chalutage illégal (« barrière » physique). Au titre de mesure compensatoire (MC), ils sont aussi bien utilisés pour la restauration de dommages non permis (dommages liés à des pollutions ou l'échouage de navires) que permis (aménagement des fonds côtiers) en tant que supports servant au développement des coraux, comme pour d'autres espèces (poissons, crustacés, autres invertébrés et algues...) (Seaman, 2007).

Néanmoins, au niveau des espèces de coraux et de poissons (colonisation), les études des communautés benthiques montrent une similarité avec le récif corallien peu profond naturel impacté au maximum autour de 70 % des fonctions écologiques initiales détruites. Cela reste donc assez critiquable, dès lors que le but de la restauration est de compenser en équivalence

des pertes. Il convient de noter, que selon le type de récifs immergés, la composition en ichthyofaune soulève encore de nombreuses critiques (disparition des habitats pour juvéniles au profit de poissons adultes commerciaux (comm.pers. Dr Richard Spieler, NOVA university, Floride).

Actuellement, des récifs artificiels de deuxième génération sont développés (NOVA University). Ils sont destinés à mieux mimer les habitats pour juvéniles, les paysages sous-marins et les matériaux naturels favorisant la colonisation des fonds artificiels (éco-béton proche des roches calcaires poreuses). Leur but est d'améliorer la similarité avec le milieu naturel et les fonctions écologiques restaurées : nurserie, nourricerie pour juvéniles de poissons inféodés aux coraux peu profonds.

Les formes, les matériaux et les types de récifs sont très nombreux dans le monde : béton, acier, pierre, bois, plastique de taille et de formes très variées. Les principaux types de récifs utilisés en tant que mesure compensatoire servent à restaurer des habitats du type : fonds coralliens, fonds durs accueillant des invertébrés filtreurs fixés (huitres et leurs communautés associées ex. « Chesapeake bay oyster reef restoration project », NOAA) ou fonds durs pour poissons notamment cibles (« Sato-Umi » (Yanagi, 2008)).

Tableau 6-10 Principaux types de récifs utilisés en tant que mesure compensatoire.

Component of restoration	System			
	Kelp forests	Coral reefs	Oyster reefs	Reef fisheries
Goal/performance measure	4 plants/100 m ² ; monitoring in progress	Increased coral biomass/structure; monitoring	Oyster biomass = 25 g/m ² ; monitoring in progress	Increased fishery yield; monitoring in progress
Ecosystem context	Adjacent natural reefs as reference target and source of recruits	Site-specific	Oysters as critical component of ecosystem to enhance water quality; opportunity for recovery of other habitats (e.g., seagrass)	Considers adjacent natural reefs and open mud and sand
Ecological basis for design	Height, spacing of reefs; predators	Species suited to sites	Physical structure; anoxia events	Species diet, growth
One tool of many used	Kelp transplantation being evaluated	Not considered	Coupled to watershed management	Coupled to management of fishing effort
Advanced techniques	Experimental pilot study to ensure design most likely to attain targets	Compatible substrates for transplants; test hypotheses	Modeling to predict ecosystem benefits; water quality—seagrass linkages	Modeling forecasts of fishery response

Ainsi, dans le cadre d'une utilisation visant à restaurer des substrats, les récifs sont majoritairement utilisés pour compenser la perte de :

- coraux,
- bancs d'huitres,
- habitats rocheux (fonds durs pour poissons).

Il existe une grande diversité de récifs souvent uniques et utilisés afin de servir de mesures compensatoires très ciblées (Tableau 6-11).

Tableau 6-11 Exemples de récifs expérimentaux disposés au large de Hallandale, North Miami, Floride (Pioc, 2010).

Type de mesure	Dimensions L x l x H (m)	Objectifs principaux	Efficacité	Coûts	Synthèse des suivis / Intérêt
pyramides de cages en fer	3 x 3 x 3 à 6	Pêche de grands poissons	++	+++	Intéressant pour l'agrégation de pélagiques et grands démersaux, très peu d'intérêt pour les poissons necto-benthiques et la colonisation de faune et flore sessiles.
cubes creux (traversés d'un tube) surmontés d'un dôme creux	2 x 2,5 x 1,5	Colonisation et pêche	+++	+	Très efficace pour les espèces benthiques pré-adultes. Bonne colonisation. Grande diversité de poissons
cubes de types lego disposés en pyramides à base carrée	0,5 x 0,5 x 0,5	Abris pré-adultes et colonisation	+	+++	Peu de faune installée, colonisation pauvre (béton lisse). Efficace contre les tempêtes car le système assemblé en « lego » est solidaire.
pyramides de béton	2 x 2 x 2	colonisation	+	+	Faible intérêt (béton lisse et peu colonisé)
cubes évidés en étage, du type « boîtes aux lettres »	3 x 3 x 1,5	Colonisation, installation de langoustes	+	++	Pas de langoustes (2 modules observés). Forte Richesse Spécifique (RS) et A de poissons, dans et sur les récifs (béton granuleux) éponges, coraux, gorgones.
blocs de béton troués de tubes de diamètres différents	2 x 2 x 1	Colonisation, installation de langoustes	+	++	Pas de langoustes (25 modules observés). RS et A de poissons moyennes à faibles. Sur les récifs (béton granuleux) bonne colonisation (éponges, coraux)

De nombreux récifs sont développés chaque année, pour restaurer des fonds coralliens peu profonds (Reef-ball, Eco-récif,...). Les efforts portent sur les matériaux et sur le « design ». Nous signalerons deux outils récents :

- *Eco-Reef* : La fixation de coraux est très rapide et facilitée par les matériaux employés (céramiques microporeuses). Ils sont utilisés dans le cadre de restauration primaire et ont un impact paysager positif immédiat (bonne intégration). Les coûts de ces *Eco-reef* sont en général **très élevés** et leur mise en œuvre nécessite des matériaux coûteux (céramiques) ainsi qu'une mise en place précautionneuse : tige d'ancrage pouvant casser les branches, tempêtes, destruction par contact physique (bateau, plongeurs).
- *Reef-roc* : Ces récifs de deuxième génération ont pour objectif d'assurer une restauration complémentaire des fonds plats coralliens en les mimant (paysager et fonctions) et en offrant un matériau proche de la roche naturelle. Leur design, le matériau et l'installation sont guidés par trois objectifs : l'accueil de juvéniles, le développement et la fixation de la faune et de la flore sessiles. Le matériau a été étudié pour fournir :

- un milieu calcaire similaire aux fonds naturels,
- un substrat hydraté (calcaire non compacté et riche en eau),
- une surface rugueuse obtenue par ajout de débris d'origine marine (sable, coquilles, gorgones, coraux morts...),
- une matière poreuse (« soft ») permettant aux organismes sessiles de forer ou de s'implanter plus facilement.

Les plongées réalisées en mars 2010 sur les *reef-roc* témoignent de l'installation d'éponges en nombre important. Le suivi poursuivi entre 2010 et 2011 a permis de valider le recrutement de juvéniles, coraux et autres invertébrés (Robinson, com. pers. 2013).

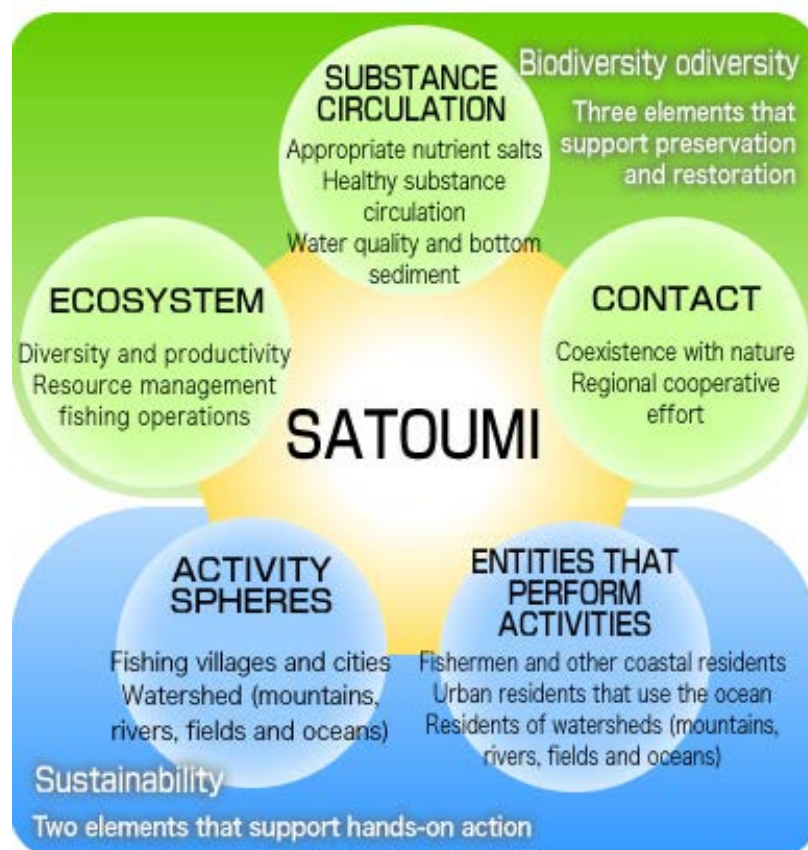


Figure 6-16 Sato-Umi (d'après Yanagi, 2007).

En conclusion, il est important de rappeler que les limites de la restauration des fonds coralliens sont liées à la très complexe substituabilité de ces écosystèmes, issus de phénomènes écologiques de sélection, compétition ou prédation s'échelonnant sur des périodes de centaines voire de milliers d'années. Il est donc illusoire de tenter de compenser en équivalence leur destruction. Mais, face à des phénomènes de destruction inévitable en amont (pollutions, dommages accidentels), un certain succès peut être attribué au bouturage / transplantation de coraux *in vivo* ou *in vitro*, ou le recollage de coraux « renversés ». Enfin l'utilisation de récifs artificiels, permet de faciliter la colonisation sur des substrats naturels abîmés, ensevelis ou facilite l'extension de substrats artificiels favorables à leur développement. La norme serait à la non destruction d'écosystèmes fragiles, irremplaçables, mais les faits nous poussent à envisager des outils de réparation les plus intégrés, mais encore bien modestes.

6.6.2. Développement de programmes d'expérimentation et d'acquisition des connaissances

Référence : CGDD et MEDDE, 2013. Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. Collection « Références » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). Octobre 2013. 232 p.

Compte-tenu des spécificités du milieu marin, il peut être pertinent que le maître d'ouvrage contribue à des programmes d'expérimentations et d'acquisition de connaissances scientifiques, permettant à terme la conception de mesures compensatoires plus adaptées. Ceci ne peut s'envisager que dans un cadre bien déterminé, permettant l'adéquation entre la mesure proposée et les exigences de la compensation, à savoir :

- La mesure compensatoire doit avoir un lien fort avec les habitats, écosystèmes impactés par le projet, problématiques pressions-impacts, être en lien direct avec la géographie d'implantation, la nature ou l'intensité des impacts du projet sur le milieu. Dans le cas où l'expérimentation comme mesure compensatoire n'est pas immédiatement envisageable, une étude visant à améliorer la connaissance sur les enjeux de conservation des habitats et espèces impactés, le lien entre la pression et l'impact de l'activité concernée, ou les méthodes de restauration liées aux impacts concernés, est mise en place.
- La mesure doit présenter un lien fort avec le projet et les impacts concernés, tout en étant cohérente avec les orientations existantes en matière de conservation ou d'acquisition de connaissances, présentes dans des documents cadres ou relevant de priorités nationales, communautaires ou internationales (ex : la stratégie d'acquisition de connaissances élaborée par le MEDDE dans le cadre de la DCSMM à l'horizon 2014, la stratégie nationale pour les aires marines protégées, les autres documents cadres pour l'outre-mer, etc.).
- La proposition du maître d'ouvrage est soumise à un avis d'experts par le service instructeur en amont de la délivrance de l'acte d'autorisation du projet (la probable diversité des mesures demande un examen au cas par cas, avec recours à une expertise adaptée et reconnue).
- La mise en œuvre de la mesure est réalisée par des opérateurs compétents.
- Dans le cadre d'une étude d'amélioration de la connaissance, les suivis mis en place doivent permettre à terme de pouvoir développer des mesures expérimentales. Cette étude pourra être réalisée pendant quelques années (2 à 3 ans) et revue après cette première étape, pour voir si les connaissances acquises peuvent d'ores et déjà permettre de lancer des mesures expérimentales.
- Dans le cas d'une mesure expérimentale, un dispositif de suivi et d'évaluation est prévu, permettant notamment de faire émerger des préconisations et de les capitaliser ; les protocoles développés sont compatibles avec les protocoles en vigueur dans les dispositifs de suivi existants.
- Un comité de pilotage et/ou de suivi de la mise en œuvre des mesures compensatoires

doit être mis en place (composition à définir en fonction de la mesure concernée et des compétences nécessaires). Il associe des services de l'Etat, des établissements publics, des experts compétents, etc.

- Les données acquises sont rendues accessibles, afin qu'elles puissent être versées dans une base de données publique par les opérateurs compétents, dans la mesure du possible en s'intégrant dans les schémas de bancarisation des données établis à travers les programmes de surveillance existants (DCSMM ou autre) et la stratégie nationale d'acquisition de connaissances, en lien avec les opérateurs scientifiques et techniques nationaux ou locaux.
- Un rapport est rédigé par le maître d'ouvrage pour contribuer à l'amélioration de la connaissance sur les bonnes pratiques et au développement de protocoles normalisés pour les mesures de restauration.

6.6.3. Evaluation des mesures de compensation

Quel que soit le type de compensation pris en compte (création, restauration, amélioration ou préservation), l'ensemble des mesures proposées devra être analysé afin d'identifier si elles correspondent effectivement à l'objectif de compensation : les écosystèmes créés sont-ils les mêmes que ceux impactés ? L'écosystème restauré offre-t-il les mêmes services que l'écosystème dégradé ? Des protocoles d'évaluation des mesures de compensation et des indicateurs spécifiques sont à mettre en place pour évaluer les mesures de compensation (Levrel et al, 2012b).

Actuellement, l'évaluation de l'efficacité des mesures de compensation des écosystèmes marins sont très peu nombreuses. Deux Etats américains ont développé des approches d'équivalence d'écosystèmes pour les environnements marins et côtiers, la Floride et la Californie (Levrel et al, 2012a). Les indicateurs Pressions-Etat-Réponses (PER) sont également développés par différentes équipes (« évaluation des *pressions* que les activités humaines génèrent sur l'*état* de la biodiversité et identification des *réponses* sociales qui permettront de compenser les effets négatifs des pressions ». Il est important de noter qu'un suivi de long terme est nécessaire pour identifier si les mesures de compensation répondent aux objectifs fixés. D'où le rôle essentiel de l'organisation en charge de la surveillance des mesures de compensation (Levrel, 2012).

Pour les écosystèmes marins, les mesures de compensation écologiques privilégiées sont la création et la restauration car elles sont les deux seules considérées comme permettant de respecter l'objectif d'absence de perte d'habitat ou d'espèce (« no net loss ») (Aronson and Alexander, 2013). Aux Etats-Unis, les deux autorités responsables du contrôle et du respect des mesures compensatoires impactant les écosystèmes aquatiques, l'*US Army Corps of Engineers* (USACE) et l'*US Environmental Protection Agency* (USEPA), retiennent la restauration comme méthode de compensation privilégiée (42 % des mesures compensatoires en 2008) (Wilkinson and Thompson, 2006; Madsen et al, 2010).

6.6.4. Application aux écosystèmes profonds

Dans les écosystèmes marins profonds, l'accroissement des projets d'exploitation minière conduit à se questionner sur les actions de protection, de préservation et de restauration des écosystèmes impactés (Van Dover and al., 2013). Les mesures actuellement envisagées se sont majoritairement tournées vers la création d'aires marines protégées (Van Dover et al, 2012), la fermeture de zones à la pêche profonde (Dinmore et al, 2003) ou la mise en place de conventions et de traités internationaux dont l'identification d'écosystèmes marins vulnérables (EMVs) (Rogers and Gianni, 2010).

La réglementation associée à la restauration est inexistante tout comme la discussion sur ces mesures (Van Dover and al., 2013). Certaines mesures ont cependant été proposées par Nautilus dans le cadre de son projet d'exploitation en Papouasie Nouvelle Guinée (Coffey Natural System, 2008) suite aux mesures recommandées dans le "CODE FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF MARINE MINING" développé par "the International Marine Minerals Society" (IMMS) (Verlaan, 2011). La recommandation principale est la mise en place de procédures dont l'objectif est le suivant: *"aid in the recruitment, re-establishment and migration of biota and to assist in the study of undisturbed, comparable habitats before, during, and after mining operation" [...] "long-term monitoring at suitable spatial and temporal scales and definition of the period necessary to ensure remediation plans are effective"*.

L'objectif de la restauration proposée dans le cadre du projet Nautilus est donc de faciliter la résilience naturelle en reconstruisant des édifices coniques d'un rayon de 0,5m et d'une hauteur de 2m, soit d'une surface de 4m². Ces édifices serviraient de support à la faune. Ils seraient placés près des sorties de fluides hydrothermaux pour imiter les amas des sites actifs et dans des zones sans flux, pour imiter les conditions des sites inactifs. Les animaux rencontrés dans les zones à l'avant des outils d'extraction seraient déplacés vers les édifices appropriés, dans les zones derrière ces mêmes outils.

Les conditions expérimentales suivantes sont posées :

- Deux états : actifs et inactifs
- Trois conditions : populations à transplanter de forte, moyenne et basse densités
- Trois réplicats par condition

Trois sites actifs et inactifs adjacents non restaurés serviraient de zones de référence. Ces zones-témoins permettraient de comparer la résilience assistée et la résilience non assistée. La mesure du succès de l'opération devrait également inclure la preuve de la survie et de la croissance des invertébrés transplantés.

Tableau 6-12 Coûts estimés de restauration du site hydrothermal Solwara 1 (Van Dover et al, 2013).

Solwara1 hydrothermal vent (72m2 or 0.007ha)	Direct costs
Project manager (technical staff; 1 month per year, 5 yr @ \$12K per month)	\$60,000
Lab technician (12 months per year @ \$6.5Kpermonth_5 yr)	\$390,000
3-D Substrata (\$2K per edifice, 18 edifices)	\$36,000
Miscellaneous supplies (\$4K per year)	\$20,000
Time-lapse cameras (9_ \$50K each)	\$450,000
Substratum deployment cruise (ROV; 15 d @ \$65K per day)	\$975,000
Transplant and camera deployment cruise (ROV; 27 d @ \$65K per day)	\$1,755,000
Camera maintenance and survey cruises (AUV, ROV; 7@ \$80K per day x 3 visits)	\$1,680,000
Total direct costs	\$5,366,000

Les coûts calculés sont hypothétiques. Ne sont pris en compte dans ce calcul que les coûts directs. Ils sont prévus pour un effort de restauration tenu pendant 5 ans.

Les coûts sont en dollars américains (valeur en 2013). Les salaires sont basés sur les salaires actuels en vigueur dans les universités américaines. Les coûts pour les bateaux de recherche sont basés sur les prix (arrondis) de location journalière de 2012 du R/V Knorr (\$43K), du ROV Jason (\$22K), et de l'AUV Sentry (\$15K) (prix communiqués à Cindy Van Dover par l'opérateur, le Woods Hole Oceanographic Institution et E. Benway). En revanche, les coûts de mobilisation et de démobilisation des bateaux et des véhicules sous-marins ne sont pas inclus dans le calcul car ces coûts dépendent du forfait de location et de la disponibilité des bateaux et des véhicules. Les coûts indirects pourraient être égaux ou supérieurs à la moitié des coûts directs, selon les politiques institutionnelles.

Notons qu'un certain nombre de paramètres n'est pas pris en compte dans cette estimation (composition des édifices hydrothermaux, transplantation et survie des microorganismes). La sauvegarde de l'écosystème dans sa totalité sera probablement plus délicate et donc plus coûteuse que l'estimation proposée.

De manière plus générale, pour que les mesures de restauration répondent aux objectifs, certaines connaissances, souvent non disponibles pour les écosystèmes marins profonds, sont nécessaires : connaissance des espèces (espèces endémiques ou non), de s groupes fonctionnels, des modes de reproduction, de la capacité de résilience des écosystèmes, de la biogéographie et de la connectivité. Le respect des codes de conduite existants est également nécessaire : par exemple, les mesures proposées dans le cadre du projet Nautilus impliquent le rétablissement d'édifices et la transplantation d'espèces (Van Dover et al, 2013), ce qui est interdit par le code de conduite InterRidge.

Enfin, le coût associé à la mise en place de telles mesures sera un paramètre clé puisqu'il est estimé comme étant deux à trois fois plus important que pour la restauration d'écosystèmes côtiers (Van Dover et al, 2013).

6.7. Conclusion / Synthèse

L'objectif de ce chapitre était de synthétiser les mesures de préservation de l'environnement existantes et les différentes mesures de gestion des impacts environnementaux liés aux activités d'exploitation des ressources marines, en particulier dans le domaine profond, afin d'en tirer des enseignements pratiques dans le cadre d'une exploitation potentielle des ressources minérales marines profondes.

Deux points principaux peuvent être soulignés dans cette conclusion : le premier concerne les contraintes et difficultés liées spécifiquement au domaine profond, le second point tente de préciser les objectifs et le contenu d'une procédure d'évaluation de l'impact environnemental.

6.7.1. Contraintes et difficultés liées spécifiquement au domaine profond

L'application de dispositifs ou d'instruments de préservation aux écosystèmes profonds fait ressortir trois remarques générales.

- a) La première concerne la nécessaire acquisition de connaissances fondamentales sur le fonctionnement des écosystèmes profonds mais également sur les méthodologies d'évaluation des impacts. Les différents instruments présentés indiquent très souvent un objectif d'acquisition de connaissances prioritaire dans leurs objectifs généraux : l'AIFM en fait un point majeur dans le cadre des permis d'exploration, les AMP sont présentées comme des outils de préservation avec des objectifs de recherche scientifique, la DCSMM identifie des besoins en termes d'acquisition de connaissances. A ce jour, il existe peu de méthodologies d'évaluation des impacts en environnements profonds (projet Nautilus et exploitation pétrolière offshore par exemple). L'AIFM propose ainsi des recommandations aux Etats membres pour l'évaluation de ces impacts. L'accès à ces environnements profonds reste difficile et nécessite de mettre en œuvre d'importants moyens comme la flotte hauturière au cours de campagnes longues. Les méthodologies et stratégies actuellement mises en place lors de ces campagnes sont du domaine de la recherche fondamentale et donc difficilement applicables directement de manière opérationnelle dans le cadre d'études d'impact. Le besoin affiché concerne le développement, la validation et le test de protocoles standardisés d'évaluation des impacts pouvant aller jusqu'à la mise en place de projets pilotes. Cette étape de recherche méthodologique sera ainsi cruciale pour pouvoir ensuite proposer des protocoles efficaces et compatibles avec les contraintes industrielles tout en respectant le cadre réglementaire.
- b) Les différents exemples cités dans ce rapport soulignent également la nécessité d'une gouvernance et d'une gestion intégrée et internationale, partant du constat que l'impact d'une exploitation ne se limite pas aux frontières strictes du permis d'exploitation, et que les impacts cumulatifs sont également à évaluer et gérer. Ce mode de gestion intégrée est déjà mis en place pour la pêche profonde dans le cadre notamment du CIEM (qui intègre un groupe sur les environnements profonds). L'AIFM propose également la mise en place de 9 zones témoins de préservation à l'échelle de la zone Clarion Clipperton. Les outils de gestion peuvent cibler des écosystèmes particuliers (Ecosystèmes Marins Vulnérables, Zone d'Importance Ecologique ou Biologique) et / ou des zones plus larges intégrant ces écosystèmes particuliers (DCSMM, réseau Natura 2000, AMP, ...) nécessitant ainsi un mode de gestion spatialisé.

- c) Enfin, la troisième remarque découle des deux précédentes. Pour pallier le manque de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes profonds et sur les impacts potentiels de l'exploitation, la gestion de ces impacts doit se faire de manière adaptative, et être réévaluée régulièrement en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques.

6.7.2. Structure de la procédure d'évaluation d'impacts

L'objectif d'une procédure d'évaluation d'impacts est d'établir un état initial et d'évaluer l'impact environnemental des activités humaines (analyse des caractéristiques et de l'état écologique, analyse des pressions et impacts, analyse économique et sociale du projet et du coût de la dégradation, analyse des mesures de compensation / restauration) dans le cadre d'un projet d'exploration ou d'exploitation.

Le cadre réglementaire associé aux projets d'exploration ou d'exploitation des ressources minérales marines profondes dépendra de la localisation de la zone cible. Les projets devront se conformer soit aux réglementations nationales lorsque le chantier est situé dans une ZEE, soit aux recommandations publiées par l'AIFM lorsque la zone d'intérêt est située dans la Zone.

Actuellement, le seul projet d'exploitation est mené par la société Nautilus Minerals Niugini Limited dans la ZEE de Papouasie Nouvelle Guinée.

La procédure d'évaluation d'impact prendra en compte les différentes phases d'existence d'un chantier d'exploitation :

- Demande de Permis d'exploration (PER),
- Demande de Permis d'exploitation,
- Ouverture des travaux,
- Fin des travaux,
- Démantèlement,
- Suivi environnemental post exploitation.

6.7.2.1. Structure d'une procédure d'évaluation d'impact

Une procédure d'évaluation d'impact (EIS) rassemblera les éléments suivants :

- la description du projet ou cadrage préalable, de ses objectifs et de ses caractéristiques techniques ;
- une revue des réglementations en vigueur (conventions internationales, lois, décrets...) concernant potentiellement le projet ;
- une analyse de l'état initial (ou EBS : « Environmental Baseline Study ») prenant en compte différents compartiments de l'écosystème potentiellement impacté, basée sur une étude bibliographique enrichie de nouvelles données acquises suivant un plan d'échantillonnage clairement décrit :
 - le milieu physique : hydrodynamisme (courant, houle), bruit sous-marin ambiant, turbidité naturelle et fonds marins (sédimentologie, géomorphologie, etc.)
 - le milieu biologique : composition de la colonne d'eau, peuplements benthiques, poissons, cétagés, oiseaux marins (observations sur plusieurs cycles biologiques annuels, sur une aire d'étude pertinente pour l e

- compartiment considéré)
- le milieu humain : caractérisation des usages et de l'utilisation du milieu marin ;
- le paysage et le patrimoine : passage du paysage terrestre à marin.
- Une étude d'impact environnemental et sociétal (ou ESIA : « Environmental and Social Impact Assessment »). Cette étude, généralement réglementaire, est entreprise dès la phase d'exploration ou lors de la phase conceptuelle d'un projet. Elle permet d'identifier et de quantifier les impacts potentiels du projet sur l'environnement naturel et humain engendrés, les conflits d'usage, ... Des mesures et des solutions techniques sont alors définies afin d'éviter-réduire-compenser les effets du projet.
- le Plan de gestion environnemental (ou EMP : « Environmental Management Plan ») est établi lors du démarrage de chaque opération. Il fixe des objectifs d'amélioration et des programmes de mise en œuvre conformes aux obligations légales en adéquation avec la politique Hygiène – Sécurité - Sûreté - Sociétale et Environnement de la société opératrice du projet . Il établit également le plan de suivi temporel des écosystèmes et de contrôle des impacts en adéquation avec l'évaluation faite par l'étude d'impact, au regard des engagements préalablement fixés. Il pourra être recommandé un ensemble d'actions correctives permettant une amélioration en termes d'impact environnemental ou sociétal. A ce programme de contrôle devront être rattachés des indicateurs et des mesures associées de contrôle. Ce plan permet de s'assurer que les procédures, les réglementations et les objectifs du plan de management environnemental sont connus et bien respectés pendant la durée de vie des installations. Ce plan doit également prévoir procédures spécifiques liées aux accidents, ainsi que le démantèlement de l'unité de production.

6.7.2.2. *Procédure d'évaluation (expertise) et d'attribution des permis et de suivi*

Lorsque le projet est situé dans la zone internationale, l'acteur principal est l'AIFM qui délivre les permis d'exploration et d'exploitation et qui publie les recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploitation.

Dans une ZEE, plusieurs acteurs vont intervenir, à différents niveaux :

- Le contenu et la méthodologie de réalisation de la procédure d'évaluation d'impact environnemental (EBS, EIA et EMP) doivent être précisés dans un document, en adéquation avec les connaissances scientifiques du moment. Ce document doit préciser les procédures d'acquisition de données, l'étendue spatiale et temporelle de l'étude, les paramètres et compartiments de l'écosystème à étudier et les méthodologies d'évaluation de l'impact.
- La procédure d'évaluation d'impact sera mise en œuvre par la société opératrice du projet, très souvent par un bureau d'études spécialisé contracté pour l'occasion.
- Un avis peut être demandé sur la qualité de réalisation et sur le contenu de la procédure d'évaluation d'impact environnemental. Cet avis nécessite une expertise scientifique pour chaque compartiment étudié (halieutique, benthique, physique, ...) et pour chaque étape du projet. Pour les granulats marins, l'Ifremer est conseiller scientifique et technique des décideurs publics et rédacteur des protocoles. Ces protocoles sont conseillés et donc non obligatoires. Une procédure de consultation publique peut également être intégrée dans le processus, prenant en compte la

confidentialité de certaines données.

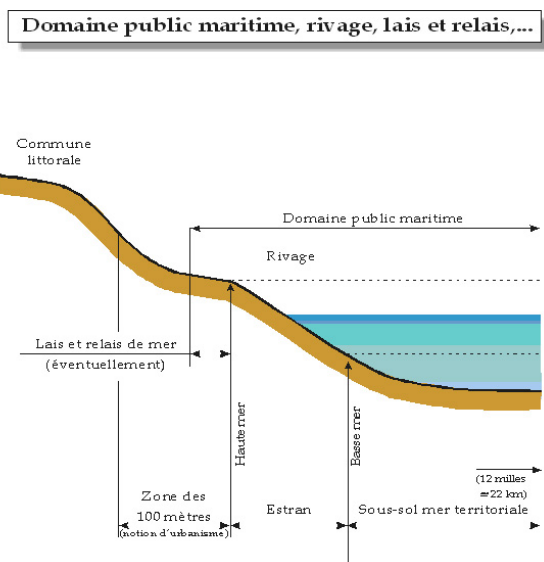
- Le ministère public sera ensuite décisionnaire sur l'attribution du permis et sur la mise en œuvre du plan de gestion environnemental.

Glossaire

Domaine Public Maritime

Le DPM naturel est constitué du sol et du sous-sol de la mer, compris entre la limite haute du rivage, c'est-à-dire celles des plus hautes mers en l'absence de perturbations météorologiques exceptionnelles, et la limite, côté large, de la mer territoriale (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Consistance-du-domaine-public.html>).

Le DPM s'étend des lignes de base jusqu'à la limite des 12 milles marins (= mer territoriale) (=22,2 km).



Granulats

Matériaux minéraux non métalliques utilisés dans le BTP.

Natura 2000

Le réseau Natura 2000 est un ensemble de sites naturels européens, terrestres et marins, identifiés pour la rareté ou la fragilité des espèces sauvages, animales ou végétales, et de leurs habitats. Natura 2000 concilie préservation de la nature et préoccupations socio-économiques. En France, le réseau Natura 2000 comprend 1753 sites.

Rendement maximal durable

Mode de gestion des pêches. Il s'agit de déterminer le seuil au-delà duquel le taux de prélèvement (d'exploitation) ne permet pas le renouvellement d'un stock, seuil de précaution, mais également le niveau et les modalités de prélèvement qui permettent une exploitation maximale, et ce, durablement. Les volumes admissibles de capture devront ainsi être déterminés et fixés en fonction de cet objectif (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/G1.pdf>).

Acronymes

AIFM	Autorité Internationale des Fonds Marins (équivalent à ISA et ISBA)
AMP	Aires Marines Protégées
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CPANE	Commission des Pêcheries de l'Atlantique Nord-Est
DPM	Domaine Public Maritime
EBSA	Ecologically or Biologically Significant Marine Areas
EMR	Energie(s) Marine(s) Renouvelable(s)
EWEA	European Wind Energy Association
GW	Giga Watt
ISA	International Seabed Authority
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
MW	Méga Watt
OMI	Organisation maritime internationale
ORGP	Organisation régionale de gestion des pêches
OSPAR	Oslo-Paris (Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est)
PER	Permis Exclusif de Recherches
RMD	Rendement Maximal Durable
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UNEP	United Nations Environment Programme
UNGA	United Nations General Assembly
ZIEB / AIEB	Zone / Aire d'Intérêt Ecologique et Biologique (en anglais EBSA)
ZNIEFF	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

Bibliographie

"Deep Sea Mining Campaign - Stop Experimental Seabed Mining in the Pacific." from <http://www.deepseaminingoutofourdepth.org/>

"DRYAD." from <http://datadryad.org/>

"GenBank." from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>

"InterRidge statement of commitment to responsible research practices at deep-sea hydrothermal vents." from <http://www.interridge.org/IRStatement>

Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group (2004). The SER International Primer on Ecological Restoration.

www.ser.org & Tucson : Society for Ecological Restoration International. <http://www.ser.org/docs/default-document-library/french.pdf>

Abelson, A. (2006) "Artificial reefs vs coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: Benefits, concerns, and proposed guidelines." *Bulletin of Marine Science* 78(1): 151-159.

Agency, D. E. (2013). Danish Offshore Wind. Key environmental Issues - a Follow-up. T. D. N. A. The environmental group : The Danish Energy Agency, DONG Energy and Vattenfall: 104.

AIFM (2010 a). Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des nodules polymétalliques dans la Zone. ISBA/16/LTC/7.

AIFM. (1999). Rè glement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques dans la Zone. 2013.

AIFM. (2010 b). Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques dans la Zone. 2013.

Aronson, J. and A. Alexander (2013). "Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves." *Restoration Ecology* 21: 293-296.

Arrieta, J. M., S. Arnaud-Haond and C. M. Duarte (2010). "What lies underneath: Conserving the oceans' genetic resources." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(43): 18318-18324.

Auster, P. J., K. Gjerde, E. Heupel, L. Watling, A. Grehan and A. D. Rogers (2011). "Definition and detection of vulnerable marine ecosystems on the high seas: problems with the "move-on" rule." *Ices Journal of Marine Science* 68(2): 254-264.

Bachmayer, R., S. Humphris, D. J. Fornari, C. L. Van Dover, J. C. Howland, A. D. Bowen, R. L. Elder, T. Crook, D. E. Gleason, W. J. Sellers and S. Lerner (1998). "Oceanographic research using remotely operated underwater robotic vehicles: Exploration of hydrothermal vent sites on the mid-atlantic ridge at 37 ° North 32 ° West." *Marine Technology Society Journal* 32(3): 37-47.

Baker, E. and Y. Beaudoin (2013). Deep Sea Minerals: Sea Floor Massive Sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review. Vol. 1A, SPC.

Baker, M. C., E. Z. Ramirez-Llodra, P. A. Tyler, C. R. German, A. Boetius, E. E. Cordes, N. Dubilier, C. R. Fisher, L. A. Levin, A. Metaxas, A. A. Rowden, A. A. Santos, T. M. Shank, C. L. Van Dover, C. M. Young and A. Warén (2010). *Biogeography, Ecology, and Vulnerability of Chemosynthetic Ecosystems in the Deep Sea.*

- Barbier, E. B. (2007). "Valuing ecosystem services as productive inputs." *Economic Policy*(49): 178-229.
- Barillier, A., J. Dubreuil and C. Hily (2013). Parc Hydrolien EDF de Paimpol-Bréhat: premiers résultats relatifs aux opérations expérimentales de restauration des herbiers de zostères suite à la pose du câble de liaison. Colloque SHF, 9-10 octobre 2013, Brest, France.
- Bas, A., Gaubert, H., 2010. La directive responsabilité environnementale et
- Bax, N. J., R. Tilzey, J. Lyle, S. E. Wayte, R. Kloser and A. D. M. Smith (2005). Providing management advice for deep-sea fisheries: lessons learned from Australia's orange roughy fisheries. In: *Deep Sea 2003: Conference on the Governance and Management of Deep-sea Fisheries. Part 1: Conference papers, FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 3/1*, ed. R. Shotton, pp. 259–272. Rome, Italy: FAO.
- Benn, A. R., P. P. Weaver, D. S. M. Billet, S. van den Hove, A. P. Murdock, G. B. Doneghan and T. Le Bas (2010). "Human Activities on the Deep Seafloor in the North East Atlantic: An Assessment of Spatial Extent." *Plos One* 5(9).
- Bishop, K., N. Dudley, A. Phillips and S. Stolton (2004). Speaking a common language, the uses and performance of the IUCN system management categories for protected areas. IUCN Gland Switzerland: 195.
- Boehlert, W. and A. B. Gill (2010). "Environmental and Ecological effects of ocean renewable energy development. A current synthesis." *Oceanography* 23(2): 68-81.
- Botsford, L. W., A. Hastings and S. D. Gaines (2001). "Dependence of sustainability on the configuration of marine reserves and larval dispersal distance." *Ecology Letters* 4(144-150).
- Boughen, N., J. Parr, A. Littleboy, S. Johns, P. Ashworth and C. Yeats (2008). Future Mining of the Australian Seafloor - Do We Have the Social License?
- Boye, H., J. M. Nataf, E. Caquot, P. Clement, L. D. La Cochetiere, and P. Sergent (2013). "Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables." Paris: Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.
- Canada, P. e. O. (2009). Plan de gestion - Zone de Protection Marine du Champ Hydrothermal Endeavour - 2010-2015: 50.
- CDB, C. o. B. D.-. (1992). Convention on Biological Diversity.
- CDB-ABS (2010). Negotiations of the International Regime on ABS.
- CDB-EBSA, C. o. B. D.-. (2007). CBD-EBSAs: Ecologically and Biologically Significant Areas.
- CGDD et MEDDE, 2013. Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. Collection « Références » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). Octobre 2013. 232 p.
- Chung, J. S., G. Schriever, R. Sharma and T. Yamazaki (2001). Deep seabed mining environment: Preliminary engineering and environmental assessment.
- Clark, M. (2001). "Are deepwater fisheries sustainable? - the example of orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*) in New Zealand." *Fisheries Research* 51(2-3): 123-135.
- Clark, M. R. (2009). "Deep-sea seamount fisheries: a review of global status and future prospects." *Latin American Journal of Aquatic Research* 37(3): 501-512.

- Clark, M. R. and A. A. Rowden (2009). "Effect of deepwater trawling on the macro-invertebrate assemblages of seamounts on the Chatham Rise, New Zealand." *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 56(9): 1540-1554.
- Clark, M. R. and J. A. Koslow (2007). Impacts of fisheries on seamounts. In: *Seamounts: Ecology, Fisheries, and Conservation*, ed. T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.B Hart, M.R. Clark, N. Haggan & R.S. Santos, pp. 413–441. Blackwell Fisheries and Aquatic Resources Series 12. Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Clark, M. R. and M. R. Dunn (2012). "Spatial management of deep-sea seamount fisheries: balancing sustainable exploitation and habitat conservation." *Environmental Conservation* 39(3): 204-214.
- Clark, M. R., L. Watling, A. A. Rowden, J. M. Guinotte and C. R. Smith (2011). "A global seamount classification to aid the scientific design of marine protected area networks." *Ocean & Coastal Management* 54(1): 19-36.
- Clark, M. R., T. A. Schlacher, A. A. Rowden, K. I. Stocks and M. Conalvey (2012). "Science Priorities for Seamounts: Research Links to Conservation and Management." *Plos One* 7(1).
- Clewell, A. F. and J. Aronson (2013). *Ecological restoration: principles, values, and structure of an emerging profession*. (2nd ed) Island Press. Washington DC.
- CNUDM (1982). *Convention des Nations unies sur le droit de la mer*.
- Coffey Natural System (2008). *Environmental Impact Statement*. Nautilus Minerals Niugini Limited. Solwara 1 Project. Volume A, Main Report. September 2008, 226 p.
- Collins, P. C., P. Croot, J. Carlsson, A. Colaco, A. Grehan, K. Hyeong, R. Kennedy, C. Mohn, S. Smith, Hiroyuki Yamamoto and A. Rowden (2013). "A primer for the Environmental Impact Assessment of mining at seafloor massive sulfide deposits " *Marine Policy* 42: 198-209.
- Collins, P. C., R. Kennedy and C. L. V. Dover (2012). "A biological survey method applied to seafloor massive sulphides (SMS) with contagiously distributed hydrothermal-vent fauna." *Marine Ecology Progress Series* 452: 89-107.
- Collins, P. C., R. Kennedy, J. Copley, R. Boschen, N. Fleming, J. Forde and e. al. (2013). "VentBase: Developing a consensus among stakeholders in the deep-sea regarding environmental impact assessment for deep-sea mining—A workshop report." *Marine Policy* In Press.
- CPANE (2007). The “new” Convention - Declaration on the Interpretation and Implementation of the Convention on the Future Multilateral Cooperation in North-East Atlantic Fisheries.
- Cullis-Suzuki, S. and D. Pauly (2010). "Failing the high seas: A global evaluation of regional fisheries management organizations." *Marine Policy* 34(5): 1036-1042.
- Dailhier, P. and A. Pellet (1999). *Droit International Public*. P. è. é. L.G.D.J.: p. 1255-1257.
- Dando, P. and S. K. Juniper (2001). *Management of hydrothermal vent sites: report from the InterRidge workshop: management and conservation of hydrothermal vent ecosystems*.
- Davies, A. J., J. M. Roberts and J. Hall-Spencer (2007). "Preserving deep-sea natural heritage: Emerging issues in offshore conservation and management." *Biological Conservation* 138(3-4): 299-312.

- Gaines, S. D., S. E. Lester, K. Grorud-Colvert, C. Costello and R. Pollnac (2010). "Evolving science of marine reserves: New developments and emerging research frontiers." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(43): 18251-18255.
- Gena, K. (2013). "Deep Sea Mining of Submarine Hydrothermal Deposits and Its Possible Environmental Impact in Manus Basin, Papua New Guinea." *Procedia Earth and Planetary Science* 6: 226-233.
- Gilliam, D.S. 2010. Southeast Florida Coral Reef Evaluation and Monitoring Project 2009 Year 7 Final Report. Prepared for: Florida Fish and Wildlife Conservation Commission, Fish & Wildlife Research Institute, Florida Department of Environmental Protection. 36 pp.
- Glover, A. G. and C. R. Smith (2003). "The deep-sea floor ecosystem: current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025." *Environmental Conservation* 30(3): 219-241.
- Glowka, L. (2003). "Putting marine scientific research on a sustainable footing at hydrothermal vents." *Marine Policy* 27(4): 303-312.
- Godet, L., K. A. Zelnio and C. L. Van Dover (2011). "Scientists as Stakeholders in Conservation of Hydrothermal Vents." *Conservation Biology* 25(2): 214-222.
- Grigg, R., A. Malahoff, E. Chave and J. Landahl (1987). "Seamount benthic ecology and potential environmental impact from manganese crust mining in Hawaii." In: Keating BH, Fryer P, Batiza R, Boehlert GW, eds. *Seamounts, Islands, and Atolls*. Geophysical Monograph 4.(379-390).
- Gwyther, D. (2008). Environmental impact statement: Nautilus Minerals Niugini Limited, Solwara 1 Project. Vol A.
- Halfar, J. and R. M. Fujita (2007). "Danger of deep-sea mining." *Science* 317(5834): 43-43.
- Hall-Spencer, J. M., M. Tasker, M. Soffker, S. Christiansen, S. Rogers, M. Campbell and K. Hoydal (2009). "Design of Marine Protected Areas on high seas and territorial waters of Rockall Bank." *Marine Ecology Progress Series* 397: 305-308.
- Halpern, B. S., S. Walbridge, K. A. Selkoe, C. V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J. F. Bruno, K. S. Casey, C. Ebert, H. E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H. S. Lenihan, E. M. P. Madin, M. T. Perry, E. R. Selig, M. Spalding, R. Steneck and R. Watson (2008). "A global map of human impact on marine ecosystems." *Science* 319(5865): 948-952.
- Helson, J., S. Leslie, G. Clement, R. Wells and R. Wood (2010). "Private rights, public benefits: Industry-driven seabed protection." *Marine Policy* 34(3): 557-566.
- Hendriks, I. E. and C. M. Duarte (2008). "Allocation of effort and imbalances in biodiversity research." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 360(1): 15-20.
- Hendry, A. P., L. G. Lohmann, E. Conti, J. Cracraft, K. A. Crandall, D. P. Faith, C. Haeuser, C. A. Joly, K. Kogure, A. Larigauderie, S. Magallon, C. Moritz, S. Tillier, R. Zardoya, A.-H. Prieur-Richard, B. A. Walther, T. Yahara and M. J. Donoghue (2009). "Evolutionary biology in biodiversity science, conservation, and policy: A call to action." *Evolution* 64(5): 1517-1528.
- Hermione, H. E. R. a. M. s. i. o. E. S.-. (2009). Deliverable D6.9: Report on Azores case study - WP6: Socio-economics, governance and science-policy interfaces: 54.
- Herring, P. J., E. Gaten and P. M. J. Shelton (1999). "Are vent shrimps blinded by science?" *Nature* 398(6723): 116-116.

- Heslenfeld, P. and E. L. Enserink (2008). "OSPAR Ecological Quality Objectives: the utility of health indicators for the North Sea." *Ices Journal of Marine Science* 65(8): 1392-1397.
- Hoagland, P., S. Beaulieu, M. A. Tivey, R. G. Eggert, C. German, L. Glowka and J. Lin (2010). "Deep-sea mining of seafloor massive sulfides." *Marine Policy* 34(3): 728-732.
- ICES (2005). Report of the Working Group on Biology and Assessment of Deep-Sea Fisheries Resources (WGDEEP), 7 - 9 September 2005, ICES Headquarters. ICES CM 2006/ACFM:07. 202 pp.
- ICES (2011). Report of the working group on the biology and assessment of deep-sea fisheries resources (WGDEEP), 2-9 March 2011, Copenhagen, Denmark: ICES CM 2011/ACOM:17: 889 pp. [www document].
- ICES (2013). General context of ICES advice. Book 1 I. Advice: 1-20.
- IMMS (2011). Code for Environmental Management of Marine Mining. International Marine Minerals Society: 15.
- InterRidge. (2013). "InterRidge's Code of Conduct." from <http://www.interridge.org>
- IPCC, I. P. o. C. C.-. (2007). Climate Change 2007, the IPCC Fourth Assessment Report.
- ISA, I. S. A.-. (2001). Recommendations for guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for polymetallic nodules in the area. International Seabed Authority. ISBA/7/LTC/1: 11.
- ISA, I. S. A.-. (2005). Recommendations of the workshop on polymetallic sulphides and cobalt crusts: their environment and considerations for the establishment of environmental baselines and associated monitoring programme for exploration. International Seabed Authority. ISBA/11/LTC/2: 26.
- ISA, I. S. A.-. (2008). Rationale and recommendations for the establishment of preservation reference areas for nodule mining in the Clarion-Clipperton Zone.
- ISA, I. S. A.-. (2011). Conducting an Environmental Impact Assessment and Preparing an Environmental Impact Statement for Mineral Exploitation in The Area. ISA Technical Guidance Document: 16.
- ISA, T. S. N.-. (2011). Environmental Management Needs for Exploration and Exploitation of Deep Sea Minerals. Report of a workshop held by The International Seabed Authority in collaboration with the Government of Fiji and the SOPAC Division of the Secretariat of the Pacific Community (SPC) in Nadi, Fiji, from 29 November to 2 December 2011. 10: 52.
- Ishida, H., N. Maeda, T. Miwa, T. Yamazaki, Y. Shirayama, T. Toyohara, N. Okamoto, T. Kodama and Asme (2011). Characteristics of the environment around a massive sea-floor sulfide area in the Okinawa Trough.
- ISOPE (2001). Environment, exploration and survey, mining systems and technology and processing. The Proceedings of The Fourth (2001) ISOPE OCEAN MINING SYMPOSIUM
- IUCN, I. U. f. C. o. N.-. (2010). IUCN (2013). Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>
- IUCN, U. N. E. P. U. a. I. U. f. C. o. N.-. World Database on Marine Protected Areas (WDPA). <http://www.wdpa.org/>
- Johnson, M. (2005). "Oceans need protection from scientists too." *Nature* 433(7022): 105-105.

- Johnston, P. A. and D. Santillo (2004). "Conservation of seamount ecosystems: Application of a marine protected areas." *Archive of Fishery and Marine Research* 51(1-3): 305-319.
- Jones, J. B. (1992). "Environmental-impact of trawling on the seabed - A review." *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 26(1): 59-67.
- Joubin, M. L. (1922). *Les coraux de mer profonde nuisibles aux chalutiers*. Office Scientifique et Technique des Pêches Maritimes, . Notes et Memoires 18: 5-16.
- Jumars, P. A. (1981). "Limits in Predicting and Detecting Benthic Community Responses to Manganese Nodule Mining." *MAR. MIN.* 3(1): 213-229.
- Kinlan, B. P. and S. D. Gaines (2003). "Propagule dispersal in marine and terrestrial environments: A community perspective." *Ecology* 84 84(8): 2007-2020.
- Lack, M., K. Short and A. Willock (2003). *Managing risk and uncertainty in deep-sea fisheries: lessons from orange roughy*. WWF Traffic Oceania, Australia: 73p.
- Large, P. A., D. J. Agnew, J. A. A. Pérez, C. Barrio Froján, R. Cloute, D. Damalas, L. Dransfield, C. T. T. Edwards, S. Feist, I. Figueiredo, F. González, J. Gil-Herrera, A. Kenny, K. Jakobsdóttir, M. Longshaw, P. Lorance, P. Marchal, C. Mytilineou, B. Planque and C.-Y. Politou (2013). "Strengths and weaknesses of the management and monitoring of deep-water stocks, fisheries and ecosystems in various areas of the world – a roadmap towards sustainable deep-water fisheries in the Northeast Atlantic? ." *Reviews in Fisheries Science* 21(2): 157-180.
- Leary, D. (2004). "Bioprospecting and the genetic resources of hydrothermal vents on the high seas: what is the existing legal position, where are we heading and what are our options?" *Macquarie J Intern Comp Envir Law* 1: 137-178.
- Leary, D. K. (2007). *International law and the genetic resources of the deep sea*. Martinus Nijhoff Publishers, Leiden, Netherlands.
- Levin, L. A., G. F. Mendoza, T. Konotchick and R. Lee (2009). "Macrobenthos community structure and trophic relationships within active and inactive Pacific hydrothermal sediments." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 56(19-20): 1632-1648.
- Levrel, H. (2012). *La compensation de la biodiversité à partir du principe de compensation. Promesses et limites d'un nouvel avatar du développement durable. Rapport d'Habilitation à Diriger les Recherches*. Ifremer: 114.
- Levrel, H., J. Hay, A. Bas, P. Gastineau and S. Pioch (2012a). "Coût d'opportunité versus coût du maintien des potentialités écologiques: deux indicateurs économiques pour mesurer les coûts de l'érosion de la biodiversité." *Natures, Sciences, Sociétés* 20: 16-29.
- Levrel, H., S. Pioch and R. Spieler (2012b). "Compensatory mitigation in marine ecosystems : which indicators for assessing the « no net loss » goal of ecosystem services and ecological functions?" *Marine Policy* 36: 1202-1210.
- Lodge, M. (2012). "Some legal and policy considerations relating to the establishment of a representative network of Protected Areas in the Clarion Clipperton Zone." *Ocean Development & International Law*.
- Madsen, B., N. Carrol and K. Moore Brands (2010). *State of Biodiversity Markets Report: Offset and Compensation Programs Worldwide*.
- Marra, J. (2005). "When will we tame the oceans?" *Nature* 436(7048): 175-176.

- Martinez, S. I. and S. Biber-Klemm (2010). "Scientists - take action for access to biodiversity." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2(1-2): 27-33.
- MEDDE (2012). Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel. Version modifiée après examen par le comité de pilotage du 6 mars 2012: 8.
- MEDDE (2013). Comité national pour les énergies renouvelables en mer - Dossier de presse.
- MEDDE, C. e. (2013). Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels. Collection « Références » SEEIDD. Paris, CGDD: 232.
- MEDDE et MERPN (2013). Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables: 104 p.
- MEDDE (2010). Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens. Actualisation 2010: 191 p.
- MEDDE (2010). Guide pour l'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000. Analyse des incidences potentielles des activités d'extraction en mer en fonction des habitats et espèces qui peuvent justifier les sites Natura 2000 en mer, des techniques et outils de prospection et d'extraction, de la nature des matériaux à extraire. 157 p.
- MEDDE (2010). Guide pour l'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000. Guide méthodologique. 91 p.
- MEDDE (2012). Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques: 361 p.
- MEDDE (2013). Discours de Delphine BATHO - Ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, en ouverture de la conférence internationale sur "La Haute mer, avenir de l'humanité. Quelle gouvernance pour une gestion durable de l'océan ?" organisée au Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE).
- Ministère de la Justice canadienne, M. (2011). Règlement sur la zone de protection marine du champ hydrothermal Endeavour.
- MNHN, RESOMAR and AAMP (2013). Définition du programme de surveillance et plan d'acquisition de connaissances de la DCSMM: Propositions scientifiques et techniques Thématique 1. Version au 21 mars 2013.
- Morato, T., T. J. Pitcher, M. R. Clark, G. Menezes, F. Tempera, F. Porteiro, E. Giacomello and R. S. Santos "Can We Protect Seamounts for Research? A CALL FOR CONSERVATION." *Oceanography* 23(1): 190-199.
- Morgan, C. L., N. A. Odunton and A. T. Jones (1999). "Synthesis of Environmental Impacts of Deep Seabed Mining." *Marine Georesources and Geotechnology* 17: 307-356.
- Mullineaux, L., D. Desbruyères and K. Juniper (1998). "Deep-sea hydrothermal vents sanctuaries: a position paper." *InterRidge News* 7(15-16).
- Murphy, E. and E.A. King, (2010). "Strategic environmental noise mapping: Methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications." *Environment International*. 36:290-298
- Myers, N. (2002). "The Precautionary Principle Puts Values First." *Bulletin of Science, Technology & Society* 22(3): 210-219.

- Nagender, B. N. and R. Sharma (2000). "Environment and deep-sea mining: A perspective." *Marine Georesources & Geotechnology* 18(3): 285-294.
- NautilusMinerals (2008). Environmental Impact Statement, Solwara 1 P roject. A, Main Report: 226.
- NautilusMinerals Deep Ocean Seafloor Mineral Extraction: Environmental and Social Considerations. 25p.
- Oebius, H. U. and G. Schriever (2001). Evaluation of physical environmental consequences of deep-sea mining.
- Oebius, H. U., H. J. Becker, S. Rolinski and J. A. Jankowski (2001). "Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 48(17-18): 3453-3467.
- Ogola, P. F. A. (2007). Environmental Impact Assessment General Procedures United Nations University.
- OSPAR (1992). OSPAR Convention. Convention for t he protection of t he marine environment of the north-east Atlantic.
- OSPAR (2009). Assessment of the impact of dumped conventional and chemical munitions (update 2009). OSPAR Commission.
- OSPAR (2010). "Background document for oceanic ridges with hydrothermal vents/ fields " Biodiversity Series 490: 1-17.
- OSPAR. (2010a). "Décision 2010/1 sur la création de la zone marine protégée du Complexe du mont sous-marin Milne."
- OSPAR. (2010b). "Décision 2010/2 sur la création de la zone marine protégée Charlie-Gibbs méridionale."
- OSPAR. (2010c). "Décision 2010/3 sur la création de la zone marine protégée du mont sous-marin Altair en haute mer."
- OSPAR. (2010d). "Décision 2010/4 sur la création de la zone marine protégée du mont sous-marin Antialtair en haute mer."
- OSPAR (2010e). Décision 2010/5 sur la création de la zone marine protégée du mont sous-marin Josephine en haute mer.
- OSPAR (2010f). Décision 2010/6 sur la création de la zone marine protégée de la dorsale médio-atlantique au Nord des Açores haute mer.
- OSPAR (2010g). Recommandation 2010/12 sur la gestion de la zone marine protégée du Complexe du mont sous-marin Milne.
- OSPAR. (2010h). "Recommandation 2010/13 sur la gestion de la zone marine protégée Charlie-Gibbs méridionale."
- OSPAR. (2010i). "Recommandation 2010/14 sur la gestion de la zone marine protégée du mont sous-marin Altair en haute mer."
- OSPAR. (2010j). "Recommandation 2010/15 sur la gestion de la zone marine protégée du mont sous-marin Antialtair en haute mer."
- OSPAR. (2010k). "Recommandation 2010/16 sur la gestion de la zone marine protégée du mont sous-marin Josephine en haute mer."

- OSPAR (2010l). Recommandation 2010/17 sur la gestion de la zone marine protégée de la dorsale médio-atlantique au Nord des Açores haute mer.
- OSPAR (2012a). Décision 2012/1 sur la création de l'aire marine protégée Charlie-Gibbs septentrionale haute mer.
- OSPAR. (2012b). "Recommandation 2012/1 sur la gestion de l'aire marine protégée Charlie-Gibbs septentrionale haute mer."
- Pendleton, L., L. Crowder, D. Dunn, C. Latanich and M. Orbach (2010). Marine Protection in the Gulf of Mexico - Current Policy, Future Options, and Ecosystem Outcomes. Policy brief. NI PB 10-04.
- Percival, R. (2005). "Who's afraid of the precautionary principle?" *Pace Environmental Law review* 23: 21-81.
- Pioch, S. (2010). Mesures compensatoires dans les écosystèmes marins en Floride. Exemple et expériences d'aménagements pour la production de services écosystémiques. Rapport Egis Eau, Ifremer, NSU, Agence des AMP, Université Montpellier3, CDC Biodiversité. Brest; 2010
- Quemmerais-Amice, F. (2013). Chapitre IV : Habitats benthiques profonds (étages bathyal et abyssal). . In MNHN, RESOMAR, AAMP, 2013. Définition du programme de surveillance et plan d'acquisition de connaissances de la DCSMM: Propositions scientifiques et techniques Thématique 1. Version au 21 mars 2013. Brest, AAMP.
- Raloff, J. (2006). "Venting concerns: exploring and protecting deep-sea communities." *Science News* 170(232-234).
- Ramirez-Llodra, E., P. A. Tyler, M. C. Baker, O. A. Bergstad, M. R. Clark, E. Escobar, L. A. Levin, L. Menot, A. A. Rowden, C. R. Smith and C. L. Van Dover (2011). "Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea." *PloS one* 6(8).
- Robinson, J. (2013). Communication personnelle à Sylvain Pioch.
- Rochette, J. and E. Druel (2011). Les zones marines protégées en haute mer dans le cadre de la Convention OSPAR : état des lieux et perspectives d'avenir. IDDRI, Idées pour le débat, 03/11: 15.
- Rochette, J. and R. Billé (2008). Gouvernance de la biodiversité marine au-delà des juridictions nationales: enjeux et perspectives. Idées pour le débat, n°04. Paris, Institut du développement durable et des relations internationales.
- Rogers, A. D. and M. Gianni (2010). The implementation of UNGA resolutions 61/105 and 64/72 in the management of deep-sea fisheries on the High Seas. International Programme on State of the Ocean, London, United Kingdom ([report prepared for the Deep-Sea Conservation Coalition]).
- Santos, R. S., A. Colaço and S. Christiansen (2003). Planning the management of deep-sea hydrothermal vent fields MPA in the Açores triple junction (Proceedings of the workshop). in, Arquipélago Life and Marine Sciences, Bulletin of the University of the Açores. Suppl. 4: xii + 700pp.
- Scott, S. D. (2001). "Deep ocean mining." *Geoscience Canada* 28(2): 87-96.
- Seaman, W. (2007). Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries. *Biodiversity in Enclosed Seas and Artificial Marine Habitats*, Springer: 143-155.

- Sharma, R. (2001). "Indian Deep-sea Environment Experiment (INDEX): An appraisal." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3295-3307.
- Sharma, R. (2011). "Deep-Sea Mining: Economic, Technical, Technological, and Environmental Considerations for Sustainable Development." *Marine Technology Society Journal* 45(5): 28-41.
- Sharma, R., B. N. Nath and S. J. Sankar (2005). "Monitoring the impact of simulated deep-sea mining in Central Indian Basin." *Marine Georesources & Geotechnology* 23(4): 339-356.
- Sharma, R., B. N. Nath, G. Parthiban and S. J. Sankar (2001). "Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining." *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 48(16): 3363-3380.
- Smith, C. R., S. D. Gaines, A. Friedlander, C. L. Morgan, A. Thurnherr, S. Mincks, L. Watling, A. D. Rogers, M. R. Clark, A. R. Baco, A. F. Bernardino, F. De Leo, P. Dutrieux, A. Rieser, J. Kittinger, J. Padilla-Gamino, R. P. Rescott and P. Srsen (2008). "Preservation Reference Areas for nodule mining in the Clarion-Clipperton zone: Rationale and recommendations to the International Authority. Workshop to Design Marine Protected Areas for Seamounts and the Abyssal Nodule Province in the Pacific High Seas, Honolulu, Hawaii.
- Smith, C. R., G. Paterson, J. Lamshead, A. Glover, A. Rogers, A. Gooday, H. Kitazato, M. Sibuet, J. Galeron and L. Menot (2008). "Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule province: predicting and managing the impacts of deep seabed mining." Smith, C., L. Levin, A. Koslow, T. A. and A. Glover (2008). "The near future of the deep-sea floor ecosystems." In: Polunin N, ed. *Aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press: pp 334-351.
- Smith, C., S. Gaines, L. Watling, A. Friedlander, C. Morgan, A. Thurnherr, S. Mincks, A. Rogers, M. Clark, A. Baco-Taylor, A. Bernardino, D. L. D., P. Dutrieux, A. Rieser, J. Kittinger, J. Padilla-Gamino, R. P. Rescott and P. Srsen (2007). "Areas of Particular Environmental Interest (or "Protected Areas") for Ecosystem Based Management of the Clarion-Clipperton Zone: Rationale and Recommendations to the International Seabed Authority. 20 Experts participants in the Workshop to Design Marine Protected Areas for Seamounts and the Abyssal Nodule Province in Pacific High Seas, Oct 23-26, 2007, University of Hawaii.
- Smith, E. P., D. R. Orvos and J. Cairns Jr. (1993). "Impact Assessment Using the Before-After-Control-Impact (BACI) Model: Concerns and Comments." *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 627-637.
- Smith, S. and Ieee (2011). *Deep Ocean Seafloor Mineral Extraction Environmental and Social Responsibility for a New Industry*.
- Sogin, M. L., H. G. Morrison, J. A. Huber, D. Mark Welch, S. M. Huse, P. R. Neal, J. M. Arrieta and G. J. Herndl (2006). "Microbial diversity in the deep sea and the underexplored "rare biosphere"." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(32): 12115-12120.
- Spieler, R. (2013). Communication personnelle à Sylvain Pioch
- Systems., C. N. (2013). "Environmental impact statement for the Nautilus Minerals Solwara 1 Project in Papua New Guinea; 2008. <http://www.cares.nautilusminerals.com/EIA2.aspx?npath=1,4,5,13>." Retrieved 02.02.13.
- Takagawa, S. and Asme (2010). *Concept Design of mining System of Seafloor hydrothermal deposit*.

- Taranto, G. H., K. O. Kvile, T. J. Pitcher and T. Morato (2012). "An Ecosystem Evaluation Framework for Global Seamount Conservation and Management." *PloS one* 7(8).
- Teagle, D. and B. Ildefonse (2011). "Journey to the mantle of the Earth " *Nature* 471: 437-439.
- Thiel, H. (2001). "Use and protection of the deep sea - an introduction." *Deep-Sea Research II* 48: 3427-3431.
- Thiel, H. (2003). "Anthropogenic impacts on the deep-sea." *Ecosystems of the Deep Oceans, Ecosystems of the World* 28: 569p.
- Thiel, H. (2007). "Deep-sea Environmental Disturbance and Recovery Potential." *Int J Hydrobiol* 77: 331-339.
- Thrush, S. F. and P. K. Dayton (2002). "Disturbance to marine benthic habitats by trawling and dredging: Implications for marine biodiversity." *Annual Review of Ecology and Systematics* 33: 449-473.
- Tivey, M. A., L. Levin, F. Barriga, R. Mills, G. Cherkashov, K. A. K. Raju, Y. Fouquet, X. Shi, M. D. Hannington, I. Thorseth, J. Kim, C. Van Dover and Ieee (2011). *InterRidge and International Scientific Research Activities into Seafloor Mineralization at Hydrothermal Vent Systems*.
- Tkatchenko, G. G., T. Radziejewska, V. Stoyanova, I. Modlitba and A. Parizek (1996). *Benthic Impact experiment in the IOM pioneer area: Testing for effects of deep seabed disturbance. Proceedings of International Seminar on deep seabed mining technology: 55-68.*
- Toyohara, T. and N. Okamoto (2011). *Concept of EIA and Conservation Strategy to Protect Biodiversity for Seafloor Massive Sulphides Mining. International Workshop on environmental Management Needs for Exploration and Exploitation of Deep Seabed Minerals.*
- Tunnicliffe, V. (1990). "OBSERVATIONS ON THE EFFECTS OF SAMPLING ON HYDROTHERMAL VENT HABITAT AND FAUNA OF AXIAL SEAMOUNT, JUAN-DE-FUCA RIDGE." *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets* 95(B8): 12961-12966.
- UN (1990). *Draft regulations on prospecting, exploration and exploitation of polymetallic nodules in the Area. Part VIII. Protection and preservation of the marine environment from activities in the Area. Working paper by Secretariat, UNODC.*
- UN (1992). *Report of the United Nations Conference on Environment and Development.*
- UN, U. N. E. P.-W. C. M. C.-. (2008). *National and regional networks of marine protected areas: A review of progress.*
- UN, U. N.-. (1982). *Convention on the Law of the Sea.*
- UNEP (2007). *Deep-sea Biodiversity and ecosystems: a coping report on their socio-economy, management and governance. UNEP-WCMC Biodiversity Series* 28: 88p.
- UNEP. (2008). "Décision adoptée par la Conférence des parties à la Convention sur la diversité biologique à sa neuvième réunion. IX/20. Diversité biologique marine et côtière. UNEP/CBD/COP/DEC/IX/20."
- UNEP. (2010). "Décision adoptée par la Conférence des parties à la Convention sur la diversité biologique à sa dixième réunion. X/29. Diversité biologique marine et côtière. UNEP/CBD/COP/DEC/X/29."

UNEP. (2012a). "Recommandation adoptée par l'Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques à sa seizième réunion. XVI/4. Diversité biologique marine et côtière : Aires marines d'importance écologique ou biologique. UNEP/CBD/SBSTTA/REC/XVI/4."

UNEP (2012b). Report of joint OSPAR/NEAFC/CBD scientific workshop on EBSAs. UNEP/CBD/SBSTTA/16/INF/5 - 21 April 2012.

UNEP. (2012c). "Report of the Western South Pacific Regional Workshop to Facilitate the Description of Ecologically or Biologically Significant Marine Areas. UNEP/CBD/SBSTTA/16/INF/6 - 23 April 2012."

UNEP. (2012d). "Report of the wider Caribbean and western mid-Atlantic regional workshop to facilitate the description of Ecologically or biologically significant marine areas. UNEP/CBD/SBSTTA/16/INF/7 - 23 April 2012."

UNEP. (2012e). "Synthesis report on the work carried out regarding description of EBSAs in the Mediterranean. UNEP/CBD/SBSTTA/16/INF/8 - 23 April 2012."

UNEP (2012f). Training manual for the description of Ecologically and biologically significant areas (EBSAs) in open-ocean waters and deep-sea habitats. UNEP/CBD/SBSTTA/16/INF/9 - 3 May 2012.

UNGA (2003). A/RES/58/14 - Resolution adopted by the General Assembly - 58/14. Sustainable fisheries.

UNGA (2004). A/RES/58/240 - Resolution adopted by the General Assembly - 58/240. Oceans and the law of the sea.

UNGA (2006). A/RES/61/105-Sustainable fisheries, including through the 1995 Agreement for the Implementation of the Provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982 relating to the Conservation and Management of Straddling Fish Stocks and Highly Migratory Fish Stocks, and related instruments

UNGA (2010). A/RES/64/72 - Resolution adopted by the General Assembly - 64/72. Sustainable fisheries.

van den Hove, S. and V. Moreau (2007). Ecosystems and biodiversity in deep waters and high seas: a scoping report on their socio-economy, management and governance. Switzerland. UNEP-WCMC. : 84 p.

Van Dover, C. L. (2011). "Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk?" *Ices Journal of Marine Science* 68(2): 341-348.

Van Dover, C. L. (2011). "Tighten regulations on deep-sea mining." *Nature* 470(7332): 31-33.

Van Dover, C. L. (2012). "Hydrothermal Vent Ecosystems and Conservation." *Oceanography* 25(1): 313-316.

Van Dover, C., J. Aronson, L. Pendleton, S. Smith, S. Arnaud-Haond, D. Moreno-Mateos, E. Barbier, D. Billett, K. Bowers and R. Danovaro (2013). "Ecological restoration in the deep sea: Desiderata." *Marine Policy* 44: 98-106.

VanDover, C. L. (2000). "Management and Conservation of Hydrothermal Vent Ecosystems." *InterRidge*.

VanDover, C. L. (2012). "Ocean policy - Hydrothermal Vent Ecosystems and Conservation." *Oceanography* 25(1): 313-316.

- VanDover, C., C. Smith and T. D. contributors (2010). Conservation of Deep-Sea Chemosynthetic Ecosystems: Justification of and Considerations for a Spatially Based Approach - A preliminary report. A workshop: 31 May - 4 June 2010, CRESCO, 38, Rue du Port Blanc, Dinard, France.
- VanDover, C., C. Smith, J. Adron, S. Arnaud and Y. Beaudoin (2011). Environmental management of deep-sea chemosynthetic ecosystems: justification of and considerations for a spatially-based approach. ISA Technical Study: no. 9, International Seabed Authority, Kingston, Jamaica: 90.
- Verlaan, P. (2011). The International Marine Mineral Society's code for environmental management of marine mining. Proceedings of the offshore technology conference.
- Vierros, M., G. Hamon, D. Leary, S. Arico and C. Monagle (2007). An Update on Marine Genetic Resources: Scientific Research, Commercial Uses and a Database on Marine Bioprospecting (United Nations, New York).
- Webb, T. J., E. V. Berghe and R. O'Dor (2010). "Biodiversity's Big Wet Secret: The Global Distribution of Marine Biological Records Reveals Chronic Under-Exploration of the Deep Pelagic Ocean." PLoS ONE 5(8).
- Wilhelmsson, D., T. Malm, R. Thompson, J. Tchou, G. Sarantakos, N. McCormick, S. Luitjens, M. Gullström, J. K. Patterson Edward, O. Amir and A. Dupi (2010). Greening Blue Energy : Identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of offshore renewable energy. Gland, Switzerland, IUCN: 102.
- Wilkinson, J. and J. Thompson (2006). 2005 Status Report on Compensatory Mitigation in the United States.
- Wood, L. J., L. Fish, J. Laughren and D. Pauly (2008). "Assessing progress towards global marine protection targets: shortfalls in information and action." *Oryx* 42(3): 340-351.
- Yamazaki, T. (1990). "Innovative research-and-development of nodule mining technologies - Harmonization with the environment." *Materials and Society* 14(3-4): 327-338.
- Yamazaki, T. and Asme (2009). Quantitative Environmental Assessment for Deep-Sea Mining - Status and approaches.
- Yamazaki, T. and Asme (2011). Approaches for Environmental Impact Assessment of Seafloor Massive Sulfide Mining.
- Yamazaki, T., M. Ikemoto, N. Nakatani, R. Arai and Asme (2010). A systematic approach for quantitative environmental assessment of seafloor massive sulfide mining.
- Yanagi, T. 2007 "Sato-umi", Terrapub Editor, Tokyo, Japan. 86p
- Zewers, K. (2007). "Bright future for marine genetic resources, bleak future for settlement of ownership rights: Reflections on the United Nations law of the sea consultative process on marine genetic resources." *Loy U Chi Intl L Rev* 5: 151-176.
- Zhou, H. (2007). The chemical environment of cobalt-rich ferromanganese crust deposits, the potential impact of exploration and mining on this environment and data required to establish environmental baselines in exploration areas. In: Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop, Chapter 11, September 2004: pp 257-267.

Chapitre 7

Perspectives de recherche et de développement

Pilote :

Sylvain Lamare

Contributeurs :

Cédric Boulart

Jacqueline Boutin

Coralie Coumert

Thierry Dutoit

Jérôme Dymont

Françoise Gaill

Stéphane Hourdez

François Lallier

Sylvain Lamare

Nadine Le Bris

Marcia Maïa

Olivier Rouxel

Sarah Samadi

Pierre-Marie Sarradin

Julie Tourolle

Table des matières du chapitre 7

Chapitre 7. Perspectives de recherche et de développement	893
7.1. Introduction.	893
7.2 Acquisition des connaissances fondamentales	895
7.2.1 Poursuivre l'exploration océanographique, géologique, biologique et écologique	895
7.2.2 Comprendre le fonctionnement des géosystèmes dans l'océan.	896
7.2.3 Comprendre les interactions entre géosystèmes et écosystèmes et leurs évolutions.	898
7.2.4 Améliorer nos connaissances sur les dynamiques et le fonctionnement des écosystèmes profonds	899
7.2.5 Modéliser et prédire le fonctionnement des géo-écosystèmes à petite et large échelle.	900
7.2.6 Evaluer les services écosystémiques et développer des mesures en faveur de la protection de l'environnement.	901
7.2.6.1. Mesures d'évaluation et de monétarisation des services écosystémiques	901
7.2.6.2. Mesures de compensation	901
7.2.6.3. Mesures de restauration	902
7.3 Développement d'outils pour l'acquisition des connaissances	903
7.3.1 Soutenir la flotte océanographique et assurer les avancées technologiques de ses outils	903
7.3.2 Développer de nouvelles infrastructures en écologie expérimentale	904
7.3.3 Développer les outils d'étude <i>in situ</i> pour l'exploration et l'étude intégrée des panaches hydrothermaux et des impacts potentiels	905
7.3.4 Renforcer la gestion et l'accès aux données	906
7.4 Mise en place d'études d'impact	907
7.4.1 Développement de protocoles efficaces pour l'évaluation des impacts, zones pilotes	907
7.4.2 Accompagner l'évolution des contraintes réglementaires.	909
7.4.3 Surveillance / monitoring	910
7.5 Conclusion	911

Chapitre 7. Perspectives de recherche et de développement

L'objet de ce chapitre est d'identifier les recherches qu'il est nécessaire de lancer, ou les recherches en cours qu'il est nécessaire d'infléchir, pour améliorer la connaissance scientifique des impacts possibles au vu des manques de connaissance (ou désaccords scientifiques le cas échéant) identifiés dans les chapitres précédents. Il s'agit donc d'identifier les champs de recherche à investir, les verrous scientifiques à lever, les méthodes et moyens qu'il est nécessaire de mobiliser d'un point de vue scientifique pour y parvenir.

7.1. Introduction.

L'intérêt croissant pour les ressources minérales marines doit prendre en compte les enjeux de durabilité écologique et de maîtrise des impacts sur les écosystèmes profonds qui lui sont associés et qui sont encore mal connus. **Cette expertise scientifique collective a permis de mettre en évidence des questionnements scientifiques majeurs qui doivent être pris en considération, en préalable à toute exploitation.** Ces questions scientifiques peuvent être spécifiques à chaque écosystème (type de substrat, énergie disponible, endémisme...) ou plus générales (interactions entre écosystèmes, connectivité et biogéographie) et dépendent de l'état d'avancement des connaissances pour chaque type de ressources.

Il convient également de souligner que **si aucune exploitation industrielle n'a commencé, un nombre croissant de sites sont en cours d'exploration. Aussi, il apparaît impératif:**

- i) d'avancer dans la connaissance fondamentale des écosystèmes concernés;**
- ii) de proposer, en amont des explorations, des méthodologies validées scientifiquement permettant d'évaluer les impacts d'une exploitation, de proposer des plans de surveillance et des stratégies de restauration.**

Il est cependant essentiel de tenir compte de l'opposition entre le temps long de la recherche amont qui permet des développements conceptuels et méthodologiques et le temps court de la recherche finalisée destinée à apporter des outils pour soutenir l'exploitation ou la conservation.

Compétences françaises en matière de recherche sur les environnements profonds

La France est identifiée comme un acteur majeur de la recherche dans les domaines fondamentaux sur les écosystèmes profonds au plan international, et s'appuie pour cela sur les compétences historiques de ses établissements de recherche, en particulier le CNRS et l'Ifremer.

Les questions de "géosciences marines" et "écosystèmes profonds" sont structurées à l'Ifremer, en association avec les développements technologiques pour former le département REM- Institut Carnot EDROME (<http://www.instituts-carnot.eu/fr/institut-carnot/ifremer-edrome>). Les compétences rassemblées dans ce département sont mobilisées transversalement sur des chantiers au travers de programmes de recherches européens en collaboration avec d'autres organismes dont le CNRS (notamment HERMES, HERMIONE du 7^{ème} PCRD, ESONET- EMSO, CoralFish, ...), de partenariats recherche-industrie (Consortium Futuna, projet PAMELA), ou des commandes institutionnelles (gestion des permis miniers dans la Zone avec l'AIFM, application de la DCSMM).

Au sein du CNRS, les forces et compétences sur l'océan profond s'inscrivent dans les grands champs thématiques des Instituts InEE et INSU, et se développent notamment autour d'axes de recherches prioritaires définis dans le cadre des partenariats avec le MNHN et les Universités "marines" (Brest, Marseille, Paris) au travers de ses différentes Unités Mixtes de

Recherche (UMR). Ces recherches couvrent un large éventail de disciplines et de questions en relation avec les problématiques de l'ESCo, tant en géosciences que dans les domaines de la biodiversité et de l'écologie (fonctionnement à petite échelle de l'accrétion océanique, phénomènes magmatiques, tectoniques et hydrothermaux, biogéographie, adaptations et évolution des espèces, ou encore fonctionnement et dynamique des écosystèmes).

L'océanographie physique et biologique, que ce soit à l'Ifremer ou au CNRS, est pour l'instant assez peu mobilisée sur des questions relatives à l'ESCo, même si l'évolution de ces domaines vers les méso-échelles et l'essor de la génomique environnementale devraient favoriser des approches intégrées sur des chantiers multidisciplinaires.

Plusieurs actions de recherches communes pluridisciplinaires sur les environnements profonds ont cependant été initiées dans la dernière décennie. Ainsi, le Groupement De Recherche (GDR) Ifremer-CNRS Ecchis (2005-2012) avait pour objectif l'étude des écosystèmes profonds dont le réseau trophique repose sur la chimiosynthèse bactérienne. Ce GDR a permis, par l'animation et le soutien de collaborations au sein de la communauté utilisant les moyens océanographiques nationaux (navires hauturiers, submersibles), l'étude de ces écosystèmes originaux et fragiles.

Les équipes scientifiques du CNRS et de l'Ifremer ont aussi participé au programme national Dorsales, composante française du programme international InterRidge, qui a permis de développer de véritables approches multidisciplinaires intégrées visant à mieux connaître le système des dorsales océaniques et les communautés biologiques vivant à proximité de celles-ci.

Enfin au niveau international, différents programmes et actions de prospective (de l'ESF comme ILEE et EURODEEP, du FP7 CAREX Investigating Life in Extreme Environment, ou DS3F Deep Seafloor and Subseafloor Frontier), réseau de formation Marie Curie (MOMARNET) et groupes de travail (SCOR, InterRidge) ont conduit la communauté française à s'investir dans le développement d'actions de coordination et l'animation de collaborations transnationales.

Ces compétences françaises sont représentées au sein de différentes instances nationales et internationales (GT8 'Mer' de l'alliance AllEnvi, CIES, ESF/Marine Board, AIFM, InterRidge). Certaines initiatives au niveau régional s'inscrivent sur ces thématiques de recherche sans toutefois en couvrir la totalité (LabEx Mer (<http://www.labexmer.eu/fr>) tandis que d'autres, au niveau européen ou international, sont dédiées aux impacts de l'exploitation des ressources minérales profondes mais n'associent que quelques équipes françaises (projet européen MIDAS, initiative internationale DOSI, Observatoire européen du plancher océanique et de la colonne d'eau EMSO).

La Flotte Océanographique Française, et particulièrement les navires hauturiers, engins submersibles et instrumentation océanographique associés, sont des atouts majeurs pour ces recherches. La capacité de développer et d'élargir ces équipements pour l'exploration, l'étude et l'observation est un point fort de la communauté française, reconnu au niveau international, comme en attestent les partenariats établis et l'utilisation de ces moyens par d'autres acteurs européens de la communauté scientifique (ex : OFWG pour *Ocean research Fleets Working Group*, OFEG pour *Ocean Facilities Exchange Group*, projet d'infrastructure de recherche EuroFleet).

A cela s'ajoute l'investissement pionnier des équipes françaises, tant à l'Ifremer qu'au CNRS, dans le développement de nouveaux équipements de recherche (aquarium sous pression, capteurs, caméra autonomes, observatoires fond de mer) et dans les techniques de biologie moléculaire de nouvelle génération, qui permettent la valorisation de ces

recherches au plus haut niveau sur le plan international. La formation à et par la recherche est également un point très important, les problématiques scientifiques de l'ESCO sur les impacts environnementaux de l'exploitation des Ressources Minérales Marines Profondes étant abordées au travers de différents programmes de Master et des champs thématiques d'écoles doctorales (parfois dans le cadre de partenariats au niveau Européen comme le Master "Marine Biodiversity and Conservation" et le programme Erasmus Mundus « MARES : Marine ecosystem health and conservation »).

7.2 Besoins d'acquisition de connaissances fondamentales

Une des premières conclusions apportée par cette ESCO est que la recherche fondamentale doit se diriger vers une approche systémique, prenant donc en compte tous les compartiments de l'écosystème, à différentes échelles spatiales et temporelles, en développant des outils et des méthodes innovantes d'approche intégrée d'observation et d'écologie expérimentale.

Six axes principaux de renforcement de nos connaissances quant à ces géo-écosystèmes nous paraissent primordiaux.

7.2.1 Poursuivre l'exploration biologique et écologique.

Les champs hydrothermaux ont une durée de vie relativement courte qui dépend de la dynamique des processus géologiques et géophysiques. Ces champs renferment plusieurs édifices et zones d'activité caractérisés par des émissions de fluides associées à des anomalies physico-chimiques. Ces émissions peuvent prendre la forme de fumeurs ou de zones d'émissions diffuses à plus faibles températures. Ce sont ces zones qui sont colonisées par une faune luxuriante. Ces zones actives sont généralement bordées de zones inactives, c'est-à-dire sans émission de fluide ni gradient thermique significatif, formées de dépôts hydrothermaux (anciennes cheminées, « stockwork » porté à l'affleurement par la tectonique, sédiments hydrothermaux déposés autour des événements actifs...), visuellement dépourvues d'organismes typiquement associés aux écosystèmes hydrothermaux. **Cependant, ces zones inactives pourraient jouer un rôle important dans les écosystèmes marins profonds, par exemple en abritant les formes vulnérables (larves et juvéniles) du cycle de vie des espèces hydrothermales.** D'autre part, ces dépôts pourraient, de par leur composition minéralogique et chimique, être le siège d'une activité microbienne intense.

Ainsi, dans tous les environnements naturels, que ce soit les cheminées hydrothermales (actives ou non) ou les sédiments marins profonds, les micro-organismes interagissent avec les minéraux et composés dissous à l'échelle micrométrique. Ces interactions sont déterminantes pour la physiologie de la cellule mais également pour l'intégrité du minéral et globalement, de tout l'écosystème (synthèse de matière organique primaire par chimiosynthèse, détoxification, recyclage).

Mais, alors que les données sur les sources actives continuent de s'accumuler, il n'existe pratiquement aucune information sur la faune qui colonise les sites inactifs, cibles directes d'une exploitation éventuelle. Les biocénoses propres aux sites inactifs restent donc à caractériser, en focalisant sans doute sur les compartiments de petite taille, méiofaune et microflore.

Les observations ont aussi pu montrer que les substrats durs environnant les sites actifs sont souvent colonisés par des espèces fixées, certes moins abondantes, mais se nourrissant dans la colonne d'eau, en particulier des coraux et des éponges. Ces espèces profiteraient indirectement du matériel en suspension exporté par les sources hydrothermales actives.

Parmi elles, certaines espèces ingénieuses, formatrices d'habitats biogéniques, que l'on retrouve également associées aux monts sous-marins, aux monts carbonatés ou aux canyons, sont connues pour être particulièrement vulnérables aux activités anthropiques.

De plus, afin d'évaluer le rôle possible des micro-organismes et l'impact d'une exploitation minière sur ce compartiment, des inventaires de la diversité microbienne sont à réaliser pour établir des états de référence des zones concernées, tant d'un point de vue de la diversité phylogénétique que fonctionnelle.

L'inventaire de la biodiversité associée aux écosystèmes hydrothermaux est en constante évolution avec la découverte presque systématique de nouvelles espèces à chaque campagne océanographique. Depuis leur découverte en 1977, plus de 650 nouvelles espèces ont été répertoriées et des sites connus depuis plusieurs années cachent encore de nouveaux taxons. Par exemple, la campagne MoMARETO (2006) a permis le recensement de 9 nouvelles espèces sur un édifice échantillonné depuis 15 ans. Il est courant que certains taxons ne soient représentés que par un ou quelques individus dans les échantillons et le rôle de ces espèces « rares » dans le fonctionnement ou l'évolution de ces écosystèmes est encore inconnu. Il n'est pas improbable qu'elles deviennent abondantes à un moment ou à un autre de la succession biologique. **En outre, il est important de souligner que le compartiment de la méiofaune est encore très mal connu et qu'il englobe non seulement les organismes de petite taille (< 3-500µm) mais aussi les juvéniles et les larves d'organismes de plus grande taille.**

Cette exploration de la biodiversité du milieu marin présente un intérêt pour la recherche de nouvelles molécules, en particulier mais non uniquement, pour de nouveaux composés d'intérêt thérapeutique. Actuellement, près de 18000 molécules sont décrites, dont un tiers environ provient des spongiaires.

Si les micro-organismes (bactéries et archées) ont été longtemps ignorés de cette démarche de criblage, les avancées considérables de la biologie moléculaire rendent désormais possibles l'étude et l'utilisation de nouveaux aspects de la vie marine. De nombreuses études ont montré que les techniques de biologie classique telles que les techniques culturales n'ont permis de révéler l'existence que de moins de 0,1% à 1% des espèces microbiennes présentes dans les écosystèmes marins. **Ce dernier ensemble, relativement négligé jusqu'à présent pour des raisons techniques, constitue la véritable frontière en matière de biodiversité et les avancées passent par une étape indispensable d'inventaire grâce aux outils de biologie moléculaire et de génomique.** Cette ressource inconnue et inexploitée pourrait bien être le principal gisement de nouvelles molécules des prochaines décennies.

7.2.2 Comprendre le fonctionnement des géosystèmes dans l'océan.

Malgré les avancées considérables réalisées durant les dernières décennies, les fonds marins restent parmi les rares lieux de notre planète où des découvertes de premier ordre sont encore possibles. A l'interface entre les enveloppes solides et liquides de la Terre, se développent des milieux variés, modulés notamment par la tectonique des plaques et les apports sédimentaires. La première offre, aux dorsales, la source de chaleur et la fracturation de la croûte océanique qui permettent l'hydrothermalisme. Les seconds contrôlent, par leur contenu en matière organique et leur empilement, la formation d'hydrates de gaz et de suintements froids sur et au pied des marges continentales. D'autres combinaisons de processus physiques et chimiques

pourraient se révéler propices à l'existence d'écosystèmes encore à découvrir, peut-être plus rares encore que ceux des sites hydrothermaux et des suintements froids.

La formation, à l'approche des zones de subduction, de fractures d'extrados dans les plaques en flexure et la pénétration d'eau dans ces fractures devraient favoriser la serpentinisation des roches mantelliques sous-jacentes, à des profondeurs variées suivant le type de dorsales (lentes ou rapides) où cette croûte a été créée, et générer ainsi des environnements particuliers, modulés par la profondeur du manteau et l'épaisseur de sédiment. De tels environnements, suspectés au large de l'Amérique centrale, seront, s'ils existent, favorables à l'accumulation de métaux, à des profondeurs supérieures à celles des sites hydrothermaux des dorsales.

De nombreuses questions géologiques subsistent sur les environnements sous-marins connus. Sur les dorsales, les processus magmatiques, tectoniques et hydrothermaux s'ajoutent à des degrés divers pour former les environnements observés. Quels sont les temps de récurrence des séismes majeurs, sur les différents types de segment de dorsale? De même, quelle est la fréquence des éruptions volcaniques sur ces différents types de segment de dorsale? Quels sont les effets de la vitesse d'expansion et de l'état thermique du segment sur cette fréquence? Comment se produit le refroidissement hydrothermal? Est-il possible de le quantifier et de le cartographier à l'aide de sondes de température?

On le voit, **pour répondre à la plupart de ces questions, des séries temporelles de paramètres physiques et chimiques traceurs de ces processus sont nécessaires et justifient une approche en sites d'observation répétée, voire l'établissement de véritables observatoires sous-marins.** On comprend aisément que les questions posées ici ont un impact immédiat sur la construction de gisements métallifères significatifs ou pas, d'une part, et sur l'évolution des écosystèmes associés à l'hydrothermalisme d'autre part.

Les régions géologiquement plus calmes que constituent les plaines abyssales, où se forment les nodules, font l'objet de moins de questions spécifiques aux sciences de la Terre, au-delà de la formation même de ces nodules.

Tout reste à faire, par contraste, sur les encroûtements cobaltifères des îles et plateaux sous-marins. Îles et plateaux sont, pour la plupart, constitués de laves de points chauds, mises en place en contexte intra-plaque, qui portent une géochimie d'éléments en trace complexe, issue des profondeurs du manteau terrestre. Ces laves sont souvent surmontées de constructions coralliennes. Quels sont les facteurs géochimiques et/ou sédimentaires favorisant la présence d'encroûtements ou gouvernant leur contenu métallique?

Ces questions, qui ne reflètent que très partiellement l'étendue des travaux à mener en géosciences sur le sujet, soulignent la nécessité d'impliquer les différentes disciplines des géosciences (géophysique, géochimie, sédimentologie, sismologie, volcanologie..) et de les intégrer avec les autres disciplines de l'océanographie, tant physique que biologique.

Des développements technologiques sont nécessaires pour mieux explorer les grands fonds, notamment le développement d'instruments pour mieux connaître les zones abyssales, en particulier sédimentaires (PENFELD, piézomètres, carottiers instrumentés, treuils et câbles grands fonds associés), mais aussi mieux connaître les caractéristiques des gisements potentiels (méthodes géophysiques: acoustique, magnétisme, électromagnétisme, gravimétrie... pour approcher leur taille, répartition, structure 3D...) et les propriétés des ressources qu'ils renferment (techniques de prélèvement et d'analyse: carottage grand fond, analyseurs *in situ*...).

7.2.3 Comprendre les interactions entre géosystèmes et écosystèmes et leurs évolutions.

La physique océanique est particulièrement mal connue au voisinage des fonds marins. Cela est dû à la difficulté d'observation et au faible nombre de mesures existantes. **De ce fait les échanges entre les eaux de fond et le reste de l'océan sont encore largement méconnus** et les connaissances actuelles ne permettent pas d'en réaliser une modélisation fiable. **L'évaluation des impacts passe en outre, non seulement par l'évaluation des perturbations proches du fond mais également par les effets combinés de ces perturbations avec des perturbations pouvant affecter toute la colonne d'eau.** Lors de la mise en place des engins d'exploration ou lors de rejets d'eau, par exemple : quels sont les mouvements d'eau associés? Ceux-ci peuvent-ils entraîner des changements de la circulation océanique, du mélange? Sur quelles échelles d'espace et de temps? Les connaissances actuelles de la physique océanique ne permettent pas, dans la plupart des cas, de répondre sans ambiguïté à ces questions.

Il est en outre important de souligner les couplages forts existant dans l'océan entre physique, biogéochimie et biologie des masses d'eau et leurs interfaces sur les fonds marins; la physique de l'océan joue par exemple un rôle très important sur la distribution spatiale des éléments nutritifs ; des perturbations de la circulation océanique sont susceptibles d'entraîner des modifications des distributions spatio-temporelles des propriétés biogéochimiques et avoir ainsi des conséquences sur les écosystèmes. De même, des perturbations de circulation sont aussi susceptibles d'avoir un impact majeur sur la biogéographie, la connectivité et la dispersion larvaire. **Des études d'impacts devront donc prendre en compte les couplages possibles entre physique, biogéochimie et biologie.**

La connaissance de la circulation océanique dans les 2000 premiers mètres de l'océan s'est beaucoup enrichie durant la dernière décennie grâce au programme international Argo qui fournit un réseau global de plus de 3000 flotteurs profilants autonomes mesurant en temps réel la température et la salinité des océans. Les chercheurs et industriels français sont fortement investis dans le programme Argo (Equipex NAOS, TGIR Euro-Argo) tant pour le développement de capteurs biogéochimiques que pour **le développement de profileurs profond (ARVOR-Deep) pouvant atteindre 3500m de fond, qui fourniront de nouvelles connaissances dans l'océan profond.** En outre, plusieurs équipes dans les laboratoires français d'océanographie ont acquis la maîtrise des **profileurs de turbulence VMP** permettant d'enrichir les campagnes bateau de mesures de turbulence jusqu'au fond des océans.

Ces mesures sont indispensables afin de faire progresser les modèles de circulation océanique, outils incontournables pour réaliser des études d'impact de la petite à la grande échelle spatiale et sur différentes échelles de temps.

En effet, la paramétrisation du mélange reste un enjeu crucial en océanographie et un problème complexe pour la modélisation de la circulation générale. Des paramétrisations très simplifiées du mélange associées à la marée interne ont été incluses dans les modèles de circulation générale ou régionale. **Néanmoins des mesures supplémentaires sont indispensables pour mieux contraindre les paramétrisations du mélange.** En effet si ces paramétrisations simplifiées permettent des améliorations au premier ordre des transformations de masse d'eau et de la circulation, elles ne permettent pas de reproduire la

diversité des régimes turbulents et sont contraintes par des hypothèses fortes sur l'efficacité de mélange qui permet de relier diffusion turbulente et taux de dissipation.

7.2.4 Améliorer nos connaissances sur les dynamiques et le fonctionnement des écosystèmes profonds

Grâce à l'effort d'inventaire réalisé, la synthèse réalisée dans le cadre de l'ESCo sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes permet de mettre en évidence les points sur lesquels le déficit de connaissances sur les écosystèmes profonds concernés est le plus critique. Compte-tenu de la spécificité du milieu profond en général et plus particulièrement des écosystèmes associés à ces ressources, **les relations diversité-fonctions** dans ces écosystèmes sont encore très largement inconnues. Les connaissances sont également très fragmentaires sur les conditions qui permettent **l'établissement des communautés et le maintien de la biodiversité**, tant sur le plan des ressources disponibles (chimiosynthèse autotrophe à partir de composés dissous ou minéralisés, dégradation de substrats organiques réfractaires), des contraintes naturelles des habitats (exposition aux composés toxiques, instabilité physique) et de leurs adaptations évolutives (symbioses, réponses métaboliques aux extrêmes de température, de pH et de toxicité).

Plus encore, cette connaissance est quasi-absente pour de nombreux habitats de substrats durs directement liés aux ressources minérales, mais qui n'ont pas bénéficié des études menées sur les champs de nodules ou les sources hydrothermales actives. Ces écosystèmes sont *a priori* moins dynamiques que les écosystèmes hydrothermaux, ce qui laisse penser que les communautés associées sont le reflet d'une colonisation à plus long terme. Ils seraient donc potentiellement moins résilients que les écosystèmes hydrothermaux où les espèces sont *a fortiori* adaptées aux perturbations naturelles de leur milieu.

Evaluer et prédire les risques face aux perturbations générées nécessite donc en premier lieu de combler ces manques sur plusieurs questions clés. Les principaux enjeux des recherches à développer sont de comprendre :

- les réponses des espèces-clés (et des écosystèmes en général) aux impacts, en termes d'acclimatation, d'adaptation et de plasticité génotypique et phénotypique, de cycle de vie, de génétique des populations ;
- la variabilité dans l'espace et dans le temps de la composition et la structure des communautés en réponse aux ressources disponibles et aux stress multiples imposés dans l'habitat, en relation avec leur connectivité ;
- la spécificité des relations biodiversité-fonctions, des régimes trophiques et les impacts de la productivité des écosystèmes concernés sur les flux de matière à échelle régionale ;
- la compréhension des réseaux d'interactions entre espèces ainsi qu'entre communautés et habitat permettant notamment d'appréhender les effets de synergie ou d'atténuation des impacts (par exemple par le transfert de composés toxiques ou la consommation d'oxygène).

Les connaissances à acquérir pour une approche intégrée prenant en compte les différents compartiments de l'écosystème concernent dès lors:

- La compréhension de l'implication des micro-organismes dans les processus associés aux minéraux (fonctions, activités métaboliques et minéralisation) et dans le fonctionnement de l'écosystème.
- La composition et l'organisation des réseaux trophiques de ces environnements particuliers.
- La génétique des populations et les patrons de connectivité d'espèces clés et leur capacité de dispersion à grande échelle, comprenant les mécanismes sous-jacents tels que la dispersion et le recrutement larvaire,
- Les processus de colonisation et les interactions qui gouvernent le maintien de la biodiversité à l'échelle locale ou régionale, incluant notamment la croissance des espèces fondatrices, les processus de mutualisme et de succession dans un habitat donné.
- La dynamique des écosystèmes profonds ciblés par l'exploitation des ressources (dépôts de sulfures inactifs, nodules, encroûtements de manganèse) en élargissant les études actuelles aux environnements hydrothermaux inactifs et aux encroûtements qui sont très peu connus.

7.2.5 Modéliser et prédire le fonctionnement des géo-écosystèmes à petite et large échelle.

Dans tous les champs disciplinaires, la compréhension du système « Océan » repose pour beaucoup sur une simulation intégrée des processus. Décrire, comprendre et analyser les fluctuations aux différentes échelles spatio-temporelles requiert modélisation, assimilation de données, quantification des incertitudes et analyse des observations et simulations

Les problématiques de conservation de la biodiversité sont orientées de plus en plus clairement vers les approches basées sur des principes écosystémiques (Ecosystem-based Management). Ceux-ci permettent en particulier de tenir compte des interactions que développent les populations des espèces cibles avec leur milieu et avec les autres espèces des habitats qu'elles partagent, avec l'idée sous-jacente de prévenir des effets indésirables des mesures de protection (ex : les états alternatifs stables), les destructions de niches écologiques ou encore l'augmentation de la dérive génétique.

Les nouvelles pratiques qui sont associées à ces problématiques s'appuient fortement sur la modélisation des systèmes écologiques, plus comme une approche d'analyse (équations diagnostiques) que de prédiction. La difficulté inhérente est double : d'une part la variabilité (environnementale et démographique) est forte, et d'autre part, la connaissance des processus à une échelle de complexité élevée est faible. Les développements actuels de la modélisation pour la conservation se dirigent vers des modèles stochastiques qui différencient les phénomènes locaux des phénomènes spatiaux, dans le cadre conceptuel des métasystèmes, remplaçant progressivement les modèles continus locaux ou spatiaux, basés initialement sur des équations aux dérivées partielles.

Le développement de modèles permettant de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes étudiés s'appuie aussi sur l'intégration des données acquises par les observatoires. De tels modèles seront utiles pour répondre aux questions posées dans le cadre de la gestion, la conservation et la protection de ces écosystèmes.

7.2.6 Evaluer les services écosystémiques et développer des mesures en faveur de l'environnement.

7.2.6.1. Mesures d'évaluation et de monétarisation des services écosystémiques

Les connaissances et les données de base (physiques, écologiques et économiques) manquent encore. Nous ne sommes pas actuellement capables de faire la liste complète des biens et services fournis par les milieux marins profonds et leurs écosystèmes, ni d'estimer précisément leur valeur. Nous pouvons seulement prétendre à évaluer qualitativement leur importance relative.

Nous avons également besoin de développer une approche systémique pour les différents services écosystémiques déjà identifiés ou qui le seront à l'avenir, comme cela a été proposé pour les pêches dans le Programme Mer. Notamment, **le développement de modèles écosystémiques intégrant les différents aspects écologiques, sociaux, économiques et environnementaux devrait permettre de quantifier les différentes interactions et constitue une première étape dans l'établissement de scénarii d'impacts et de gestion**, ainsi que dans l'identification d'alternatives possibles.

De plus, pour mieux évaluer les impacts et leur ampleur, il sera nécessaire d'étudier les interactions entre les impacts anthropiques de différentes natures et d'identifier les synergies et amplifications possibles, ou les éventuels effets de compensation. La modélisation et l'observation *in situ* sont les principaux outils permettant l'analyse de ces interactions.

Comme pour les services écosystémiques, l'évaluation économique des impacts nécessite le développement de nouvelles approches économiques permettant la combinaison des différentes méthodes de monétarisation existantes, afin d'avoir une vue d'ensemble plus complète.

7.2.6.2. Mesures de compensation

Comme évoqué dans le chapitre 6, en parallèle des mesures d'évitement et de réduction des impacts, des mesures de compensation doivent être envisagées. **La compensation doit correspondre à des actions de terrain avec une obligation de résultats, et non à un dédommagement financier.**

Il apparaît pertinent de mettre en place un programme national de recherche géologique et biologique des fonds marins, incluant une exploration ciblée de la ZEE française et des fonds internationaux, sur dix ans, intégrant les nouvelles technologies d'exploration (haute résolution, 3D, modélisation...), adossé à un programme de campagnes en mer avec le soutien au développement des outils de monitoring des flux, d'évaluation de la biodiversité et de la gestion de l'information produite (SIG, banques des informations sensibles...)

7.2.6.3. *Mesures de restauration*

Le déplacement d'animaux n'est possible que pour certaines espèces, de taille relativement importante (mégafaune) et, pour la faune hydrothermale, elle est contraire aux recommandations du Code de Conduite établi par InterRidge. L'efficacité de cette mesure est jugée très peu réaliste concernant la faune hydrothermale si l'on considère l'étroitesse des liens entre individus, assemblages d'espèces et structure de l'habitat à petite échelle. Il est peu probable que les organismes sessiles ou peu mobiles puissent retrouver des conditions d'habitat compatibles avec leur survie.

Les méthodes utilisées pour restaurer les récifs de coraux peu profonds sont difficilement transposables aux milieux profonds du fait de leur faible taux de croissance, mais des réimplantations semblent possibles au regard des premières expériences de bouturage, réalisées à des profondeurs modestes.

D'une manière générale, l'absence de modélisation et de techniques d'ingénierie écologique représente une des principales difficultés dans la mise en place de stratégies de restauration opérationnelle des écosystèmes. Les compétences existent mais il n'y a pas suffisamment de données issues de retours d'expériences pour nourrir ces modèles et de recherches en ingénierie écologique pour en appliquer les résultats.

Le manque de connaissances scientifiques sur les relations entre les espèces et les écosystèmes empêche également le développement de scénarii de restauration. Ne connaissant pas encore toutes les composantes de la biodiversité et des relations complexes existant entre espèces au sein des écosystèmes et de la biosphère, nous ne pouvons pas les recréer. Les méthodes d'intégration de ces modèles qui permettraient d'évaluer les compromis entre objectifs écologiques, économiques et sociaux font également défaut.

Il existe une forte instabilité temporelle au niveau des écosystèmes hydrothermaux. Cette instabilité est due à un ensemble de facteurs liés aux processus tectoniques et volcaniques ainsi qu'au mélange turbulent entre l'eau de mer froide et les fluides de haute température. Les seules observations de recolonisation, après une éruption ayant détruit toute la communauté, ont été effectuées sur la dorsale Pacifique. Ces données montrent que les espèces hydrothermales sont capables de recoloniser rapidement les sites. Cependant, cette dorsale est caractérisée par un taux rapide d'écartement des plaques ce qui implique de fortes perturbations du plancher océanique à de courtes échelles de temps. Qu'en est-il des variations sur une dorsale lente comme celle de l'Atlantique ? Les observations existantes montrent une relative stabilité des communautés à l'échelle de la décennie. Les espèces sont-elles capables de répondre à des changements brutaux de leur environnement ? Qu'en est-il de la résilience des communautés ?

Les observatoires fond de mer sont de nouveaux outils qui permettront de renseigner cette dynamique temporelle et d'acquérir de nouvelles données sur la réponse des organismes aux variations naturelles de leur environnement. Ils pourraient également devenir indispensables au suivi des écosystèmes impactés par l'exploitation des ressources minérales.

7.3 Développement d'outils pour l'acquisition des connaissances

7.3.1 Soutenir la flotte océanographique et assurer les avancées technologiques de ses outils

La recherche océanographique française jouit d'une flotte océanographique moderne et bien équipée, aux meilleurs standards internationaux. Pour rester fonctionnels, les navires doivent disposer des meilleurs systèmes de navigation et de positionnement, d'acquisition de données bathymétriques et géophysiques, de prélèvements de roches, de fluides, et d'échantillons biologiques. Les évolutions technologiques sont rapides, notamment dans les domaines de l'acoustique sous-marine, et des remises à niveau fréquentes sont à prévoir. Des laboratoires performants doivent aussi se trouver à bord, pour garantir la meilleure utilisation du matériel collecté, par des méthodes de plus en plus sophistiquées (analyse de traces et d'ultra traces, expérimentation *in vivo*, ...).

Parmi les évolutions à prévoir, on indiquera préférentiellement :

- la rénovation du Nautile,
- le développement des outils de cartographie (optiques, acoustiques, géophysiques, chimiques) à différentes échelles spatiales. ,
- l'acquisition et la mise en œuvre rapide d'AUVs profonds.

Si les techniques actuelles permettent d'explorer des domaines de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres, elles ne permettent pas d'étudier précisément les processus actifs ni de localiser les sites hydrothermaux inactifs. Des développements sont nécessaires pour localiser les systèmes fossiles les plus prometteurs en termes de ressources minérales. Afin de maintenir la position française de premier plan dans ce domaine, **il est indispensable de développer de nouveaux outils permettant de conduire des stratégies d'exploration plus efficaces et de localiser les minéralisations fossiles.**

Plusieurs pistes se dessinent : développement de la détection acoustique des sorties de fluides dans la colonne d'eau à partir du sondeur de bathymétrie et des techniques ADCP pour ce qui concerne les sites actifs, développement des techniques magnétométriques, gravimétriques, et électromagnétiques en ce qui concerne les sites inactifs.

Au niveau des avancées technologiques à prévoir, il convient de prendre en compte que la phase d'exploration se décompose en deux étapes: la première étape de recherche de sites est basée sur une cartographie multiparamètres de haute résolution, la seconde étape d'évaluation de la ressource repose sur cette même cartographie, affinée de manière à contraindre la dimension verticale, complétée par des prélèvements et analyses *in situ*.

Les développements nécessaires à la première étape reposent sur des submersibles équipés de charge utile permettant d'associer de l'imagerie acoustique avec l'imagerie optique haute définition. Ce couplage optique / acoustique permettra également d'avancer dans la cartographie des habitats, nécessaire aux études environnementales. Les développements nécessaires concernent aussi bien du développement technologique (capteurs optiques de nouvelle génération, UltraHD ou 4K et/ou haute sensibilité), mais également du développement méthodologique et logiciel (reconstruction 3D, méthodes de traitement d'images, bio-informatique et écologie numérique...).

Les charges utiles doivent également intégrer l'instrumentation nécessaire à la cartographie et à la caractérisation géochimique du panache. Cette caractérisation repose sur 2 méthodes

complémentaires : l'analyse *in situ* pour quelques paramètres clés, le prélèvement pour obtenir une description complète de la géochimie du panache. L'analyse *in situ*, le développement de capteurs et de dispositifs de prélèvement de fluides (et particules) constituent aussi des priorités qui souvent auraient besoin d'une phase de développement plus approfondie.

Les études environnementales à petites échelles sont très souvent effectuées à l'aide de submersibles (habités ou non). L'évolution des véhicules que sont le Nautille et Victor est primordiale afin de conserver leurs capacités, leur modularité, et de permettre l'intégration des nouveaux outils (par exemple : refonte du module de prélèvement de base de Victor, bras manipulateurs du Nautille, amélioration des interfaçages d'instruments, ...).

D'autres pistes de recherche peuvent être mentionnées: les observatoires sous-marins sur chenilles pour la couverture temporelle et les instruments prometteurs comme la spectrométrie RAMAN.

7.3.2 Développer de nouvelles infrastructures en écologie expérimentale

Comprendre et prédire la réponse des écosystèmes profonds aux perturbations ne peut se faire sans l'étude expérimentale des processus d'interactions entre communautés et propriétés du milieu. **Les infrastructures expérimentales pour l'écologie marine sont encore peu développées en France et sont encore inexistantes pour l'étude des écosystèmes profonds.** L'un des manques les plus flagrants dans ce domaine concerne les outils pour mettre en œuvre des expériences directement *in situ* sur la dynamique des assemblages d'organismes (par exemple de colonisateurs microbiens) en condition expérimentale naturelle ou simulée.

Les environnements profonds sont cependant difficiles d'accès pour l'expérimentation. L'hétérogénéité spatiale et temporelle qui caractérise ces milieux impose l'utilisation de submersibles habités ou de ROVs. Leur utilisation s'est fortement développée ces dernières années pour l'étude d'écosystèmes modèles sur les dorsales océaniques et les marges continentales.

L'étude expérimentale de la dynamique de processus biologiques-clés sur des échelles plus représentatives (mois, année) reste donc un enjeu majeur pour comprendre les relations entre biodiversité et variation de l'environnement dans ces milieux profonds.

Dans ce contexte, il est pertinent d'envisager des sites ateliers profonds, situés soit sur des observatoires fond de mer, soit à proximité d'infrastructures de recherche à terre comme c'est le cas en domaine côtier (ex : Zones Ateliers).

Afin de mieux comprendre les écosystèmes profonds, des avancées technologiques sont nécessaires. Les recherches futures dans ce domaine s'appuieront sur la mise en œuvre de dispositifs instrumentaux associant des capteurs et instruments de mesure chimique *in situ* à des systèmes d'imagerie, de manipulation ou des dispositifs de prélèvement biologique (ex. larves). **Ces réseaux de plateformes instrumentées mobiles déployées sur des sites ateliers donneront ainsi accès à la dynamique de processus de colonisation, de croissance et le cycle de vie des organismes ou de transfert d'énergie à différentes échelles, Il est essentiel d'élargir ces approches expérimentales à des écosystèmes modèles diversifiés et représentatifs de ceux qui seront impactés, au-delà de ceux des sources hydrothermales actives.** Le développement de technologies adaptées aux contraintes de ces environnements (forte pression hydrostatique, conditions corrosives et fortes variations de températures) est

également nécessaire et constitue un domaine de compétence de plusieurs équipes françaises en écologie marine.

Les prélèvements isobares, et le maintien et l'expérimentation sous pression en laboratoire restent indispensables pour l'étude des cycles de vie et des adaptations physiologiques d'espèces animales, l'isolement de souches microbiennes et l'étude de leurs métabolismes. La capture et la remontée d'organismes vivants en surface restent des défis technologiques. Pour comprendre comment les animaux des grandes profondeurs interagissent avec les conditions physico-chimiques de leur environnement, ces animaux doivent être replacés dans des conditions proches de celles qu'ils connaissent dans leur milieu naturel, en contrôlant en premier lieu la pression et la température. Le contrôle de la température ne requiert pas de technologie particulière, mais l'utilisation d'aquariums à haute pression est plus rare. Héritiers des travaux pionniers menés dans les années 1980 aux Etats-Unis, différents systèmes (IPOCAMP, DESEARES) ont été développés par des équipes du CNRS et de l'UPMC permettant l'expérimentation sur des animaux de différentes tailles, en contrôlant la température, la pression et les paramètres chimiques de l'eau (O_2 , CO_2 , H_2S , métaux). Le coût de ces équipements demeure élevé et beaucoup des études produites à ce jour ont été réalisées soit à pression atmosphérique sur des espèces moins profondes, soit sur des tissus prélevés et congelés rapidement après la récupération des organismes à bord. En parallèle, le développement de systèmes plus petits et modulables tend à élargir les capacités des laboratoires à expérimenter sous pression.

Si ces systèmes permettent de maintenir la pression nécessaire, ils ne permettent cependant pas le transfert des animaux sans passage à pression atmosphérique, qui induit un traumatisme de décompression lors de la récolte par grande profondeur. Différents systèmes ont été testés, généralement avec un succès limité. **Un système permettant la capture (cellule PERISCOP) et le transfert sous pression des animaux (aquarium BALIST) sans stress lié à la décompression a été récemment testé sur une campagne française par une équipe UPMC-CNRS. Grâce à ces avancées technologiques, les études physiologiques du métabolisme et des interactions d'espèces animales avec leur environnement exceptionnel sont en plein développement.**

7.3.3 Développer les outils d'étude *in situ* pour l'exploration et l'étude intégrée des panaches hydrothermaux et des impacts potentiels

Jusqu'à récemment, la connaissance de la composition chimique des panaches hydrothermaux était basée sur un échantillonnage discret et ponctuel, ce qui a permis de confirmer la présence de sources hydrothermales dans de nombreux contextes géotectoniques. Les données acquises, malgré leur faible résolution, ont permis de faire une première estimation des flux globaux de matière et de chaleur et de mettre en évidence un certain nombre de processus biogéochimiques au sein du panache en lien direct avec la composition chimique du fluide initial.

Une telle stratégie d'échantillonnage – valable dans les années 1990 – ne correspond plus au degré de connaissances acquises sur la dynamique spatio-temporelle de ces systèmes, contrôlée par des processus géologiques (magmatisme, tectonique), biologiques (oxydation), géochimiques (interactions eau-roche, précipitations...) et océaniques (courants, marées). De grandes incertitudes existent donc sur les flux de matière, d'autant plus grandes si l'on tient compte de la réactivité différente des nombreuses espèces chimiques qui composent le

panache hydrothermal. De plus, les flux hydrothermaux reposent sur notre connaissance actuelle de la distribution des sites d'émission de fluide, soit environ 20% des 60.000 km de dorsales médio-océaniques. Nos connaissances actuelles des panaches ne permettent donc pas de répondre de manière adéquate aux enjeux posés par l'exploitation des ressources minérales marines

Au cours de la dernière décennie, l'exploration hydrothermale a profité du développement de nouvelles plateformes d'exploration sous-marine telles que les AUVs qui permettent d'associer échantillonnages dans la colonne d'eau et mesures géophysiques à haute résolution (bathymétrie, magnétisme...). Les progrès récents dans le domaine des capteurs chimiques *in situ* pour l'océanographie permettent désormais d'associer des mesures chimiques à haute résolution de temps (minute) et d'espace (mètre) dans la colonne d'eau et ainsi de prendre en compte la variabilité spatio-temporelle des panaches hydrothermaux.

Avec la miniaturisation des instruments et les progrès technologiques, développés notamment pour les études en écologie, il est maintenant possible d'envisager des instruments *in situ* dits multi-éléments adaptés aux conditions représentatives des panaches dans la colonne d'eau. C'est le cas des spectromètres de masse *in situ* capables de mesurer les gaz dissous et les volatiles à de très faibles concentrations. **Il y a donc clairement de nombreuses méthodes à explorer pour obtenir la résolution de données nécessaire à la compréhension de la dynamique et processus biogéochimiques des panaches hydrothermaux.** Il s'agit d'une étape essentielle afin de mieux cerner l'impact global de l'hydrothermalisme océanique sur les grands cycles biogéochimiques et des impacts potentiels de l'exploitation des ressources minérales marines. L'effort doit aujourd'hui se focaliser sur le développement des capteurs chimiques *in situ* qui ont un retard de 10 ans et plus par rapport aux capteurs physiques couramment utilisés

7.3.4 Renforcer la gestion et l'accès aux données

Un effort particulier est nécessaire pour coordonner et diversifier la collecte des données relatives aux milieux profonds, et, à l'instar des travaux et initiatives réalisés pour les milieux terrestres dans le cadre du GBIF (système mondial d'information sur la biodiversité: <http://www.gbif.org/>), assurer le recensement et la mise à disposition de toutes données, au sein d'un système mondial d'information.

Outre la collecte et la mise à disposition de données, il s'agira également d'inclure les métadonnées sur les facteurs biotiques, abiotiques (incluant les données climatiques), économiques, sociologiques, etc. En effet, ces différentes sources d'information sont souvent stockées et codées suivant des normes contingentes à chaque communauté scientifique sans réel souci d'interfaçage avec les autres disciplines. Pour une utilisation optimale des différents jeux de données, un effort important semble maintenant nécessaire pour proposer une normalisation de leur codage et de leur mise en forme.

Certaines initiatives vont d'ores et déjà dans ce sens (ex. Ecological Data Wiki <http://www.ecologicaldata.org>, DataOne <http://www.dataone.org/>, EML: Ecological Metadata Language. <http://knb.coinformatics.org/software/eml/>) mais elles restent encore limitées et nécessitent un soutien fort des institutions.

Afin de favoriser cette synergie nécessaire sur la mise à disposition et l'utilisation des données pour favoriser une meilleure compréhension de ces écosystèmes particuliers, il

s’agira donc de vaincre les nombreuses limites techniques et un frein socio-culturel à la mise en commun et à l’utilisation des données, que ce soit dans les opérations de collecte et traitement de données ou dans les activités de synthèse.

Il est donc impératif :

- de coordonner leur collecte
- de les organiser, structurer
- de définir des standards pour favoriser les échanges entre bases de données (thésaurus et ontologies ; langage : Ecological Metadata Language, Darwin Core etc.)
- de connaître les usages qui en seront faits (recherche, expertise, modélisation, gestion d’espèces ou d’espaces, etc.)
- de les documenter correctement (métadonnées et qualité des données)
- de penser leur archivage et stockage à court, moyen et long terme
- de faciliter leur partage par la mise en place de portails internet
- tout cela dans le respect de la propriété intellectuelle et des règles européennes (application de la directive INSPIRE et des normes ISO 19115 et 19139 pour les métadonnées géographiques, par exemple)

7.4 Mise en place d’études d’impact

L’amélioration des connaissances permettra de mieux appréhender l’impact global des pressions anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes profonds et sur leur vulnérabilité. L’évaluation environnementale doit donc être intégrée dans un ensemble plus vaste prenant également en compte les aspects économiques et sociaux du développement durable. Elle doit aboutir à la **définition de modes de gestion et de gouvernance, qui sont eux-mêmes des objets de recherche en constante évolution.**

Le développement récent des approches moléculaires (omiques) et des techniques dédiées à l’observation et l’expérimentation en écologie (capteurs et imagerie *in situ* et *ex situ*, mésocosmes) permet d’envisager des stratégies d’étude intégrées, ciblées sur les habitats types. **Un autre défi concerne la mise en place d’une approche écosystémique et l’élaboration de modèles et outils qui permettront l’intégration des dimensions évolutives, fonctionnelles et environnementales de ces écosystèmes marins.**

La définition des stratégies de conservation ou de restauration et l’optimisation de leur efficacité s’appuie en effet sur ces connaissances mais aussi sur le développement de modèles simulant le couplage de ces composantes dynamiques. Cette intégration est nécessaire, d’une part, pour la prise en compte des rétroactions exercées par le vivant sur l’environnement en réponse aux perturbations et, d’autre part, pour mieux cerner les relations complexes entre écosystèmes profonds de différents types (benthique et pélagique, hydrothermal actif et inactif).

7.4.1 Développement de protocoles efficaces pour l’évaluation des impacts, zones pilotes

Compte-tenu du caractère pionnier des activités d’exploration industrielle et d’exploitation potentielle, tout est à apprendre des premières « expériences » menées sur le terrain, tant du côté scientifique qu’industriel. Ces expériences doivent servir à affiner les opérations futures. Dans ce cadre, **tout « cahier des charges » d’étude d’impact doit être clairement évolutif,**

et en aucun cas définitif. On peut cependant s'appuyer sur des expériences comparables du point de vue des procédés d'extraction, comme pour les granulats marins.

Ainsi, dans le cadre de l'exploitation des granulats marins, un site expérimental a été réalisé dans les années 70 en baie de Seine, appelée « souille expérimentale du CNEXO ». L'objectif était d'identifier et évaluer les impacts de l'exploitation de granulats marins mais surtout de pouvoir mettre en place des protocoles, de les tester et de les valider *in situ*. L'exploitation était donc réalisée de manière intensive, comme en situation réelle, par les industriels, avec un suivi réalisé par l'Ifremer. Puis un temps de repos était imposé pour permettre la réalisation du suivi environnemental et pour observer la recolonisation du milieu. Les paramètres suivis étaient notamment la sédimentologie et les peuplements benthiques, à l'aide de levés bathymétriques, de levés au sonar à balayage latéral et de relevés vidéo par caméra tractée.

Une telle expérimentation serait intéressante à mettre en œuvre dans le cadre de l'exploitation de ressources minérales profondes, mais de manière très encadrée et avant toute exploitation.

Sur un périmètre défini, « intéressant » pour l'exploitation de ressources, il s'agirait de réaliser un état initial de l'environnement (géologique, benthique, halieutique, hydrodynamique, interactions entre compartiments, courants, etc.), puis de réaliser une exploitation contrôlée, suivie par des scientifiques indépendants. Des études scientifiques seraient réalisées régulièrement en cours d'exploitation (avec un pas de temps à définir) afin d'étudier :

- L'évolution des fonds (dépôts de sédiments et particules métalliques en suspension...),
- L'évolution des peuplements,
- La recolonisation après le passage d'engins d'exploitation,
- La dispersion du panache.

Les études environnementales associées à l'exploration et à l'exploitation des ressources minérales, en partenariat avec les industriels ou de manière indépendante en s'inscrivant dans le cadre des programmes de recherche nationaux et internationaux sur ce domaine, doivent avoir pour objectifs de transférer l'expertise et la connaissance fondamentale des écosystèmes profonds des scientifiques vers l'élaboration et la validation de protocoles scientifiquement efficaces et industriellement réalisables.

Ces protocoles auront pour objectifs l'établissement d'état de référence (EBS- Environmental Baseline Study) et l'évaluation des impacts (EIA- Environmental Impact Assesment) comprenant une étape de surveillance (EMP- Environmental Monitoring Plan).

Ces études environnementales se déroulent à plusieurs niveaux, nécessitant des instrumentations spécifiques. L'établissement d'un protocole pour la réalisation d'une EBS repose sur une compréhension préalable du fonctionnement des différents compartiments des écosystèmes concernés (environnement, compartiments faunistiques, dynamique spatiale et temporelle, connectivité et lien avec la circulation océanique).

Cette EBS pourra être effectuée à plusieurs échelles. L'échelle régionale pourra utiliser l'instrumentation nécessaire à l'étape d'exploration (imagerie, instrumentation *in situ*, prélèvements, prélèvement de larves...). A une échelle plus locale de caractérisation de la faune et des habitats, l'instrumentation *in situ* et les systèmes de prélèvement devront être adaptés avec des objectifs de spéciation chimique à l'échelle des gradients de mélange. Un progrès doit également être fait en ce qui concerne le prélèvement quantitatif de faune et la

préservation de certains échantillons sur le fond (approche métagénomique *in situ* par exemple).

L'étape d'évaluation des impacts fait apparaître la nécessité de transférer les approches expérimentale *in situ* et en conditions simulées développée pour l'étude des systèmes naturels dans un cadre finalisé comme proposé dans le projet MIDAS (cf. 7.3.2).

Une première approche intégrée d'étude et de suivi des impacts liés à l'exploitation des ressources profondes a démarré en novembre 2013 au sein du projet collaboratif MIDAS. Regroupant 12 pays et 32 instituts / laboratoires de recherches, le projet MIDAS s'intéresse à l'exploitation des principales ressources profondes qui représentent un enjeu stratégique fort (sulfures polymétalliques, nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères, terres rares, hydrates de gaz). Il a pour objectifs :

- d'identifier l'échelle des impacts potentiels liés à l'exploitation de ces ressources
- d'évaluer les impacts potentiels et leur durée sur les écosystèmes profonds
- de développer des solutions pratiques et des codes de bonne conduite pour une exploitation raisonnée d'un point de vue environnemental et sociétal
- de développer des technologies abordables pour l'évaluation et le suivi de l'impact environnemental ainsi que la restauration des écosystèmes
- d'interagir avec les instances politiques européennes et internationales afin d'assurer l'intégration des conclusions du projet dans les règlements pris aux échelons nationaux, européens ou internationaux.

7.4.2 Accompagner l'évolution des contraintes réglementaires.

L'AIFM est chargée d'organiser et de contrôler les activités d'exploration et d'exploitation des ressources minérales dans la Zone. Suite à l'adoption en juillet 2000 du « code minier » relatif à l'exploration des nodules polymétalliques, l'importance accordée par l'AIFM aux questions d'environnement s'est accrue. Ainsi, une proposition de plan de gestion environnementale des zones à nodules, incluant la création de zones de préservation, est en cours d'élaboration. La tenue en juin 2010 d'un atelier de travail soutenu par l'AIFM sur la gestion environnementale des écosystèmes chimiosynthétiques ouvre également la voie au développement de plans de gestion de la biodiversité des zones de dépôt massif de sulfures polymétalliques.

Dans le cas des nodules, comme dans celui des sulfures polymétalliques, les connaissances scientifiques actuelles ne permettent ni d'évaluer l'impact potentiel des activités d'exploitation minière à court et long terme, ni de proposer des stratégies robustes de préservation de la biodiversité. Ces lacunes sont au cœur des débats sur un plan de gestion environnementale des zones à nodules car elles servent à justifier tout à la fois l'urgence de mettre en œuvre un plan de gestion, au nom du principe de protection, et l'urgence d'attendre des progrès scientifiques avant de statuer. En conséquence, l'AIFM accroît sa pression sur les contractants afin que ceux-ci respectent leurs engagements en termes d'études environnementales. Il est probable que l'Autorité soit encore plus vigilante sur ces questions d'environnement s'agissant des sulfures polymétalliques compte-tenu de leur lien fonctionnel avec des écosystèmes hydrothermaux et des valeurs esthétiques et médiatiques que ces oasis de vie revêtent.

Il est également nécessaire de réaliser un travail sur la jurisprudence internationale afin de collecter et étudier les différents cas jugés dans le monde en rapport avec l'exploitation des ressources minérales profondes.

7.4.3 Surveillance / monitoring

Enfin, toutes ces étapes, et plus encore l'étape de surveillance, nécessitent de développer l'étude de la dynamique temporelle, avec des besoins de développement ciblés sur les capteurs et les systèmes de prélèvement et d'observation, sans oublier le développement de méthodologies et d'outils de traitement et d'archivage de ces séries temporelles (imagerie et longues séries).

La **mutualisation des efforts d'observation est un enjeu important** pour la communauté scientifique. C'est dans cette optique que la communauté scientifique internationale se mobilise pour développer de nouvelles approches afin d'étudier les aspects temporels des facteurs abiotiques et biotiques dans les écosystèmes marins profonds. Ces **observatoires de fond de mer** favorisent la mise en place d'une réelle stratégie pluridisciplinaire en temps réel et sur de longues échelles de temps.

L'Ifremer et le CNRS sont impliqués dans deux projets d'observatoire fond de mer qui concernent les écosystèmes hydrothermaux profonds. L'observatoire EMSO-Açores bénéficie d'une technologie non-câblée et a été déployé en octobre 2010 sur le champ hydrothermal Lucky Strike (dorsale médio-atlantique, www.ifremer.fr/momarsat2010). Il rassemble des instruments dédiés à l'étude de la sismicité, de la géodésie, de la physique, de la géochimie et de l'écologie.

Au niveau international, le réseau câblé Neptune (www.neptune.ca) est en opération depuis 2009 dans l'océan Pacifique, au large des côtes américaines et canadiennes. Le dernier nœud situé sur le site hydrothermal Endeavour, connecté en septembre 2011, intègre un module d'observation biologique développé à l'Ifremer, identique à celui déployé aux Açores. Ces modules sont équipés de caméras vidéo HD et de projecteurs à LED, de dispositifs anti-salissures et de différents capteurs (température, oxygène dissous, fer dissous).

L'association de l'imagerie et de capteurs physico-chimiques permet de suivre la dynamique temporelle des assemblages de faune en fonction des variations de certains paramètres de l'environnement. Les données biologiques et environnementales acquises par les observatoires sont complétées et enrichies par un échantillonnage ponctuel effectué au cours des campagnes de déploiement et de maintenance ainsi que de campagnes d'opportunité.

Le traitement des données issues des observatoires nécessite l'élaboration de nouvelles méthodes d'analyse tant au niveau du traitement automatisé de l'image que des liens entre les données biologiques et environnementales (analyses multivariées, PCNM, écologie numérique). Les bases de données font partie intégrante du dispositif. Des réflexions sont en cours pour accroître la visibilité de ces bases, leur qualité et leur interopérabilité.

L'expérience de suivi de sites hydrothermaux sur la durée, de leur cartographie et d'études associant géosciences et biologie est basée sur des technologies innovantes. Le site EMSO aux Açores³² et le site Neptune/Endeavour à l'Ouest du Canada peuvent servir de référence sur les méthodologies d'évaluation d'impact et sur les technologies d'observatoire de fond de mer.

³² EMSO est une Infrastructure Européenne de recherche ESFRI et fait partie de la feuille de route française. EMSO Açores est une priorité côté Français. <http://www.emso-eu.org/>.

7.5 Conclusion

Alors que la perspective d'une exploitation prochaine des ressources minérales profondes se précise à l'échelle internationale, la présente expertise collective montre que nous ne connaissons que de façon très partielle ces géo-écosystèmes particuliers. Il est donc essentiel, dans le cadre d'une exploitation de ces ressources respectueuse de l'environnement marin, de poursuivre un effort de recherche conséquent afin de mieux appréhender les processus liés au fonctionnement et aux dynamiques des géo-écosystèmes marins profonds, en s'intéressant aux questions majeures suivantes:

- Quels sont les processus de formation et de transformation des éléments liés aux ressources minérales marines profondes ?
- Quels processus gouvernent la variabilité naturelle et le maintien de la biodiversité des écosystèmes associés aux ressources minérales marines profondes et soutiennent leur fonctionnement et leur stabilité ?
- Quelle peut être l'importance des impacts potentiels liés à l'exploitation des ressources minérales marines profondes et les réponses de la biodiversité et des écosystèmes dans un contexte de changement global ?

S'il est indéniable que l'apport de réponses à ces questions nécessitera de relever de nouveaux défis technologiques pour mener à bien les observations et l'échantillonnage requis à différentes échelles de temps et d'espace, il s'agira aussi de favoriser le développement de l'expérimentation *in situ* et en laboratoire afin de préciser les mécanismes sous-jacents au fonctionnement et à la dynamique des systèmes profonds.

D'autre part, une réflexion au moins nationale - sinon européenne - doit être menée concernant la collecte, l'archivage et la mise à disposition des données, qu'elles soient physiques, chimiques, biologiques, écologiques, économiques ou sociales, afin de faciliter le développement de modèles qui constitueront à terme des outils incontournables pour l'élaboration de scénarii de gestion.

Une réflexion sur les Très Grandes Infrastructures de Recherche doit aussi être menée, non seulement pour permettre le maintien d'une flotte océanographique nationale performante, ainsi que des outils qui lui sont associés, mais aussi pour envisager la constitution de zones pilotes permettant, au travers d'études et de suivis à long terme, le développement de protocoles efficaces et réalistes afin de mesurer les impacts potentiels d'une exploitation future.

Enfin, il est indispensable d'organiser l'étape de transfert de la connaissance scientifique fondamentale vers l'élaboration et la validation de protocoles scientifiquement efficaces et industriellement réalisables pour l'évaluation de l'état et le suivi des écosystèmes profonds.

Annexe 1 Cahier des charges de l'ESCO

1. Contexte et enjeux

La France dispose d'une capacité importante d'exploration et d'accès à de nouvelles ressources minérales à grande profondeur en mer, dont l'exploitation pourrait avoir des impacts sur la biodiversité, les écosystèmes et les milieux. L'engagement 12.a du Grenelle de la Mer prévoit de conduire une évaluation des impacts environnementaux des différentes phases d'exploitation dans l'objectif d'inscrire ces activités sous-marines dans un cadre respectueux des principes du développement durable.

En mai 2012, afin d'établir un point précis sur l'état actuel des connaissances scientifiques, la Commissaire générale au développement durable a manifesté par le biais d'un courrier adressé aux présidents du CNRS et de l'Ifremer, son souhait que ces organismes mènent conjointement une expertise scientifique collective sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Le Commissariat général au développement durable, le CNRS et l'Ifremer se sont accordés sur le cadrage suivant de cet exercice.

2. Objet et champ de l'expertise

Cette expertise scientifique collective porte sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Les granulats et les hydrocarbures fossiles sont exclus du champ de l'expertise : il s'agit de sujets techniques nécessitant des compétences différentes, dont, malgré leur intérêt, compte-tenu des délais et moyens nécessaires, l'étude ne pourra être envisagée qu'ultérieurement. L'expertise devrait donc être centrée sur les ressources riches en métaux (nodules polymétalliques, encroûtements riches en métaux, sulfures hydrothermaux) et la production d'hydrogène natif.

Cette expertise porte sur les grands fonds sous juridiction française ainsi que sur les zones situées au-delà des juridictions françaises.

Il s'agit d'abord de faire le point des connaissances scientifiques sur les écosystèmes et milieux concernés, leur fonctionnement, les services qu'ils nous assurent et les usages que la société peut en retirer dès à présent ou à l'avenir, ainsi que l'analyse économique de leurs valeurs. Puis il faut caractériser les impacts potentiels sur ces milieux, ces services et ces usages, et identifier les mesures nécessaires pour suivre l'évolution de ces environnements et contrôler les impacts des différentes phases d'exploitation.

Cela concerne notamment les zones à forts enjeux écologiques de type aire marine protégée (comme les sites Natura 2000 ou les parcs naturels marins) et les habitats et espèces protégées au titre d'une réglementation particulière.

Les questions auxquelles l'expertise scientifique doit pouvoir apporter des réponses sont détaillées ci-dessous.

L'expertise établira un état des lieux critique des connaissances scientifiques disponibles au plan européen et mondial, soulignera les domaines pour lesquels il est nécessaire de faire progresser les connaissances et envisagera les différents scénarios et options possibles afin d'améliorer les connaissances permettant de préserver ces milieux et écosystèmes.

Ce travail viendra en complément de la prospective réalisée par l'Ifremer sur les ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030. Il devrait permettre d'aider les demandeurs de permis de recherche ou d'exploitation dans leur réflexion lors de l'élaboration des études réglementaires relatives à l'incidence de leur activité sur l'environnement. De même, les différents services du ministère chargés d'examiner ces études pourront l'utiliser pour juger de la pertinence et de la complétude des documents produits. Par ailleurs, les méthodes d'évaluation des impacts développées dans cette expertise devraient permettre d'alimenter les

réflexions pour la mise en œuvre de la future stratégie granulats élaborée par le Ministère et de son volet marin.

3. Questions et thématiques scientifiques

Le fil conducteur structurant le questionnement est celui retenu pour l'évaluation environnementale dans les directives "projet" et "plans et programmes" : état des lieux, nature des projets impactant, évaluation des impacts, mesures pour les éviter, réduire ou compenser. Ce cadre, très robuste à l'usage, permettra de faciliter le transfert des résultats aux praticiens.

1°) Les ressources minérales marines profondes (chef de file Ifremer)

L'expertise synthétisera des éléments de contexte sur les différentes ressources minérales maritimes, y compris les hydrocarbures fossiles et les granulats.

Les analyses seront centrées sur les ressources métalliques et l'hydrogène natif :

- Quelles sont les ressources minérales concernées ?
- Quelles sont celles qui font l'objet d'exploration et/ou d'exploitation ?
- Où sont-elles situées (localisation géographique, profondeur...) ?

Même pour les ressources minérales qui ne sont pas l'

2°) Les techniques existantes et en développement (chef de file Ifremer)

L'expertise synthétisera des éléments de contexte sur les techniques (méthodes, matériels, ...) d'exploration et d'exploitation utilisées ou en développement par les entreprises françaises et internationales (notamment UE, USA, Japon, Australie, Russie, Chine); le retour d'expérience de ces techniques (ancienneté, résultats obtenus, difficultés rencontrées, quantité extraites...); et les entreprises impliquées (opérateurs et fournisseurs). L'expertise indiquera les principales différences avec l'exploitation des hydrocarbures fossiles et des granulats.

- Quelles analyses comparatives est-il possible de mener vis-à-vis des pressions exercées par ces différentes techniques sur le milieu marin et leurs impacts potentiels ?

3°) La biodiversité, les milieux et les écosystèmes (chef de file Inee)

- Quels sont les écosystèmes, d'une part, et les milieux, d'autre part, potentiellement concernés par les différentes techniques d'exploration et d'exploitation des ressources minérales profondes en mer ? L'approche des milieux doit être entendue au sens large, incluant les flux énergétiques dans les milieux et les émissions de gaz à effet de serre liés.
- Quelles connaissances avons-nous de l'état des écosystèmes et des milieux, de leur fonctionnement et des processus dans lesquels ils sont engagés ? Comment s'intègrent les différents compartiments, temporalités et échelles ?
- Quels sont les effets potentiels à court, moyen et long termes de l'exploitation sur les écosystèmes et les milieux, tant à proximité des gisements qu'à plus grande distance ?
- Quelles sont les capacités de restauration des communautés, d'adaptabilité des espèces, de résilience des écosystèmes et des milieux ?
- Quels sont les éventuels risques naturels amplifiés ou suscités par l'exploitation (mouvement de terrain et autres risques telluriques) ?

4°) Les services et les usages (chef de file Inee)

- Quels sont les services qu'assurent ces milieux et ces écosystèmes ? Quels sont les usages actuels ou potentiels qu'ils permettent ou à travers lesquels ils sont valorisés ?
- Quelle valeur économique peut-on attribuer à ces services dans une approche systémique ? Existe-t-il déjà des études ayant conduit à les monétariser ?

- Quels sont les effets potentiels des différentes techniques d'exploitation et d'exploration sur ces services et ces usages ? Peut-on établir des scénarios en y associant une analyse coûts-bénéfices ?

5°) Les mesures de préservation de l'environnement et de gestion des impacts (chef de file Ifremer)

- Quelles sont les différentes options pour préserver les écosystèmes et les milieux des différents compartiments, au cours de différentes phases d'exploitation et aux différentes échelles ?
- Quelles sont les différentes options pour prendre en compte les enjeux liés à des zones d'intérêt particulier comme les aires marines protégées, les habitats et espèces protégées au titre d'une réglementation particulière, ou des zones d'importance particulière vis-à-vis des ressources halieutiques ?
- Quelles sont les différentes options pour gérer et suivre les impacts, en précisant leur urgence et leur importance ?
- Quelles sont les mesures possibles pour compenser les impacts ?

6°) Les mesures d'approfondissement des connaissances

- Quelles sont les mesures d'explorations pertinentes pour mieux connaître l'état des milieux et des écosystèmes, leurs capacités de restauration et de résilience, leur valeur économique ? Quelles sont les mesures de suivi pertinentes pour évaluer les impacts des explorations et exploitations ?
- Quelles sont les modalités d'organisation possibles pour synthétiser, mutualiser et valoriser les connaissances acquises ?
- Quelles sont les compétences nationales et internationales mobilisables ? Quelles sont les recherches nouvelles ou les inflexions d'actions de recherche en cours à envisager ? Quels sont les approches méthodologiques, expérimentales, de simulations, ou technologiques les plus pertinentes ?

Pour les 5 premiers thèmes, l'un des organismes est désigné comme chef de file chargé de coordonner l'analyse des questions, qui sera réalisée en association étroite avec les 2 autres organismes.

Pour le 6e thème, les bénéficiaires se coordonneront pour l'analyse des questions.

Annexe 2 Liste des membres du COPIL

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie / Commissariat Général au Développement Durable / Direction de la recherche et de l'innovation / Service de la recherche

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et Ministère du Redressement Productif / Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature / Direction de l'eau et de la biodiversité

- Sous-direction du littoral et des milieux marins
- Sous-direction de la protection et de la gestion des ressources en eau et minérales

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie / Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture / Mission des Affaires Scientifiques

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche / Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation / Service Stratégie Recherche Innovation

CNRS / Institut Ecologie et Environnement et Institut National des Sciences de l'Univers

IFREMER / Direction générale

Membres de l'équipe-projet

Annexe 3 Liste des campagnes océanographiques françaises menées sur les milieux marins profonds

Campagnes Nodule

Liste des campagnes référencées dans la base de données Sismer. L'extraction a été faite selon les critères suivants :

- campagnes françaises
- campagnes non confidentielles
- campagnes de type « campagne océanographique » et « prestation commerciale » (les transits, les transits valorisés et les essais n'ont pas été prise en compte)
- tous types de navires en éliminant les côtiers français actuels.

CAMPAGNE	ANNEE	DUREE (J)	ZONE	NAVIRE	ORGANISME CHEF DE MISSION	ORGANISMES PARTICIPANTS
NIXO 06 A (TRANSPAC 01)	1972	18	Océan Atlantique Nord	Le Noroit	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
NIXO 06 B (TRANSPAC 01)	1972	3	Mer des Antilles	Le Noroit	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
NIXO 04 (TAHINO 04)	1973	29	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Noroit	Eurocean	AFERNOD
NIXO 07 TRANSIT PAPEETE-NOUMEA	1973	14	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Noroit	Ifremer	CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS. IRD Noumea
NIXO 09 (TRANSPAC 02 - NO9)	1973	30	Pacifique SE (Limite 140 W)	Le Noroit	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
NIXO 10 (TECHNO 07)	1973	15	Pacifique Sud	Marara	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
NIXO 11 (TAHINO 07)	1974	18	Pacifique Sud	Marara	IRD	AFERNOD
NIXO 18 (MN 74/1)	1974	25	Pacifique NE (Limite 180w)	Moana Wave	Divers Prive	NATIONAL SCIENCE FOUNDATION
NIXO 15 (TECHNO 08)	1975	37	Océan Pacifique	Marara	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
NIXO 26 (NOR 76/1)	1976	28	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 27 (NOR 76/2)	1976	30	Océan Pacifique	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 28 (NOR 76/3)	1976	27	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 30 (NOR76/5)	1976	25	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	IRD	AFERNOD
NIXO 31 (NOR76/6)	1976	24	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 32 (NOR 77/1)	1977	28	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 33 (NOR 77/2)	1977	30	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 34 (NOR 77/3)	1977	28	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 35 (NOR 77/4)	1977	28	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Ifremer	AFERNOD
NIXO 36 (NOR 77/5)	1977	30	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Noroit	Universite de Perpignan	AFERNOD
SONNE VI	1978	33	Océan Pacifique	Sonne	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST - ETH - Aix La Chapelle Allemagne
TECHNO 09 - NIXO 38	1979	31	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	AFERNOD
NIXO 39 (NX 39)	1979	33	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	AFERNOD
NIXO 40 (SEANOD 1)	1980	39	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	AFERNOD
ECOLARD 802	1980	17	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Ifremer	CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS

NIXO (SEANOD 2)	41	1980	33	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER
NIXO (SEANOD 3)	42	1981	30	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER
NIXO (SEANOD 4)	43	1981	33	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	IRD	IFREMER
DRANOD NIXO 44		1982	28	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	IRD	AFERNOD
NIXO 45 (NX 45)		1982	30	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
NODCO I 1E PARTIE		1986	10	Pacifique Sud	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, UNIVERSITE (STRASBOURG, BREST), GEMONOD
NODCO I-2E PARTIE		1986	4	Pacifique Sud	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, UNIVERSITE (STRASBOURG, BREST)
NODCO I-3E PARTIE		1986	4	Pacifique SW (Limite 140 W)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, UNIVERSITE (STRASBOURG, BREST)
NIXO 46 (NX 46)		1986	26	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, GEMONOD
NIXO 47 (NX 47)		1986	34	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, GEMONOD, UNIVERSITE (STRASBOURG), SIO (USA)
NODCO 2		1987	24	Pacifique Sud	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, GEMONOD, UNIVERSITE (BREST, GRENOBLE), ANALATYCAL SERVICES Co (USA)
NIXONAUT (NIXO 48)		1988	34	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, UNIV. STRASBOURG, PREUSSAG/RFA, UNIV. RIO/BRESIL
NODINAUT		2004	42	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER (DRO/EP, DRO/GM, DRV/LMBE) - Université de Hawaii - Université de Senckenberg, German Center for Marine Biodiversity Research - Korea Ocean Research and Development Institute, KORDI - Natural History Museum, Londres, NHM - Japan Marine Science and Technology Center, JAMSTEC.
BIONOD		2012	43	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Ifremer	Ifremer, BGR

Campagnes Hydrothermalisme

Liste des campagnes référencées dans la base de données Sismer. L'extraction a été faite selon les critères suivants :

- campagnes françaises
- campagnes non confidentielles
- campagnes de type « campagne océanographique » et « prestation commerciale » (les transits, les transits valorisés et les essais n'ont pas été prise en compte)
- tous types de navires en éliminant les côtiers français actuels.

CAMPAGNE	ANN EE	DUREE (J)	ZONE	NAVIRE	ORGANIS ME CHEF DE MISSION	ORGANISMES PARTICIPANTS
MIDLANTE CH31	1972	17	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
RIFT-CH44	1973	12	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
RIFT 74 -CH52	1974	23	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
FAMOUS 06-74	1974	76	Atlantique NE (Limite	Le Noroit	Université de Bretagne	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST

			40 W)		Occidentale (Ubo)	
POST FAMOUS-CH74	1976	16	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
MAPCO CH97	1979	16	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
TOPOGULF 1	1983	20	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IFREMER CENTRE DE BREST, IFM Kiel
TOPOGULF 3	1983	23	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST, IFM Kiel
TOPOGULF IV	1984	28	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IFREMER
MOHNS RIDGE 1	1988	23	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, ENSTA, ENSMP, INSITUT DE GEOLOGIE DE KIEL
SARA	1990	28	Atlantique NE (Limite 40 W)	Jean Charcot	Institut de Physique du Globe de Paris	IPG Paris U. Washington Seattle USAIOSDL, Wormley, UK
DIVANAUT 1	1994	24	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, Université de Lisbonne (Portugal), Woods Hole (USA)
DIVANAUT 2	1994	34	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, INSU, UNIV. LISBONNE, MADERES, AÇORES, GALWAY, MBA PLYMOUTH, SCHIPPS
OCEANAUT	1995	28	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER-UBO-CNRS.
FLORES	1997	33	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER - DRO/GM - CEA - IOS - Universidade de Lisboa - University of Cambridge
PICO	1998	16	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER DRO, CNRS Station Biologique de Roscoff, SOC Southampton (UK), University of Cambridge (UK), IMAR (Portugal)
TRIATNORD	1998	26	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	CNRS/INSU
SALDHANA	1998	14	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Nadir	University of Lisboa	
SUDACORES	1998	30	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS/Univ P & M Curie
IRIS	2001	29	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	
ATOS	2001	30	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	SOC, IMAR, CNRS, Université du Maine, UPMC, Université d'Algarve, Isomer, Université de Wales, Observatoire océanologique de Banyuls
SISMOMAR	2005	34	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	IPG Paris, INSU, Université de Lisbonne
EXOMAR	2005	34	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	IPG, Paris - UBO, LBEM, Brest - LM2E UMR6197, CNRS, Brest - IMAR, Horta, Açores - LM2E, UMR6197, Ifremer, Brest - Jamstec, Yokosuka, Japon - ISOMER/ Lab. Biologie Marine, Université de Nantes - UPMC, UMR7138, Paris.
BBMOMAR	2007	10	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Institut de Physique du Globe de Paris	IPGP, UBO Brest, LOCEAN

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

BBMOMAR2	2008	9	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	CNRS	IPGP, DT-INSU, LOCEAN, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
MOMAR2008-LEG2	2008	21	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	Institut de Physique du Globe de Paris et CNRS INSU, Université Paris VI et CNRS EDD IFREMER
BATHYLUCK 2009	2009	29	Atlantique NE (Limite 40 W)	Pourquoi Pas?	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS, IPGP, INSU, IFREMER, U. Girona, ENS, UBO, U. Azores, U. Modena, Southampton Oceanography Center, U. Lisboa.
HYDROBS-MOMAR 2010	2010	12	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	Université de Bretagne Occidentale - CNRS
MOMARSAT2010	2010	14	Atlantique NE (Limite 40 W)	Pourquoi Pas?	Ifremer	Ifremer, IPGP, IMAR DOP (Pt), IUEM/UBO, OMP/LMTG, Univ. Bremen (De), NOCS (UK), FFCUL/CGU (Pt)
HYDROBS-MOMAR 2011	2011	9	Atlantique NE (Limite 40 W)	Le Suroît	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IUEM/UBO, INSU/CNRS
BIOBAZ 2011	2011	2	Atlantique NE (Limite 40 W)	Pourquoi Pas?	CNRS	UPMC, CNRS, Ifremer, IMAR-DOP
HYDROBS-MOMAR 2012	2012	13	Atlantique NE (Limite 40 W)	Thalassa	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	UBO - INSU - CNRS
COLMEIA	2013	36	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	INSU CNRS, IUEM UBO, IFREMER, Université Fédérale Fluminense, Service Géologique du Brésil (CPRM), Marine du Brésil (IEAPM), GET - Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Modène, Université de Rio Grande du Nord, Université Fédérale de Pernambuco, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Baleia Jubarte
OCEANOGRAPFLU	2013	27	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	UPMC, Paris ' LMGC, Toulouse, IFPEN, Rueil-Malmaison
MOMARSAT2013	2013	15	Atlantique NE (Limite 40 W)	Pourquoi Pas?	Ifremer	IPGP, Aix-Marseille Université, CNRS-GET, IMAR-DOP (Portugal), U. La Rochelle, UPMC, U. Moscou
TOPOGULF 2	1983	27	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST, IFM Kiel
HYDROSNAKE	1988	32	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Nadir	Institut de Physique du Globe de Paris	INSU, IFREMER, CEA,
VEMANAUTE	1988	34	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Nadir	IRD	IFREMER, UBO, CNRS, UN. (STRASBOURG PARIS 6)
FAGUAD	1990	28	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Suroît	BRGM	IFREMER
FARANAUT/15N	1992	30	Atlantique NW (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER
OFM 1	1992	28	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Nadir	CNRS	IPG, INSU
SEADMA 2	1993	25	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Noroît	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS, Université
GRAVINAUTE	1993	30	Atlantique NW	Le Nadir	Institut de Physique du	IPG

			(Limite 40 W)		Globe de Paris	
MICROSMOKE	1995	34	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Nadir	CNRS	IFREMER, CNRS, Université de Washington, du Montana, d'Indiana et du Maryland.
TAMMAR	1996	33	Atlantique NW (Limite 40 W)	Le Nadir	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	INSU/CNRS
MOMARSAT2011	2011	25	Atlantique NW (Limite 40 W)	Pourquoi Pas?	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS, IFREMER
MOMARSAT2012	2012	17	Atlantique NW (Limite 40 W)	Thalassa	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS, IPGP, IFREMER
TADJOURADEN	1995	18	Golfe d'Aden	L'Atalante	Université de Paris VI - UPMC	ENS Paris-IPG Paris-Géoscience Rennes- Université de Sana'a- ISERST Djibouti
SEARISE I	1980	30	Golfe de Californie	Jean Charcot	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IFREMER CENTRE DE BREST
GUYANAUT	1991	29	Golfe de Californie	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, CNRS, Université, UNAM
MIDLANTE CH32	1972	10	Golfe de Gascogne	Jean Charcot	CEA	CENTRE DE FAIBLE RADIO-ACTIVITE GIF SUR YVETTE
MARVEL	1997	31	Golfe de Gascogne	L'Atalante	Ifremer	IFREMER-CNRS-UPMC-SOC/NERC-PML/UK-IMAR-CAMR- University:NANTES,GALWAY,BRUXELLES,WALES
MOHNS RIDGE 2	1988	35	Mer de Norvège	Le Suroît	Ifremer	IFREMER, IPG (Paris), Université de Bergen (Norvège)
CAYVIC	2002	21	Mer des Antilles	L'Atalante	CNRS	INSUE-CNRS (Institut National des Sciences de l'Univers et de l'Environnement), Université de Nice-Sophia Antipolis, UMR 6526 "Géosciences-Azur"
ESTASE I	1984	15	Mer du Japon	Jean Charcot	CEA	CENTRE DE FAIBLE RADIO-ACTIVITE GIF SUR YVETTE, CEA, Universités (Orléans, Hawaii, Japon)
SUMEROUAD	1977	15	Mer Rouge	Le Suroît	Institut de Physique du Globe de Paris	MAGNETISME TERRESTRE ET GEOPHYSIQUE MARINE ST MAURDES-FOSSE
VT 119 / OHA-SIS-BIO-4	2012	47	Océan Antarctique	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	Laboratoire Domaines Océaniques (UMR6538 - UBO - CNRS)
VT 128 / OHA-SIS-BIO-5	2013	35	Océan Antarctique	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	UBO - CNRS
ROMANCHA	1977	18	Océan Atlantique	Jean Charcot	CEA	CENTRE DE FAIBLE RADIO-ACTIVITE GIF SUR YVETTE
SAINT PAUL	1997	22	Océan Atlantique	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, MOSCOW ACADEMY OF SCIENCE, SOUTHAMPTON OCEANOGRAPHIC CENTER, UNIVERSDADA FLUMINENSE (DPT GEOLOGIA)
MOMAR2008-LEG1	2008	15	Océan Atlantique	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS, IPGP, IFREMER, U. Nantes, ENSC, SOC (UK), U. Girona (Spain), U. Azores (Portugal)
R.V VEMA LEG III CH79	1977	22	Océan Atlantique Nord	Jean Charcot	Université de Bordeaux I	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
MAPCO CH98	1979	26	Océan Atlantique Nord	Jean Charcot	Ifremer	CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE BREST
RIDELENTE	1987	35	Océan Atlantique	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, UNIVERSITE (BREST, PARIS VI, UTRECHT)

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

			Nord			
DIANAUT	1990	35	Océan Atlantique Nord	Le Nadir	BRGM	BRGM, IFREMER, USGS, SCRIPPS, Université de Miami,
FARA SIGMA	1991	36	Océan Atlantique Nord	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, IPG (Paris), Université(Rennes), ENS (Lyon, Paris) LAMONT, Rhode Island(University),
FARA - SEADMA I	1991	26	Océan Atlantique Nord	L'Atalante	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	INSU
DORMASIS	1992	22	Océan Atlantique Nord	L'Atalante	Ifremer	IFREMER
MAR	1993	13	Océan Atlantique Nord	Jean Charcot	Université de Paris VI - UPMC	Observatoire Océanologique de Banyuls
GEOFAR	1993	28	Océan Atlantique Nord	Le Noroit	Ifremer	IFREMER, Universités de Bordeaux, Brest, Kiel, Lisbonne, BRGM, Institut Hydrographique du Portugal
SARRIDGE	1997	24	Océan Atlantique Nord	Le Nadir	Ifremer	Ifremer, Université de Chiba (Japon), Université de Lisbonne (Portugal)
GRAVILUCK	2006	24	Océan Atlantique Nord	L'Atalante	Université de la Rochelle	Organismes français : Institut de Physique du Globe de Paris / LOCEAN / UBO / IGN - Organismes étrangers : University of the Azores / Wood's Hole Institution of Oceanography / Lamont Doherty Earth Observatory / Harvard University / Florida State University / Scripps Institution of Oceanography
MOMARETO	2006	30	Océan Atlantique Nord	Pourquoi Pas?	Ifremer	Ifremer, Université P.& M. Curie, Station biologique Roscoff, ISOMER Nantes, IUEM/UBO (France), ISR/Instituto Superior Technico, CI Technologica do Algarve, Université de Faro, IMAR/DOP (Portugal),Cardiff University/SB et Heriot-Watt University (UK),AWI, University of Bremen et Capsum (Allemagne),Systea (Italy), LLN (Belgique), Université de Montréal(Canada).
SERPENTINE	2007	40	Océan Atlantique Nord	Pourquoi Pas?	Ifremer	IFREMER, CNRS, Université Paris UPMC, Laboratoire Biologie Roscoff, ENS, VNIIOkeangeologia (St Petersburg, IGEM (Moscou), ICG (Stockholm), Shirshov Institute (Moscou), Verdnasky Institute (Moscou), Institute of microbiology (Moscou).
MOMARDREAM-NAUTI-NAUT2	2007	18	Océan Atlantique Nord	Pourquoi Pas?	Université de Paris VI - UPMC	CNRS / INSU / UM2 / ENS / IFREMER / UPMC / UBO / Université des Açores.
MARCHE 2	2007	14	Océan Atlantique Nord	Le Suroît	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	CNRS/INSU, Université de Bretagne occidentale - CIMA, Universidade do Algarve UCEH, 8000 F ARO, Portugal - Universidade de Lisboa, Centro de Geofísica, 1749-016 LISBOA - Estrutura de Missão para Extensão da Plataforma Continental 2770, O 47 Paço d'Arcos, Portugal - Pacific Marine Environmental Lab., NOAA/Oregon State University, Newport, OR, USA.
ODEMAR	2013	35	Océan Atlantique Nord	Pourquoi Pas?	Institut de Physique du Globe de Paris	IPGP, U. Montpellier, U. Nantes, U. Toulouse/LGET/CNRS, GEOMAR (Germany), U. Bergen (Norway), MIT/WHOI (USA), U. Balears (Spain), U. Girona (Spain), U. Wyoming (USA), Michigan S. U. (USA), U. Athens (Greece)
RODRIGUEZ (1ER LEG)	1984	34	Océan Indien	Jean Charcot	Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)	INSTITUT PHYSIQUE DU GLOBE, CNEXO

HYDROAMSTERDAM	1984	35	Océan Indien	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
RODRIGUEZ (2EME LEG)	1984	35	Océan Indien	Jean Charcot	Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)	INSTITUT PHYSIQUE DU GLOBE, CNEXO
GALLIENI	1995	34	Océan Indien	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	IPG PARIS -STRASBOURG, UBO BREST
EDUL-MD107	1997	33	Océan Indien	Marion Dufresne	Institut de Physique du Globe de Paris	INSU - CEA
FUJI-MD108	1997	27	Océan Indien	Marion Dufresne	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS-INSU, UNIVERSITY OF TOKYO-JAPON, SOUTHAMPTON OCEANOGRAPHY CENTER-GB, UNIVERSITY OF DURHAM, GB
MAGOFOND2-MD112	1998	29	Océan Indien	Marion Dufresne	Institut de Physique du Globe de Paris	IFRTP - Plouzané, CNRS UMR 6538-IUEM Plouzané, CNRS UMR 7577-IPG Paris, LEGOS Univ Toulouse, ORI Tokyo, NGRI-Inde, NIO-Inde
GIMNAUT	2000	26	Océan Indien	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	CNRS-INSU (Brest-Toulouse-Paris-Le Mans), ORI (Tokyo), NIO (Goa)
MD 125 / SWIFT BISCARHOT	2002	27	Océan Indien	Marion Dufresne	Ifremer	IFREMER - CEA - CNRS - IPG Paris - CAEN Université
MD 135 / SWIR 61-65	2003	27	Océan Indien	Marion Dufresne	Institut de Physique du Globe de Paris	INSU et Ocean Research Institute (Tokyo University).
MD157 PLURIEL/EXTRAPLAC/DEFLO-HY	2006	42	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IUEM / UBO, IFREMER, SHOM, Université de Nantes IPGP, University of Hawaii Etats Unis, National Institute of Oceanography Inde, IPEV
MD 171 / GEISEIR-1	2009	40	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	
VT 109 / OHA-SIS-BIO-1	2009	36	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IUEM - LDO UMR6538 ' CNRS / UBO, CEBC - CNRS
MD 175 / GEISEIR-2	2010	24	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), INSU, Observatoire Midi-Pyrénées, San Diego State University
VT 112 / OHA-SIS-BIO-2	2010	24	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IUEM - LDO UMR6538 ' CNRS / UBO, CEBC - CNRS
MD 183 / SMOOTHSEAFLOOR	2010	32	Océan Indien	Marion Dufresne	Université Louis Pasteur Strasbourg I	Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) / Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) / CNRS/INSU / IFREMER
VT 115 / OHA-SIS-BIO-3	2011	37	Océan Indien	Marion Dufresne	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) - Laboratoire Domaines Océaniques UMR 6538 CNRS / UBO - Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (CEBC) - CNRS
BIOCYARISE	1984	24	Océan Pacifique	Le Nadir	Ifremer	PIRO-CNRS, PIRO-UNIVERSITE (LYON, PARIS, BREST), SIO, UNIVERSITY (CANADA, USA)
HYDRONAUT	1987	48	Océan Pacifique	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, MNHN, CNRS, UNIVERSITE (BREST, PARIS VI, ORLEANS, LYON), JOURNAL GEO.
PITO	1993	19	Océan Pacifique	Le Nadir	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	
HOT-96	1996	43	Océan	Le Nadir	Université de	IFREMER / CNRS / UPMC / CEE,

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

			Pacifique		Paris VI - UPMC	Université de Rutgers, Santa Barbara, Penn State, Scripps Institution
MESCAL_LEG2	2010	20	Océan Pacifique	L'Atalante	Université de Paris VI - UPMC	CNRS-INEE, UPMC
CYAMEX	1978	46	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Nadir	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS
CLIPPERTON	1981	29	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
GEOCYATHERM LEG 1	1982	17	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
GEOCYATHERM LEG 2	1982	17	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
GEOCYATHERM LEG 3	1982	16	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
BIOCYATHERM	1982	19	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Suroît	Ifremer	CNEXO
HYDROFAST	1986	29	Pacifique NE (Limite 180w)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, UNIVERSITE (BREST), LETI, LDGO (PALISADES - USA)
NAZCOPAC	1988	33	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Nadir	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	INSU/IPG
BLANCONAUTE	1991	30	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Nadir	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	INSU/CNRS, UBO, IFREMER, BRGM, Université de Rennes
HERO91	1991	35	Pacifique NE (Limite 180w)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, INSU, Bateau NSF (National Science Fauvalu USA)
HOPE.LEG1	1999	17	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	CNRS	Station Biologique de Roscoff, IFREMER, CNRS, SOC (USA), UPMC.
AMISTAD	1999	21	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	CNRS	UBO/IUEM, IFREMER, IRD Marseille, U Paris Sud, VITO Bruxelles, Max Planck Allemagne, IM Russie, USA, Islande
PHARE	2002	33	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, CNRS, UPMC, IUEM - UBO
PARISUB	2010	29	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	CNRS-INSU - UBO - IPGP - Université San Luis Potosi
MESCAL_LEG1	2010	10	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Université de Paris VI - UPMC	CNRS-INEE, UPMC
BIG	2010	38	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Ifremer	Ifremer DEEP/EP et LM2E UMR 6197 (UBO, CNRS Ifremer) / Ifremer GM Université autonome de Mexico, Mexique / University of Nimjgen, Pays Bas / Winogradsky Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences, Moscou, Russie / IRD, Marseille.
MESCAL	2012	15	Pacifique NE (Limite 180w)	L'Atalante	Université de Paris VI - UPMC	CNRS, UPMC-Paris 6, Ifremer, Rutgers University
ESTASE II	1984	25	Pacifique NW (Limite 180)	Jean Charcot	CEA	CENTRE DE FAIBLE RADIO-ACTIVITE GIF SUR YVETTE, MNHN, IFREMER, Univ. Brest, Geol. Survey Copenhagen
SEARISE II	1980	26	Pacifique SE (Limite 140 W)	Jean Charcot	Université de Bretagne Occidentale (Ubo)	IFREMER CENTRE DE BREST
GEOCYARISE I	1984	22	Pacifique	Le Nadir	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST

			SE (Limite 140 W)			
GEOCYARISE 2	1984	17	Pacifique SE (Limite 140 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST
GEOCYARISE 3	1984	14	Pacifique SE (Limite 140 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER CENTRE DE BREST, CNRS, IOS WORMLEY, ENERGY MINERAL, RESSOURCES OF CANADA
NAUDUR	1993	27	Pacifique SE (Limite 140 W)	Le Nadir	IRD	ORSTOM, IFREMER, INSU, Universités HAWAII, SANTA BARBARA(USA), Université UDINE(Italie)
POLYNAUT	1999	34	Pacifique SE (Limite 140 W)	L'Atalante	Institut de Physique du Globe de Paris	IPGP/INSU, UBO, Un. Kiel, Bremen, JPL, NASA
ALAUFI	2000	17	Pacifique SE (Limite 140 W)	L'Atalante	IRD	INSU/CNRS Universités de Brest et Nantes
BIOSPEEDO	2004	44	Pacifique SE (Limite 140 W)	L'Atalante	CNRS	CNRS, IFREMER, Université Pierre et Marie Curie, IRD, IUEM/UBO, Isomer - Université de Nantes, Université catholique de Louvain (Belgique)
PACANTARCTIC 2	2004	31	Pacifique SE (Limite 140 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, CNRD, IPG, Université de San Diego
SEAPSO 3	1985	21	Pacifique Sud	Jean Charcot	IRD	IFREMER (DERO/GM)
SEAPSO 1	1985	22	Pacifique SW (Limite 140 W)	Jean Charcot	IRD	ORSTOM
SEAPSO 2	1985	20	Pacifique SW (Limite 140 W)	Jean Charcot	Université de Paris VI - UPMC	ORSTOM
SEAPSO 4	1985	12	Pacifique SW (Limite 140 W)	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER, ORSTOM, UNIVERSITE, BRGM, USGS (USA)
NAUTILAU	1989	21	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, BGR/HANNOVRE
BIOLAU	1989	15	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, CNRS, UNIVERSITE PARIS VI
STARMER 1	1989	17	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Nadir	IRD	IFREMER, JAMSTEC, GSJ (Geological Survey of Japan)
STARMER 2	1989	19	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Nadir	Ifremer	IFREMER, CNRS, MUSEUM, JAMSTEC
YOKOSUKA90.LEG1	1991	11	Pacifique SW (Limite 140 W)	Yokosuka	IRD	ORSTOM,IFREMER,SOPAC, Geological Survey of Japan, Japan Marine Science and Technology Center, ...
YOKOSUKA90.LEG2	1991	12	Pacifique SW (Limite 140 W)	Yokosuka	IRD	ORSTOM,IFREMER,SOPAC, Geological Survey of Japan, Japan Marine Science and Technology Center, ...
YOKOSUKA91.LEG1	1991	32	Pacifique SW (Limite 140 W)	Yokosuka	CNRS	ORSTOM,IFREMER,SOPAC, Geological Survey of Japan, Japan Marine Science and Technology Center, ...
NOFI	1994	24	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Université de Montpellier II	CNRS-INSU, ORSTOM, IFREMER, JAMSTEC PROGRAMME NEW STARMER
YOKOSUKA95	1995	28	Pacifique SW (Limite 140 W)	Yokosuka	IRD	IFREMER, ORSTOM, Geological Survey of Japon, JAMSTEC, Institut de Géodynamique de Sophia-Antipolis
PACANTARCTIC	1996	45	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, Univ Whashington, Univ Chiba (Japon), INSU
HOPE.LEG2	1999	25	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	CNRS	Station Biologique de Roscoff, IFREMER, CNRS, SOC (USA), UPMC.
MANAUTE	2000	25	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	IRD	IFREMER, INSU/CNRS, Universités de Kyushu, Tokyo, Hiroshima et Toronto.

Autres campagnes

Liste des campagnes référencées dans la base de données Sismer. L'extraction a été faite selon les critères suivants :

- campagnes françaises
- campagnes non confidentielles
- campagnes de type « campagne océanographique » et « prestation commerciale » (les transits, les transits valorisés et les essais n'ont pas été prise en compte)
- tous types de navires en éliminant les côtiers français actuels.

CAMPAGNE	ANNEE	DUREE (J)	ZONE	NAVIRE	ORGANISME DU CHEF DE MISSION	ORGANISMES PARTICIPANTS
ECO GEORSTOM III	1975	9	Mer de Corail	Le Noroit	IRD	ORSTOM CENTRE DE NOUMEA
GEORSTOM III EST	1975	17	Pacifique SW (Limite 140 W)	Le Noroit	IRD	ORSTOM CENTRE DE NOUMEA
GEORSTOM III NORD	1975	21	Mer de Corail	Le Noroit	Université de Paris VI - UPMC	ORSTOM CENTRE DE NOUMEA
GEORSTOM III SUD	1975	25	Mer de Tasmanie	Le Noroit	IRD	ORSTOM CENTRE DE NOUMEA
ETM FIDJI	1985	3	Pacifique Sud	Jean Charcot	Ifremer	IFREMER (DRO/GM), SOPAC
ZONECO1	1993	19	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER
ZONECO2	1994	20	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie	Service des Mines-IFREMER-ORSTOM-SMAI-UFP-MOP
ZEPOLYF1	1996	21	Océan Pacifique	L'Atalante	Ifremer	Ifremer operateur - Université française du Pacifique - SHOMMOP Papeete - Laboratoire de géophysique de Papeete
ZONECO3	1996	21	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	IRD	ORSTOM NOUMEA-IFREMER-MOP-SMETNC-UFP Tahiti-UBO-GENAVIR-
ZONECO4	1996	21	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, ORSTOM, UBO, UFP, SHOM, le Territoire de Nouvelle Calédonie, les trois Provinces
ZEPOLYF2	1999	32	Océan Pacifique	L'Atalante	Ifremer	IFREMER, UPF, CNRS, SHOM, CEA
ZONECO5	1999	25	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	IRD	IFREMER, SME (Service des Mines de Nouvelle Calédonie), MOP (Mission Océanographique du Pacifique), SMAI, AGSO, Université Townsville, SOPAC.
CARACOLE	2001	16	Atlantique NE (Limite 40 W)	L'Atalante	Ifremer	Martin Ryan Marine Science Institute (Irlande), Université de Tübingen (Allemagne), Renard Centre of Marine Geology (Belgique), Université de Dublin (Irlande), Centre d'Océanologie de Marseille, NIOZ (Pays Bas), Université de Cork (Irlande)
OVIDE 1	2002	32	Atlantique NE (Limite 40 W)	Thalassa	Ifremer	IFREMER CNRS/INSU IIM Vigo Université de Bretagne Occidentale
ZONECO11	2004	27	Pacifique SW (Limite 140 W)	L'Atalante	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie	DIMENC et SMAI (Nouvelle-Calédonie), IFREMER, IFP, IPGP, IUEM
OVIDE 2	2004	33	Atlantique NE (Limite 40 W)	Thalassa	Université de Bretagne	IFREMER, CNRS/INSU, IIM Vigo, IUEM/Université de

					Occidentale (Ubo)	Bretagne Occidentale
MD 145 / KEOPS	2005	41	Océan Indien	Marion Dufresne	CNRS	LOCEAN/IPSL Paris (CNRS/UPMC), IPEV Brest, ACE CERC - University de Tasmanie, CSIRO Division of Marine Research -Hobart (Tasmanie), IFREMER - Brest, IUEM - Brest, LOV - Station Marine d'Endoume, LEGOS, Lab. des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), MNHN, Royal NIOZ (Pays-Bas), LBCM (Univ Paris VI), MREN (Wimereux), Vrije Universiteit Brussel
ZONECO12	2006	14	Mer de Tasmanie	Marion Dufresne	Ifremer	Ifremer Brest, IRD Nouméa, IRD Ile de France, LSCE, CEA Saclay, avec la coordination de la Cellule " Ressources minérales " du programme ZoNéCo (Y. LAFOY, DIMENC)
VT / KEOPS 2006	2006	2	Océan Indien	Marion Dufresne	CNRS	INSU-CNRS - LOB
OVIDE 3	2006	38	Océan Atlantique Nord	Maria S. Merian	Ifremer	Ifremer, CNRS, Université de Bretagne Occidentale/IUEM, Instituto Investigaciones Marinas (Vigo)
MEDECO	2007	54	Méditerranée	Pourquoi Pas?	Ifremer	
VT 86 / KEOPS	2007	15	Océan Antarctique	Marion Dufresne	CNRS	INSU
OVIDE 4	2008	33	Atlantique (Limite 40 W) NE	Thalassa	Ifremer	IFREMER / CNRS, Laboratoire de Physique des Océans (Plouzané), Laboratoire de Chimie Marine (Station biologique de Roscoff), Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo (Espagne)
BOBGEO1	2009	14	Golfé de Gascogne	Pourquoi Pas?	Ifremer	IFREMER (GM/CTDI, GM/LES, GM/LGG, EEP, TSI-SI, NSE-ILE), Université de Bretagne Occidentale, Université de Bretagne Sud, Université de Milan (CoNisMa), Université d'Aberdeen, Université de la Rochelle, Université de Bordeaux I (EPOC), BRGM.
BOBGEO2	2010	7	Golfé de Gascogne	Le Suroît	Ifremer	IFREMER (GM/CTDI, GM/LES, GM/LGG, EEP), Université de Bretagne Occidentale
MD 180 / INDOMIX	2010	10	Archipel d'Indonésien	Marion Dufresne	CNRS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et en Océanographie Spatiales (LEGOS) / Institut de recherche pour le développement (IRD) / Division technique INSU / Météo-France / Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN) / Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER).
OVIDE 5	2010	29	Océan Atlantique Nord	Thalassa	Ifremer	IFREMER / CNRS, Laboratoire de Physique des Océans UMR 6523

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

						CNRS/IFREMER/IRD/UBO - Laboratoire de Chimie Marine UMR 7144 C NRS/UPMC (Station biologique de Roscoff) - Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo (Espagne).
BOUM	2010	34	Méditerranée	L'Atlantique	CNRS	Des laboratoires français et étrangers ont participé à cette campagne (Voir liste en bas de page)
BOBECO LEG1	2011	12	Golfe de Gascogne	Pourquoi Pas?	Ifremer	Ifremer, National University of Ireland Galway, CEA, Université de Bordeaux, Université de Ghent, University of Dublin, University of Aberdeen, IMAR, CCMAR, Université de La Rochelle, SZL.
BOBECO LEG2	2011	16	Golfe de Gascogne	Pourquoi Pas?	Ifremer	Ifremer, National University of Ireland Galway, CEA, Université de Bordeaux, Université de Ghent, University of Dublin, University of Aberdeen, IMAR, CCMAR, Université de La Rochelle, SZL.
CASCADE	2011	12	Méditerranée Bassin Occidental	L'Atlantique	Université de Perpignan	CEFREM (CNRS-UPVD), LOMIC (CNRS-UPMC), LMGEM (CNRS-UMED), LOV (CNRS-UPMC), LOCEAN (CNRS-UPMC), LBCM (IFREMER), BIAF (UA), EPOC (CNRS-UBX1), LGIT (IRD-UJF), DT-INSU (CNRS), DISMAR (UPM, Italie), ICM (CSIC, Espagne), UB (Espagne), HCMR (Grèce)
MD 188 / KEOPS 2	2011	51	Océan Antarctique	Marion Dufresne		Université de la Méditerranée (U2)
ICECTD	2012	27	Océan Atlantique Nord	Thalassa	CEA	CEA-CNRS-UVSQ / IFREMER / CNR (Italie) / Université Erlangen (Allemagne) / MRI (Islande) / Université Paris Sud (IDES'Orsay) / NUI Galway (Irlande)
VT 125 / KEOPS2_MOOR	2013	35	Océan Antarctique	Marion Dufresne	Université de Paris VI - UPMC	CNRS - INSU - Laboratoire d'océanographie Microbienne (LOMIC)

Annexe 4 *Bacteria* isolées des sources hydrothermales océaniques profondes (modifié d'après les thèses de K. Alain, 2003 ; A. Postec, 2005 ; N. Byrne, 2008 ; N. Callac, 2013 et du Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches de A. Godfroy, 2006).

Bacteria	Genre	Espèce	Métabolisme	Origine	T° optimale (°C)	Référence	
Aquificae	<i>Persephonella</i>	<i>P. marina</i>	Microaérophile, autotrophe, sulfotiosulfato- et hydrogène-oxydante, dénitrifiante	EPR 9°N, Pacifique	70	(Gotz et al., 2002b)	
		<i>P. guaymasensis</i>	Microaérophile, autotrophe, sulfotiosulfato- et hydrogène-oxydante, dénitrifiante	Bassin de Guaymas, Pacifique	70	(Gotz et al., 2002b)	
		<i>P. hydrogeniphila</i>	Microaérophile, autotrophe, hydrogène-oxydante, dénitrifiante	Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	70	(Nakagawa et al., 2003)	
		<i>Phorcysia</i>	<i>P. thermohydrogeniphila</i>	Anaérobie, litho-autotrophe, dénitrifiante et sulfo-réductrice	EPR 13°N, Pacifique	75	(Pérez-Rodríguez et al., 2011)
		<i>Thermosulfidibacter</i>	<i>T. takaii</i>	Anaérobie, litho-autotrophe sulfo-réductrice et hydrogène-oxydante	Yonaguni Knoll IV, Southern Okinawa Trough, Pacifique	70	(Nunoura et al., 2008b)
		<i>Hydrogenivirga</i>	<i>H. okinawensis</i>	Aérobie facultative (dénitrifiante) litho-autotrophe sulfo- et thiosulfato oxydante	Yonaguni Knoll IV, Southern Okinawa Trough, Pacifique	70-75	(Nunoura et al., 2008a)
Desulfurobacterales	<i>Desulfurobacterium</i>	<i>D. thermolithotrophum</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfo-réductrice	Snake Pit, MAR, Atlantique	70	(L'Haridon et al., 1998b)	
		<i>D. crinifex</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfo-réductrice et dénitrifiante	CASM, Juan de Fuca, Pacifique	60-65	(Alain et al., 2003)	
		<i>D. atlanticum</i>	Anaérobie, chimio-litho-autotrophe, sulfo- et nitrate-réductrice	23°N MAR, Atlantique	70-75	(L'Haridon et al., 2006b)	
		<i>D. pacificum</i>	Anaérobie, chimio-litho-autotrophe, sulfo-, thiosulfate et nitrate-réductrice	EPR 13°N, Pacifique	75	(L'Haridon et al., 2006b)	
		<i>Balnearium</i>	<i>B. lithotrophicum</i>	Anaérobie, autotrophe, hydrogène-oxydante, sulfo-réductrice	Suiyo seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	70-75	(Takai et al., 2003e)
		<i>Thermovibrio</i>	<i>T. amonificans</i>	Anaérobie, autotrophe, nitrate et sulfo-réducteur	EPR 9°N, Pacifique	75	(Vetriani et al., 2004)
			<i>T. guaymasensis</i>	Anaérobie, litho-autotrophe nitrate- et sulfo-réductrice	Bassin de Guaymas, Pacifique	75-80	(L'Haridon et al., 2006b)
Thermotogales	<i>Marinitoga</i>	<i>M. camini</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Menez-Gwen, MAR, Atlantique	55	(Wery et al., 2001a)	
		<i>M. piezophila</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Grandbonum, EPR 13°N, Pacifique	65	(Alain et al., 2002a)	

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

		<i>M. okinawensis</i>	Anaérobie, hétérotrophe la réduction du soufre stimule la croissance	Southern Okinawa Trough	55-60	(Nunoura et al., 2007)
		<i>M. hydrogenitolerans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Rainbow, MAR, Atlantique	60	(Postec et al., 2005)
	<i>Thermotoga</i>	<i>Thermotoga sp.</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Snake Pit, MAR, Atlantique	80	(Marteinsson et al., 1997)
	<i>Thermosiphon</i>	<i>T. melanesiensis</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Bassin de Lau, Pacifique	70	(Antoine et al., 1997)
		<i>T. japonicus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo- et thiosulfato-réductrice	Bassin de Iheya (Okinawa), Pacifique	72	(Takai & H orikoshi, 2000)
		<i>T. atlanticus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire	Menez Gwen, MAR, Atlantique	65	(Urios et al., 2004b)
		<i>T. affectus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire	MAR, Atlantique	70	(Podosokorskaya et al., 2011)
Thermodesulfobacteria	<i>Thermodesulfobacterium</i>	<i>T. hydrogeniphilum</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfato-réductrice	Bassin de Guaymas, Pacifique	75	(Jeanthon et al., 2002a)
	<i>Thermodesulfatator</i>	<i>T. indicus</i>	Anaérobie autotrophe, sulfato-réductrice	Central Indian Ridge	70	(Moussard et al., 2004)
		<i>T. atlanticus</i>	Anaérobie, litho-autotrophe, sulfato-réductrice	Rainbow, MAR, Atlantique	65-70	(Alain et al., 2010)
	<i>Thermosulfurimonas</i>	<i>T. dismutans</i>	Anaérobie, litho-autotrophe (sources de carbone : le CO ₂ et les bicarbonates), réalisant la dismutation du S ⁰ en thiosulfate et sulfite	Eastern Lau Spreading Center (Bassin de Lau) Pacifique	74	(Slobodkin et al., 2011)
Nouvelle lignée	<i>Caldithrix</i>	<i>C. abyssi</i>	Anaérobie, mixotrophe, fermentaire, dénitrification couplée à oxydation d'hydrogène ou d'acétate	Logatchev, MAR, Atlantique	60	(Miroshnichenko et al., 2003a)
Acidobacteria	<i>Thermotomaculum</i>	<i>T. hydrothermale</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Okinawa Trough, Pacifique	55	(Izumi et al., 2012)
Groupe des Thermus-Deinococcus	<i>Thermus</i>	<i>T. thermophilus GY1211</i>	Aérobie, hétérotrophe	Bassin de Guaymas, Pacifique	75	(Marteinsson et al., 1999a)
		<i>Thermus sp.</i>	Aérobie, hétérotrophe	Bassin de Guaymas, Pacifique et Snake Pit, MAR, Atlantique	70-80	(Marteinsson et al., 1995)
	<i>Marinithermus</i>	<i>M. hydrothermalis</i>	Aérobie, hétérotrophe	Suiyo Seamount, Pacifique	67	(Sako et al., 2003)
	<i>Oceanithermus</i>	<i>O. profundus</i>	Microaérophile, lithotrophe facultative oxydant l'hydrogène, organo-hétérotrophe,	EPR 13°N, Pacifique	60	(Miroshnichenko et al., 2003b)
		<i>O. desulfurans</i>	Microaérophile, chimiohétérotrophe, réduit O ₂ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ et S ⁰	Suiyo Seamount, Pacifique	60	(Mori et al., 2004)
	<i>Vulcanithermus</i>	<i>V. mediatlanticus</i>	Microaérophile, lithohétérotrophe réduisant O ₂ et NO ₃ ⁻	Rainbow, MAR, Atlantique	70	(Miroshnichenko et al., 2003c)

	<i>Rhabdothermus</i>	<i>R. articus</i>	Aérobic hétérotrophe capable de croître en anaérobic en réduisant les nitrates et le S°	Soria Moria vent field 71 °N Arctic Mid-Ocean Ridge	65	(Steinsbu et al., 2011)
Deferribacteres	<i>Deferribacter</i>	<i>D. desulfuricans</i>	Anaérobic, hétérotrophe, réduisant le soufre, les nitrates et l'arsénate	Suiyo Seamount, Pacifique	60-65	(Takai et al., 2003c)
		<i>D. abyssi</i>	Anaérobic, litho ou organo-autotrophe, réduisant S°, NO ₃ ⁻ et Fe(III)	Rainbow et Menez-Gwen, MAR, Atlantique	60	(Miroshnichenko et al., 2003d)
		<i>D. autotrophicus</i>	Anaérobic, litho-autotrophe, réduisant le Fe(III), le Mn(IV), S° et NO ₃ ⁻	Ashadze, MAR, Atlantique	60	(Slobodkina et al., 2009a)
Firmicutes	<i>Caloranaerobacter</i>	<i>C. azorensis</i>	Anaérobic, fermentaire	Lucky Strike, MAR, Atlantique	65	(Wery et al., 2001b)
	<i>Caminicella</i>	<i>C. sporogenes</i>	Anaérobic, fermentaire	Elsa, EPR 13°N, Pacifique	55-60	(Alain et al., 2002c)
	<i>Clostridium</i>	<i>C. caminithermale</i>	Anaérobic, fermentaire, capable de réaliser la réaction de Stickland	Menez-Gwen, MAR, Atlantique	45	(Brisbarre et al., 2003)
		<i>C. tepidiprofundum</i>	Anaérobic, fermentaire, forme des spores	EPR 1°N, Pacifique	50	(Slobodkina et al., 2008)
	<i>Tepidibacter</i>	<i>T. thalassicus</i>	Anaérobic, fermentaire, réduisant le S°	EPR 13°N, Pacifique	50	(Slobodkin et al., 2003)
		<i>T. formicigenes</i>	Anaérobic fermentaire	Menez Gwen, MAR, Atlantique	45	(Urios et al., 2004a)
	<i>Carboxydobrachium</i>	<i>C. pacificum</i>	Anaérobic, fermentaire. Capable de croissance par lithotrophie sur CO	Okinawa, Pacifique	70	(Sokolova et al., 2001)
	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus sp.</i>	Aérobic, hétérotrophe	Bassins de Guaymas et de Lau, Pacifique et Snake Pit, MAR, Atlantique	60-80	(Marteinsson et al., 1996)
	<i>Exiguobacterium</i>	<i>E. profundum</i>	Anaérobic facultative produisant de l'acide lactique, halophile modéré, réduit les nitrates en nitrites en anaérobiose	EPR 13°N, Pacifique	45	(Crapart et al., 2007)
	<i>Vulcanibacillus</i>	<i>V. modesticaldus</i>	Anaérobic, fermentaire (carbohydre, substrats organiques et protéiques), réduit les nitrates en nitrites.	Rainbow, MAR, Atlantique	55	(L'Haridon et al., 2006a)
	<i>Vallitalea</i>	<i>V. guaymasensis</i>	Anaérobic, fermentaire, ne produit pas de spore	Tapis microbien (blanc) recouvrant des sédiments, Bassin de Guaymas, Pacifique	30-35	(Lakhal et al., 2013)
Bacteroidetes	<i>Rhodothermus</i>	<i>R. profundum</i>	Aérobic, hétérotrophe, ne forme pas de spore	EPR 13°N, Pacifique	70-75	(Marteinsson et al., 2010)
Spirochaete	<i>Exilispira</i>	<i>E. thermophila</i>	Anaérobic, hétérotrophe (uniquement de l'extrait de levure)	Iheya North field, Okinawa Trough, Japan, Pacifique	50	(Imachi et al., 2008)
Proteobacteria						
α-Proteobacteria	<i>Indéterminé</i>	<i>Souche JF-1</i>	Aérobic pratiquant la photosynthèse anoxygénique !	Juan de Fuca, Pacifique	30	(Yurkov & Beatty, 1998)

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

	<i>Parvibaculum</i>	<i>P. hydrocarboniclasticum</i>	Aérobie, source de carbone et d'énergie: n-alkanes dans un milieu supplémenté en peptone et extrait de levure	EPR 9°N, Pacifique	35	(Rosario-Passapera et al., 2012)
	<i>Glycocaulis</i>	<i>G. abyssi</i>	Aérobie, chimio-hétérotrophe, halophile modéré	Plume hydrothermal, proche de l'île de Vancouver, Canada		(Abraham et al., 2012)
	<i>Oceanibaculum</i>	<i>O. pacificum</i>		Sédiments hydrothermaux du Bassin de Lau, Pacifique	28-37	(Dong et al., 2010)
	<i>Piezobacter</i>	<i>P. thermophilus</i>	Aérobie facultative, mixotrophe, sulfato-sulfate-, cystein-HCl-, tetrathionate- et sulfite- oxydante avec l'oxygène ou les nitrates comme accepteur	TAG, MAR, Atlantique (isolée sous pression hydrostatique)	50	(Takai et al., 2009)
	<i>Aurantimonas</i>	<i>Aurantimonas-like species, souche AE01-7</i>	Mn(II)-oxydante	tube d'Alvinella pompejana (surface dorsal), P-vent, EPR 9°N, Pacifique	37	(Anderson et al., 2009)
β-Proteobacteria	<i>Thiobacillus</i>	<i>T. hydrothermalis</i>	Aérobie, autotrophe, oxydant le thiosulfate, le tetrathionate, le soufre et le sulfure d'hydrogène en sulfates	Bassin Nord Fidjien, Pacifique	35	(Durand et al., 1993)
δ-Proteobacteria	<i>Geothermobacter</i>	<i>G. ehrlichii</i>	Anaérobie, réduisant le fer ferrique et les nitrates	« Bag city », Juan de Fuca, Pacifique	55	(Kashefi et al., 2003b)
	<i>Desulfovibrio</i>	<i>D. hydrothermalis</i>	Anaérobie, mixotrophe, sulfato-, sulfito-, thiosulfato-réductrice	Grandbonum, EPR 13°N, Pacifique	35	(Alazard et al., 2003)
	<i>Desulfonauticus</i>	<i>D. submarinus</i>	Anaérobie utilisant l'H ₂ /CO ₂ ou le formate comme donneur d'électrons ; le sulfate, sulfite, thiosulfate ou soufre élémentaire comme accepteur d'électron et l'acétate comme source de carbone.	Alvinella et Riftia, EPR 13°N, Pacifique	45	(Audiffren et al., 2003)
	<i>Desulfothermus</i>	<i>D. naphthae souche TD3</i>	Anaérobie, sulfato-réduction couplée à l'oxydation d'hydrocarbures (n-alcane)	Bassin de Guaymas, Pacifique		(Rueter et al., 1994)
	<i>Dissulfuribacter</i>	<i>D. thermophilus</i>	Anaérobie, autotrophe (sources de carbone : le CO ₂ et les bicarbonates), réalisant la dismutation du S ⁰ , du thiosulfate et du sulfite en sulfate et H ₂ S	Valu Fa, Eastern Lau Spreading Center (Bassin de Lau) Pacifique	61	(Slobodkin et al., 2012)
	<i>Deferrisoma</i>	<i>D. camini</i>	Anaérobie, organotrophe, ferri-réductrice (DIR) et sulfo-réductrice	Eastern Lau Spreading Center (Bassin de Lau), Pacifique	50	(Slobodkina et al., 2011)
	<i>Hipaea</i>	<i>H. jasoniae</i>	Anaérobie, thermoacidophile, hétérotrophe sulfo-réductrice capable de litho-autotrophie	Lucky Strike, MAR, Atlantique	60-65	(Flores et al., 2012)
		<i>H. alviniae</i>	Anaérobie, thermoacidophile, hétérotrophe sulfo-réductrice capable de litho-autotrophie	'A' vent, EPR 9°N, Pacifique	60	(Flores et al., 2012)
γ-Proteobacteria	<i>Thiomicrospira</i>	<i>T. crunogena</i>	Aérobie, autotrophe, oxydant le thiosulfate, le soufre et le sulfure d'hydrogène en sulfates et soufre	EPR 21°N, Pacifique	28-32	(Jannasch et al., 1985b)

			élémentaire			
		<i>T. thermophila</i>	Microaérophile, chemolitho-mixotrophe sulfo-oxydante	Mariana Arc, Ouest Pacifique	35-40	(Takai et al., 2004b)
		<i>Thiomicrospira sp., strain MA-3</i>	Aérobic, autotrophe, oxydant le thiosulfate, le soufre et le sulfure d'hydrogène en sulfates et soufre élémentaire	TAG, MAR, Atlantique	28-32	(Wirsen et al., 1998)
		<i>Thiomicrospira sp., strain L-12</i>	Aérobic, autotrophe, oxydant le thiosulfate, le soufre et le sulfure d'hydrogène en sulfates et soufre élémentaire	Galapagos, Pacifique	25	(Ruby & Jannasch, 1982a)
	<i>Vibrio</i>	<i>V. diabolicus</i>	Anaérobic facultatif, hétérotrophe	EPR 13°N, Pacifique	30-45	(Raguénès et al., 1997)
	<i>Alteromonas</i>	<i>A. macleodii subsp. fijiensis</i>	Aérobic, hétérotrophe	Bassin Nord Fidjien, Pacifique	25-35	(Raguénès et al., 1996)
		<i>A. infernus</i>	Aérobic, hétérotrophe	Bassin de Guaymas, Pacifique	25-35	(Raguénès et al., 1997)
		<i>A. macleodii subsp. fijiensis biovar medioatlantica</i>	Aérobic, hétérotrophe	Snake Pit, MAR, Atlantique	35-40	(Raguénès et al., 2003)
	<i>Halomonas</i>	<i>H. neptunia</i>	Aérobic, hétérotrophe	Juan de Fuca, Pacifique	2	(Kaye et al., 2004)
		<i>H. sulfidaeris</i>	Aérobic, hétérotrophe	Juan de Fuca, Pacifique	20	(Kaye et al., 2004)
		<i>H. axialensis</i>	Aérobic, hétérotrophe	Juan de Fuca, Pacifique	20	(Kaye et al., 2004)
		<i>H. hydrothermalis</i>	Aérobic, hétérotrophe	South pacific Ocean, Pacifique	20	(Kaye et al., 2004)
	<i>Thiopfundum</i>	<i>T. hispidum</i>	Anaérobic facultative, autotrophe utilisant le soufre élémentaire, le thiosulfate, ou le tétrathionate comme donneurs d'électrons et l'oxygène et les nitrates comme accepteur d'électrons	Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	39	(Mori et al., 2011)
		<i>T. lithotrophica</i>	Aérobic facultative, litho-autotrophe, sulfo-, thiosulfate-, sulfite et tétrathioante-réductrice avec l'oxygène ou les nitrates comme accepteur d'électrons	TAG, MAR, Atlantique (isolée sous pression hydrostatique)	50	(Takai et al., 2009)
	<i>Salinisphaera</i>	<i>S. hydrothermalis</i>	Aérobic, hétérotrophe, litho-autotrophe facultative utilisant du thiosulfate et du CO ₂	ERP 9°N, Pacifique	30-35	(Crespo-Medina et al., 2009)
	<i>Amphritea</i>	<i>A. atlantica</i>	Aérobic, hétérotrophe	Bathymodiolus, sp. Logatchev, MAR, Atlantique	31-34	(Gärtner et al., 2008)
	<i>Halomonas</i>	<i>H. profundus</i>	Aérobic, hétérotrophe	Carapace de Rimicaris exoculata, Rainbow, MAR, Atlantique	32-37	(Simon-Colin et al., 2008)
ε-Proteobacteria	<i>Caminiibacter</i>	<i>C. hydrogeniphilus</i>	Anaérobic, autotrophe, sulfo-réductrice, dénitrifiante	Elsa, EPR 13°N, Pacifique	60	(Alain et al., 2002e)
		<i>C. profundus</i>	Microaérophile, anaérobic autotrophe	Rainbow, MAR,	55	(Miroshnichenko et

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

			sulfo-réductrice, dénitrifiante	Atlantique		al., 2004b)
		<i>C. mediatlanticus</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfo-réductrice, dénitrifiante	Rainbow, MAR, Atlantique	55	(Voordeckers et al., 2005)
	<i>Nautilia</i>	<i>N. lithotrophica</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfo-réductrice	EPR 13°N, Pacifique	53	(Miroshnichenko et al., 2002b)
		<i>N. abyssi</i>	Anaérobie, hétérotrophe et litho-autotrophe sulfo-reductrice	Elsa, EPR 13°N, Pacifique	60	(Alain et al., 2009)
		<i>N. profunficola</i>	Anaérobie, mixotrophe, sulfo-reductrice	Alvinella pompejana, EPR 13°N, Pacifique	40	(Smith et al., 2008)
		<i>N. nitratireducens</i>	Anaérobie, organotrophe et litho-autotrophe utilisant les nitrates, thiosulfate, S° et sélérate comme accepteur d'électron	L-vent, EPR 9°N, Pacifique	55	(Pérez-Rodríguez et al., 2010)
	<i>Sulfurospirillum</i>	<i>Sulfurospirillum sp. Am-N</i>	Anaérobie, hétérotrophe	EPR 13°N, Pacifique	41	(Campbell et al., 2001)
	<i>Sulfurimonas</i>	<i>S. autotrophica</i>	Aérobie, autotrophe soufre et thiosulfate oxydante	Mid-Okinawa Trough Pacifique	25	(Inagaki et al., 2003)
		<i>S. parvalvinella</i>	Anaérobie facultative chimolitho-autotrophe utilisant l'H ₂ , le S° ou le thiosulfate comme source d'énergie et le CO ₂ comme source de carbone	Mid-Okinawa Trough	30	(Takai et al., 2006)
	<i>Hydrogenimonas</i>	<i>H. thermophila</i>	Microaérophile anaérobie autotrophe sulfo-réductrice, dénitrifiante	Central Indian ridge, Océan Indien	55	(Takai et al., 2004c)
	<i>Sulfurovum</i>	<i>S. lithotrophicum</i>	Microaérophile anaérobie autotrophe, soufre et thiosulfate oxydante	Okinawa Trough, Japon, Pacifique	28-30	(Inagaki et al., 2004)
	<i>Thioreductor</i>	<i>T. micantisoli</i>	Autotrophe anaérobie sulfo-réductrice, dénitrifiante	Okinawa Trough, Japon, Pacifique	32	(Nakagawa et al., 2005a)
	<i>Lebetimonas</i>	<i>L. acidiphila</i>	Autotrophe anaérobie sulfo-réductrice	Mariana Arc, Pacifique	50	(Takai et al., 2005)
	<i>Thiofractor</i>	<i>T. THIOCAMINUS</i>	Anaérobie, litho-autotrophe utilisant l'hydrogène comme source d'énergie, le S° comme accepteur d'électron et le CO ₂ comme source de carbone	Nikko Seamount, Mariana Arc, Pacifique	37	(Makita et al., 2012)

Annexe 5 *Archaea* isolées des sources hydrothermales océaniques profondes (modifié d'après les thèses de K. Alain, 2003 ; A. Postec, 2005 ; N. Byrne, 2008 ; N. Callac, 2013 et du Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches de A. Godfroy, 2006).

Archaea	Genre	Espèce	Métabolisme	Origine	T° optimale (°C)	Référence	
«Nanoarchaeota »	<i>Nanoarchaeum</i>	<i>N. equitans</i>	Enrichie en conditions d'anaérobiose et d'autotrophie	EPR 9°N, Pacifique	90	(Huber et al., 2002a)	
Crenarchaeota	<i>Desulfurococcales</i>	<i>Desulfurococcus sp S et SY</i>	Anaérobie, hétérotrophe, sulfo-réductrice	EPR 11°N, Pacifique	85 et 90	(Jannasch et al., 1988b)	
	<i>Ignicoccus</i>	<i>I. pacificus</i>	Anaérobie, autotrophe, sulfo-réductrice	EPR 9°N, Pacifique	90	(Huber et al., 2000a)	
	<i>Staphylothermus</i>	<i>S. marinus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, sulfo-réductrice	EPR 11°N, Pacifique	85-92°C	(Fiala et al., 1986b)	
	<i>Pyrodictium</i>	<i>P. abyssi</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réductrice	Bassin de Guaymas, Pacifique	97	(Pley et al., 1991)	
			<i>Souche 121</i>	Réalise l'oxydation du formate couplée à la réduction du fer ferrique (formation magnétite)	Mothra (Finn), Juan de Fuca, Pacifique	Gamme T° : 85-121°C	(Kashefi & Lovley, 2003b)
	<i>Pyrolobus</i>	<i>P. fumarii</i>	Anaérobie facultatif, autotrophe oxydant l'hydrogène et réduisant les nitrates, le thiosulfate et les faibles concentrations d'oxygène	TAG, MAR, Atlantique	106	(Blöchl et al., 1997)	
	<i>Aeropyrum</i>	<i>A. camini</i>	Hétérotrophe aérobie	Suyio Seamount, Izu Bonin Arc, Pacifique	85	(Nakagawa et al., 2004a)	
Euryarchaeota							
Methanococcales	<i>Methanocaldococcus</i>	<i>M. jannaschii</i>	Anaérobie, méthanogène	EPR 21°N, Pacifique	85	(Jones et al., 1983a)	
		<i>M. jannaschii str FS406-22</i>	Anaérobie, méthanogène fixatrice d'azote	Pacifique Axial volcano Juan de Fuca, Pacifique	90	(Mehta & Baross, 2006b)	
		<i>M. infernus</i>	Anaérobie, méthanogène	Logatchev, MAR, Atlantique	85	(Jeanthon et al., 1998b)	
		<i>M. vulcanius</i>	Anaérobie, méthanogène	EPR 13°N, Pacifique	80	(Jeanthon et al., 1999b)	
		<i>M. indicus</i>	Anaérobie, méthanogène	Site Kairei, Central indian ridge, Océan indien	85	(L'Haridon et al., 2003b)	
	<i>Methanothermococcus</i>	<i>M. okinawensis</i>	Anaérobie, méthanogène	Ihaya Ridge, O kinawa Trough, Japon, Pacifique	60-65	(Takai et al., 2002)	
	<i>Methanotorrus</i>	<i>M. formicicus</i>	Anaérobie, méthanogène	Central indian Ridge	75	(Takai et al., 2004d)	
	Methanopyrales	<i>Methanopyrus</i>	<i>M. kandleri</i>	Anaérobie, méthanogène, sulfo-réductrice réduisant le CO ₂ ou le CH ₄	Bassin de Guaymas, Pacifique	98	(Kurr et al., 1991b ; Burggraf et al., 1991b ; Huber et al., 1989b)
Thermococcales	<i>Thermococcus</i>	<i>T. guaymensis</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	88	(Canganella & Jones, 1994 ; Canganella et al., 1997 ; Canganella	

ESCo Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes

						et al., 1998a)
		<i>T. aggregans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	88	(Canganella & J ones, 1994 ; Canganella et al., 1997 ; Canganella et al., 1998a)
		<i>T. barossi</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Juan de Fuca, Pacifique	82	(Duffaud et al., 1998a)
		<i>T. fumicolans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin Nord Fidjien Pacifique	85	(Godfroy et al., 1996a)
		<i>T. hydrothermalis</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	EPR 21°N, Pacifique	85	(Godfroy et al., 1997)
		<i>T. peptonophilus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Fosse des Mariannes Pacifique	85-90	(Gonzalez et al., 1995)
		<i>T. siculi</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Okinawa Trough, Japon, Pacifique	85	(Grote et al., 1999)
		<i>T. chitonophagus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	85	(Huber et al., 1995b)
		<i>T. barophilus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Snake Pit, MAR, Atlantique	85	(Marteinsson et al., 1999b)
		<i>T. atlanticus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	TAG, MAR, Atlantique	85	(Cambon-Bonavita et al., 2003)
		<i>T. gammatolerans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	88	(Jolivet et al., 2003)
		<i>T. marinus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Snake Pit, MAR, Atlantique	88	(Jolivet et al., 2004)
		<i>T. radiotolerans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	88	(Jolivet et al., 2004)
		<i>T. coalescens</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	87	(Kuwabara et al., 2005)
		<i>T. celericrescens</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	80	(Kuwabara et al., 2007a)
		<i>T. thioreducens</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Rainbow, MAR, Atlantique	83-85	(Pikuta et al., 2007)
		<i>T. prieurii</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Sarah Spring, EPR, Pacifique	80	(Gorlas et al., 2013)
		<i>Thermococcus sp ES1</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Juan de Fuca, Pacifique	82	(Pledger & Baross, 1989b)
		<i>Thermococcus sp DT-1331</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Minami-ensei Knoll, Mid-Okinawa Trough .Pacifique		(Kwak et al., 1995)
		<i>Thermococcus sp</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	EPR 11, 13 e t 21°N, Atlantique		(Raguénès et al., 1995)
		<i>Thermococcus sp</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas Pacifique		(Antoine et al., 1995)
		<i>Thermococcus sp</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulforéducteur	Bassin de Guaymas Pacifique		(Lepage et al., 2004)

		<i>Thermococcus sp.</i>	CO oxydation avec H ₂			(Sokolova et al., 2004)
		<i>Thermococcus sp</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Juan de Fuca Ridge, Pacifique		(Holden et al., 2001)
	<i>Pyrococcus</i>	<i>P. abyssi</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Bassin Nord-Fidjien, Pacifique	96	(Erauso et al., 1993)
		<i>P. glycovorans</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Site Totem, EPR 13°N, Pacifique	95	(Barbier et al., 1999)
		<i>P. horikoshii</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Okinawa Trough, Japon, Pacifique	98	(Gonzalez et al., 1998)
		<i>P. yayanosii</i>	Anaérobie, piezophile, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Ashadze, MAR, Atlantique	98	(Birrien et al., 2011)
		<i>Pyrococcus sp GB-D</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Bassin de Guaymas Pacifique	95	(Jannasch et al., 1992)
		<i>Pyrococcus sp ES4</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	Juan de Fuca, Pacifique	90-99	(Pledger & Baross, 1991)
		<i>Pyrococcus sp</i>	Anaérobie, hétérotrophe, fermentaire, sulfo-réducteur	13°N EPR, Pacifique		(Lepage et al., 2004)
	<i>Palaeococcus</i>	<i>P. ferrophilus</i>	Anaérobie, hétérotrophe, réduisant le soufre (fer nécessaire comme cofacteur pour sa croissance)	Ogasawara, Pacifique	83	(Takai et al., 2000a)
		<i>P. pacificus</i>	Anaérobie, piezophile, organo-hétérotrophe, sulfato- et sulfo-réductrice facultative	Sédiments hydrothermaux, EPR, Pacifique	80	(Zeng et al., 2013)
Archaeoglobales	<i>Archaeoglobus</i>	<i>A. profundus</i>	Anaérobie, mixotrophe, sulfato-réducteur	Bassin de Guaymas, Pacifique	82	(Burggraf et al., 1990)
		<i>A. veneficus</i>	Anaérobie, croissance en lithoautotrophie avec les sulfites ou le thiosulfate comme accepteurs ou respiration organotrophe des sulfites	Snake Pit, MAR, Atlantique	75-80	(Huber et al., 1997b)
		<i>A. infectus</i>	Anaérobie, mixotrophe, réduisant le thiosulfate et les sulfites	Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, Pacifique	70	(Mori et al., 2008)
	<i>Geoglobus</i>	<i>G. ahangari</i>	Anaérobie, mixotrophe, croissance en lithoautotrophie ou en organohétérotrophie avec le fer ferrique comme accepteur d'électrons	Bassin de Guaymas, Pacifique	88	(Kashefi et al., 2002b)
		<i>G. acetivorans</i>	Anaérobie, mixotrophe, croissance en lithoautotrophie ou en organohétérotrophie avec le fer ferrique comme accepteur d'électrons	Ashadze, MAR, Atlantique	81	(Slobodkina et al., 2009b)
DHVE 2	<i>Acidilipifundum</i>	<i>A. boonei</i>	Anaérobie, hétérotrophe, thermoacidophile, sulfo- et ferri-réductrice	Mariner vent field Bassin de Lau, Pacifique	70	(Reysenbach et al., 2006)

Crédits photographiques de la première de couverture, de gauche à droite et de haut en bas

- Un peuplement de modioles, *Bathymodiolus thermophilus*, sur le site 9°50'N de la dorsale Est-Pacifique à 2400m de fond. L'établissement d'une moulière s'accompagne d'un cortège d'espèces, visibles (comme des crabes, vers et gastéropodes) ou non visibles (méiofaune et compartiment microbien).
Ifremer / Campagne MESCAL 2010
- Les concombres de mer sont communs sur les zones à nodules du Pacifique nord équatorial, tel ce *Psychropotes longicauda* par 5500 mètres de profondeur.
Ifremer - Nautille / Campagne Nodinaut 2004
- Alvinellacine, premier peptide antibiotique isolé à partir du ver extrémophile *Alvinella pompejana*, vivant près des cheminées hydrothermales.
Aurélie Tasiemski. Figure tirée de l'article : Tasiemski A, Jung S, Boidin-Wichlacz C, Jollivet D, Cuvillier-Hot V, et al. (2014) Characterization and Function of the First Antibiotic Isolated from a Vent Organism: The Extremophile Metazoan *Alvinella pompejana*. PLoS ONE 9(4): e95737.
- Cette grande anémone de mer, *Bolocerooides daphnae*, dont les tentacules peuvent atteindre plusieurs mètres, s'installe volontiers à la périphérie des sites hydrothermaux actifs de la dorsale Est-Pacifique.
Ifremer / Campagne MESCAL 2010
- Les échinodermes, comme ici une étoile de mer, une ophiure et une comatule, sont abondants sur les basaltes et les sulfures autour des sites actifs de la dorsale Est-Pacifique.
Ifremer - Virginie Tilot / Campagne Parisub 2010
- L'exploration d'un site commence par l'établissement d'une carte bathymétrique de haute précision, acquise par submersible près du fond. Sur cette photo, la carte du site Lucky Strike de la dorsale Médio-Atlantique, acquise avec le ROV Victor durant les campagnes MoMarSat, est utilisée pour préparer les plongées durant la campagne BioBaz en 2013.
Ifremer - Sébastien Duperron / Campagne BIOBAZ 2013
- Mise à l'eau du submersible habité Nautille.
Ifremer / Campagne Futuna3 2012
- Une chimère, *Hydrolagus sp.*, espèce cousine des requins, et visiteur fréquent des sites hydrothermaux de la dorsale médio-Atlantique, ici sur le site de Lucky Strike par 1700 m de fond.
Ifremer / Campagne BIOBAZ 2013
- Fumeur noir du site hydrothermal Rainbow, dorsale Médio-Atlantique (Atlantique nord)
Ifremer - Victor / Campagne MOMAR08 Leg2 2008

La France dispose d'une capacité importante d'exploration et d'accès à de nouvelles ressources minérales dans les grands fonds océaniques, qui sont associées à des écosystèmes spécifiques, dont certains sont identifiés comme des milieux exceptionnels de biodiversité au plan mondial. Compte tenu des impacts potentiels d'activités d'exploitation sur ces écosystèmes encore très mal connus, le ministère chargé de l'Écologie et le ministère chargé de la Recherche ont confié au CNRS et à l'Ifremer la responsabilité de réaliser une expertise sur ce sujet.

Cette expertise scientifique collective sur les impacts environnementaux de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes établit une synthèse des connaissances scientifiques disponibles sur le sujet au plan international et identifie les verrous scientifiques et les activités de recherche et de développement à engager pour les comprendre et les lever.

Destinés à l'ensemble des acteurs du monde de la mer, le rapport de l'expertise et sa synthèse ont vocation à constituer une base de travail partagée pour orienter les travaux scientifiques et conduire l'exploration et l'exploitation des ressources minérales profondes dans une perspective de gestion durable des ressources.



MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE