



Minéralisations marines profondes en Nouvelle-Calédonie : Caractérisation minéralogique et chimique des encroûtements ferromanganésifères au sein de la ZEE

STASZAK Paul^{1,2}, Julien COLLOT¹, Pierre JOSSO³, Ewan PELLETER², Samuel ETIENNE¹ et Martin PATRIAT²

¹ Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, DIMENC, BP M2, 98845 Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

² IFREMER, Unité Géosciences Marines, 29280 Plouzané, France

³ British Geological Survey, Environmental Science Centre, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, United Kingdom

Février 2022

Référence: rapport SGNC-2022(03)

DOI : 10.13155/86566

Diffusion : rapport public

Mots-clés: Encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn), Zone Économique Exclusive (ZEE), Minéralisations hydrothermales/diagénétiques, XRF/XRD, ICP-MS, Terres rares (REE), Prédicativité

Comment citer ce document :

Staszak P., Collot J., Josso P., Pelleter E., Etienne S., Patriat M., 2022, Minéralisations marines profondes en Nouvelle-Calédonie : Caractérisation minéralogique et chimique des encroûtements ferromanganésifères au sein de la ZEE, Rapport SGNC-2022(03), 102 p. <https://doi.org/10.13155/86566>

Résumé

La majorité des informations disponibles sur les minéralisations marines profondes au sein de la ZEE de Nouvelle-Calédonie provient des travaux entrepris par l'ORSTOM (IRD) entre 1970 et 1980. L'objectif de ce projet, mené conjointement entre l'Institut Français pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), le Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC) et l'Agence de Développement Économique de Nouvelle-Calédonie (ADECAL) est de mettre à jour les connaissances sur ces dépôts en utilisant des méthodes analytiques modernes.

L'inventaire de tous les échantillons de dragages existants en Nouvelle-Calédonie depuis 1970 a permis de mettre en évidence 104 échantillons présentant des encroûtements au sein et à proximité de la ZEE. Ces échantillons sont principalement localisés au Sud-Est de la Nouvelle-Calédonie, mais également au Nord dans la continuité de la Ride des Loyauté et à l'Ouest sur les monts sous-marins de la Ride de Lord Howe. Une caractérisation chimique et minéralogique de ces minéralisations (XRD/XRF, MEB et ICP-MS) a permis de confirmer qu'elles sont pour la plupart des encroûtements ferromanganésifères hydrogénés, et a également mis en évidence l'originalité de certaines minéralisations associées à une activité hydrothermale et/ou diagénétique, dont la description et l'analyse sont une première en Nouvelle-Calédonie. Les encroûtements ferromanganésifères hydrogénés sont enrichis en métaux de base, traces et terres rares (17,4% Mn, 20,8% Fe, 0,42% Co, 0,31% Ni et 1 307 ppm Σ REE), alors que les minéralisations hydrothermales et/ou diagénétiques sont appauvries en métaux traces et terre rares, mais présentent pour quelques-unes des concentrations fortes en Mn (plus de 50%) et Ni (jusqu'à 0,7%). La comparaison de ces résultats avec ceux issus d'autres océans du globe montre que la Nouvelle-Calédonie se situe dans la moyenne des concentrations en métaux.

Les fortes concentrations en Co, Ni et Cu de certains échantillons, ainsi que la physiographie particulière de la zone Sud des rides de Loyauté et de Norfolk, en font une des zones les plus propices pour des investigations supplémentaires. Une première approche, couplant les données de prélèvements, de réflectivité du fond et de bathymétrie haute-résolution, a permis de tester une méthode de prédictivité de présence d'encroûtement sur les sites les plus intéressants et potentiellement minéralisés. La robustesse de ces cartes a été testée en comparant les zones potentielles avec des données vidéo ROV de fonds marins acquises lors de la campagne KANADEEP II.

Cette étude a permis de répertorier pour la première fois les minéralisations Fe-Mn de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, et d'en caractériser leurs grandes diversités, compositions et morphologies. L'effort d'échantillonnage reste malgré tout insuffisant pour poursuivre l'évaluation du potentiel économique. La poursuite de cette évaluation nécessite la réalisation de campagnes d'exploration dédiées avec des méthodes d'échantillonnage et d'acquisition de données propres à l'étude des minéralisations profondes.

Glossaire

Bulk analysis : Analyse roche totale ;

CCZ : Clarion-Clipperton Zone ;

HFSE : High Field Strength Element (Hf, Zr, Ti, Nb, Ta), éléments avec un petit rayon ionique et une charge élevée ;

ICP-MS : Le Spectromètre de Masse à Plasma à Couplage Inductif est une méthode d'analyse du contenu en éléments traces et ultra-traces allant jusqu'au ppb ;

PCZ : Prime Zone for Crust ;

Ppm : Partie par million, 1% = 10 000 ppm ;

Ppb : Partie par milliard ;

REE : Terres rares (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) ;

LREE : Terres rares légères (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu et Gd) ;

HREE : Terres rares lourdes (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu) ;

ROV : Remotely Operated Vehicle ;

XRD : Méthode d'analyse de la minéralogie basée sur la diffraction des rayons X ;

XRF : Méthode d'analyse du contenu en éléments majeurs et mineurs basée sur la fluorescence X ;

ZEE : Zone Economique Exclusive ;

Résumé étendu

Contexte du projet

La découverte de minéralisations dans les fonds océaniques date du milieu du XIXème siècle, lorsque le navire britannique Challenger alors en voyage autour du monde, remonta des "boules brunes-noirâtres" du fond de la mer par dragage. L'intérêt de ces minéralisations et leur concentration en métaux ne fut mis en avant qu'à partir du milieu du XXème siècle, marquant le début des premières campagnes d'échantillonnage des grands fonds. A l'heure actuelle, plusieurs pays et grands groupes miniers sont impliqués dans la recherche prospective des ressources minérales marines en eaux profondes, laissant entrevoir pour les prochaines années l'apparition des premiers sites miniers offshores.

Les campagnes scientifiques marines des cinquante dernières années ont permis de mettre en évidence des processus géologiques et géochimiques à l'origine d'accumulation métallifères en conditions de subsurface sur les fonds marins de la planète. Ces phénomènes communs sont retrouvés aussi en bien en zones dites "actives" (dorsales océaniques, points chaud et arcs volcanique) que dans des zones "inactives" (plaines abyssales, monts sous-marins et ride océaniques/continentales), à des profondeurs allant de quelques dizaines de mètres à plusieurs milliers de mètres.

Dans le cas des ressources minérales marines profondes, on ne considère que les minéralisations situées au-delà de 300 m de profondeur (et généralement retrouvées au-delà de 1 000 m [Dyment et al., 2014]). On en dénombre trois grands types : les nodules polymétalliques, les encroûtements ferromanganésifères et les sulfures massifs hydrothermaux (Figure 1).

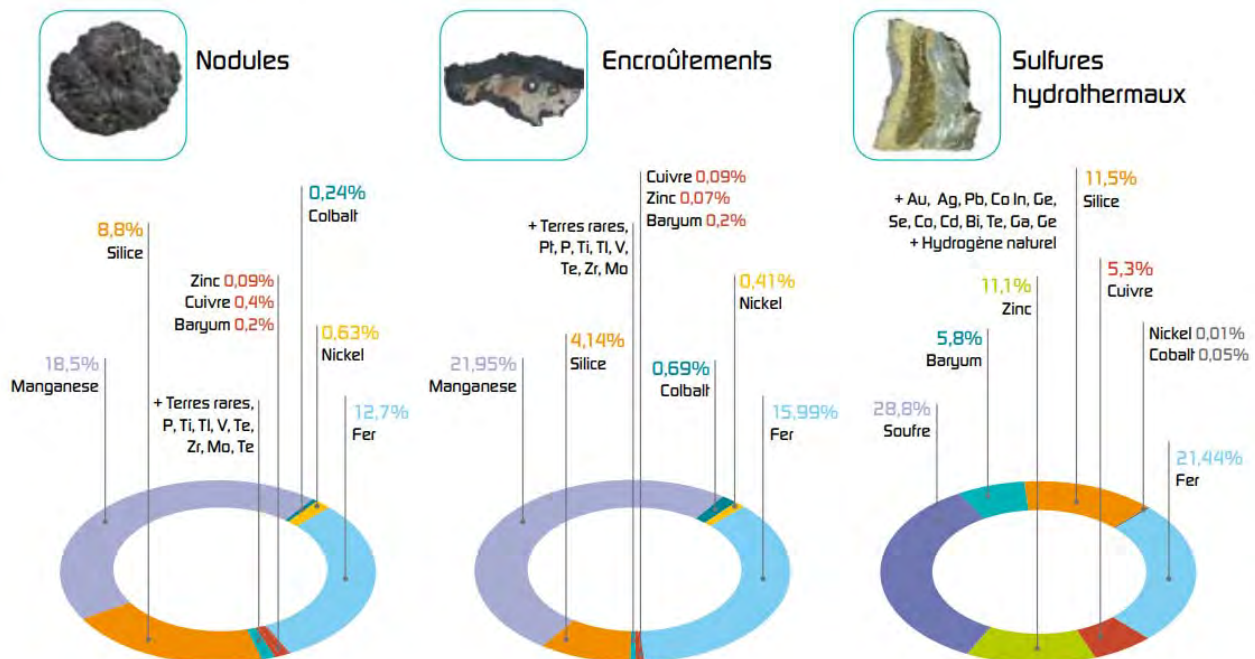


Figure 1. Composition moyenne des 3 types de ressources minérales marines profondes (source : IFREMER).

Les nodules polymétalliques sont formés de concrétions métallifères déposées autour d'un nucléus. Ils sont retrouvés en zone de plaine abyssale dans plusieurs mers du globe, à des profondeurs généralement supérieures à 4 000 m et sur un substrat meuble. Les encroûtements ferromanganésifères sont également présents dans toutes les mers du globe, plutôt associés à des élévations topographiques comme des monts sous-marins ou des rides océaniques et volcaniques. Les concrétions métallifères sont semblables à celles des nodules, mais se déposeront préférentiellement sur un substrat induré sans sédiment, formant une dalle plutôt qu'un nodule. La croissance de ces deux types de minéralisation est particulièrement lente (1 à 20 millimètres par million d'années) et nécessite des conditions de courants océaniques et de sédimentation particulières pour garantir l'accumulation de métaux. Les sulfures massifs hydrothermaux se retrouvent à l'aplomb des zones actives sous-marines comme les dorsales océaniques (plus de 60 000 km de longueur cumulée [Dyment *et al.*, 2014]) et les bassins d'arrière-arc. C'est l'activité magmatique sous-jacente à ces environnements qui est le moteur de la production, du transport et de la précipitation de fluides riches en métaux venant des profondeurs sous forme de sulfures massifs en sub-surface.

Le potentiel économique de ces ressources est d'autant plus grand qu'elles renferment des éléments essentiels à la transition énergétique et aux nouvelles technologies (Figure 1). Ces éléments comme le Co, le Ni ou les terres rares (REE), peuvent en effet être présents en quantités importantes dans certaines de ces minéralisations. La consommation globale en ces métaux rares est en nette augmentation ces dernières années, bien que l'approvisionnement reste lui limité, renforçant la dépendance envers certains pays (Chine, Inde, Brésil, etc.). Les ressources minérales marines profondes se présentent donc comme une alternative d'approvisionnement en métaux pour les années futures.

L'étude d'un grand nombre de ces minéralisations à l'échelle mondiale a aidé à identifier pour chaque type de dépôt les éléments principaux intéressants et les coproduits valorisables [Hein *et al.*, 2013; Koschinsky *et al.*, 2010] :

- Les nodules polymétalliques : **Ni-Cu-Mn** + (Co, Li, Mo, REE, Zr) ;
- Les encroûtements ferromanganésifères : **Co-Ni-Mn** + (Bi, Mo, Nb, Pt, REE, Te, Th, Ti, W, Zr) ;
- Les sulfures massifs hydrothermaux : **Cu-Zn-Au-Ag** + (As, Cd, Ga, Ge, In, Sb, Se).

Bien que ces minéralisations soient vues comme une potentielle future source d'approvisionnement en métaux, à l'heure actuelle le manque d'information et de contrainte sur leurs tailles, distributions et compositions ne permet pas de fournir une estimation significative et juste de leur ressource. L'étude de ces dépôts est au croisement de plusieurs disciplines (géochimie des océans, métallogénie, géodynamique, courantologie ou encore biologie) qui sont toutes fondamentales dans la compréhension de leur formation, mais aussi des possibles impacts provoqués par leur exploitation sur la biodiversité et sur l'homme.

En effet, les risques liés à l'exploitation de ces ressources dans un environnement de grands fonds marins sont importants. La connaissance des organismes benthiques et de leurs habitats reste parcellaire, et nécessite des opérations lourdes comme le dragage, chalutage ou carottage pour être caractérisé. Néanmoins les progrès techniques des 30 dernières années ont permis de mieux comprendre la biologie et la physiologie des écosystèmes profonds, notamment pour les nodules polymétalliques et les sulfures

massifs hydrothermaux où les données recueillies sont maintenant considérables, mais restent insuffisantes pour statuer sur l'impact réel d'une telle exploitation.

Objectifs du projet

La France, via l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), est un acteur majeur dans l'exploration des grands fonds. L'une de ses missions, notamment au travers de chantiers dans le Pacifique à proximité des îles de Clarion et Clipperton, et dans l'Océan Atlantique sur la Ride médio-océaniques est la caractérisation et la compréhension des systèmes profonds (géologiques et biologiques). En Nouvelle-Calédonie, les premières minéralisations furent remontées lors des campagnes marines de l'ORSTOM (aujourd'hui IRD) menées dans les années 1970-1980. Cette découverte donna lieu à plusieurs études sur la chimie et les environnements de dépôt au sein de la ZEE (Zone Economique Exclusive) de la Nouvelle-Calédonie. C'est par le biais du programme Zonéco lancé en 1991, regroupant des instituts de recherche, l'Etat, le Territoire et les trois Provinces, que la Nouvelle-Calédonie manifesta son intérêt pour la connaissance des fonds marins de sa ZEE. Ce programme, terminé depuis 2014, a permis l'obtention d'informations précieuses pour l'évaluation et la valorisation des ressources marines.

Si le programme Zonéco est aujourd'hui terminé, la thématique des ressources minérales profondes reste au cœur des préoccupations de la Nouvelle-Calédonie et fait l'objet d'un partenariat récent entre l'IFREMER et le Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie (SGNC) de la Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie en Nouvelle-Calédonie (DIMENC) visant à continuer d'améliorer la connaissance des fonds marins de la ZEE et de son contexte géodynamique, ainsi que d'en évaluer le potentiel en ressources minérales marines.

Néanmoins les connaissances acquises sur les ressources minérales marines profondes restent limitées en Nouvelle-Calédonie. Seuls quelques échantillons des campagnes des années 1970-1980 ont été analysés et leur répartition ne permet pas d'avoir une idée des processus impliqués à l'échelle de la ZEE, ou même localement. Depuis 2013, plusieurs campagnes en mer à but biologique ou géologique ayant effectué des opérations de prélèvements (dragages, carottages, etc.) ont échantillonné des encroûtements ferromanganésifères. De plus, un certain nombre d'échantillons d'anciennes campagnes n'ont jamais fait l'objet de description, ni d'analyse. Le besoin de réactualiser les connaissances dans ce domaine en Nouvelle-Calédonie est donc primordial et permettra par la suite d'avoir une base de travail fiable pour tout autre travail d'exploration.

Ce projet d'étude des minéralisations marines profondes au sein de la zone économique exclusive de Nouvelle-Calédonie, en collaboration avec la DIMENC, l'IFREMER et l'ADECAL, se structure autour de 6 objectifs principaux :

- Inventorier et échantillonner tous les prélèvements marins existants présentant des minéralisations profondes ;
- Synthétiser les résultats des analyses existantes (travaux IFREMER et DIMENC) ;
- Étudier la morphologie et la minéralogie des minéralisations à l'échelle macro- et microscopique ;

- Réaliser de nouvelles analyses des concentrations en métaux et terres rares sur les échantillons non analysés ;
- Produire des cartes de répartitions des teneurs en principaux métaux à l'échelle de la ZEE ;
- Interpréter la répartition des teneurs et discuter les facteurs contrôlant les minéralisations ;
- Intégrer ces résultats dans le contexte géologique et océanographique régional.

Résultats

La première phase du projet a permis d'identifier tous les échantillons marins présentant des minéralisations au sein et à proximité de la ZEE. A partir de la base de données actuelle qui comporte 3 326 références, 104 prélèvements d'encroûtements ferromanganésifères, provenant de 12 campagnes océanographiques réalisées entre 1975 et 2019, ont été choisis et échantillonnés pour être analysés (Figure 2). Les échantillons sont localisés au sein et à proximité de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, principalement au Sud-Est entre les rides de Norfolk et des Loyauté, au nord dans la continuité de la Ride des Loyauté et à l'Ouest sur les monts sous-marins de la Ride de Lord Howe. L'échantillonnage a également une bonne répartition en termes de profondeur d'eau des prélèvements (entre 430 m et 4 677 m) et d'environnement de dépôt permettant ainsi de mieux comprendre les processus de formation. La caractérisation s'est faite en utilisant plusieurs méthodes analytiques (XRD et MEB pour la minéralogie, XRF pour l'analyse en éléments majeurs et ICP-MS pour le contenu en éléments mineurs et terres rares).

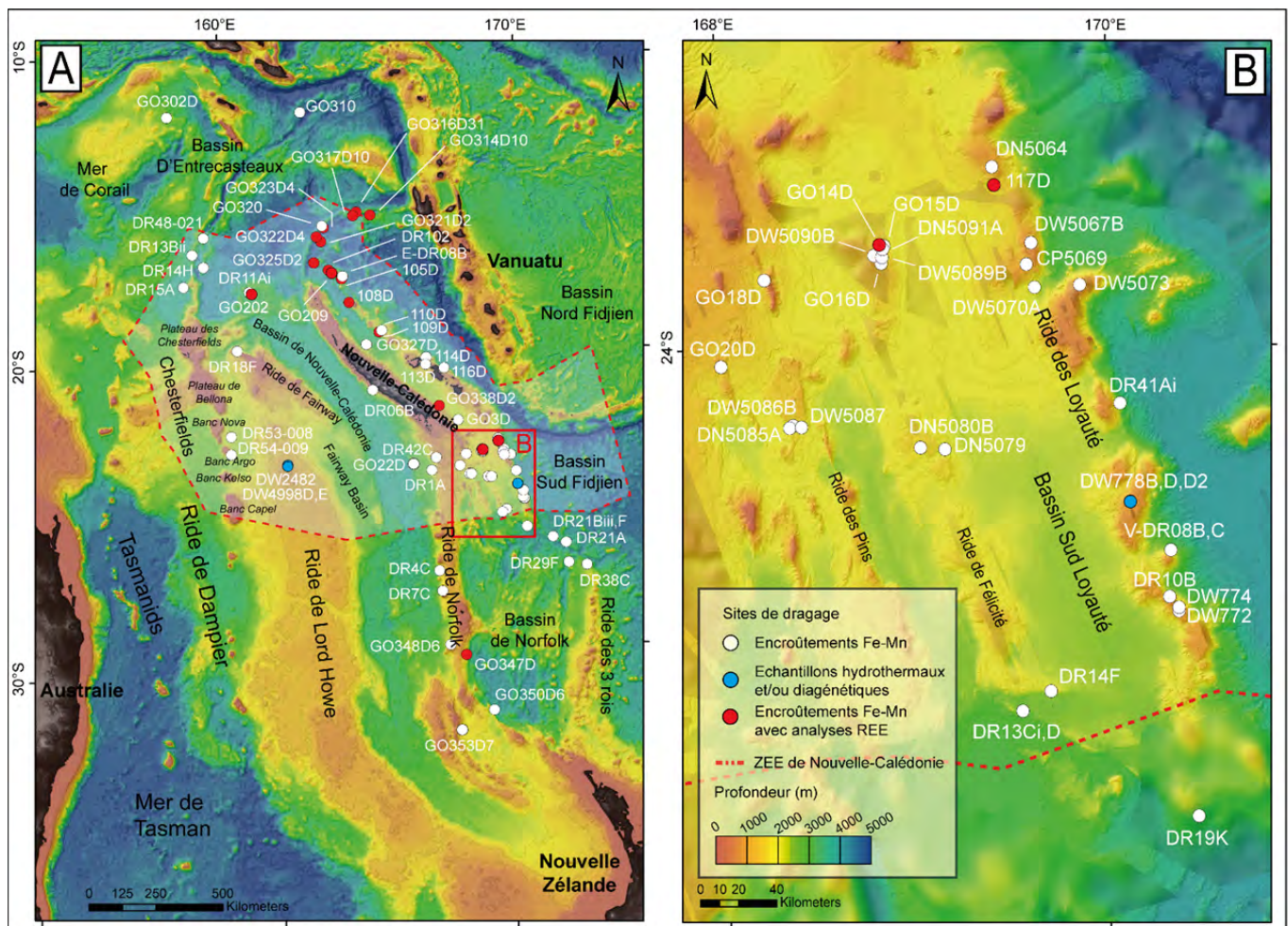


Figure 2. (A) Carte bathymétrique du Sud-Ouest Pacifique; (B) Carte bathymétrique du Sud-Est de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (tous les points représentent un site avec un encroûtement échantillonné).

Les encroûtements ferromanganésifères sont constitués d'une alternance d'oxydes de Mn (δ -MnO₂) et oxyhydroxydes de Fe amorphes accumulés sur un substrat induré à des vitesses extrêmement lentes (1-5 mm par million d'années). Les métaux traces et terre rares sont captés directement à partir de l'eau de mer lors de processus complexes d'oxydo-réduction (appelés "hydrogénés") et co-précipités avec les oxydes et oxyhydroxydes. Ces processus particulièrement efficaces dans l'accumulation métallifères sont à l'origine d'enrichissements allant jusqu'à 10⁹ par rapport aux concentrations observées dans l'eau de mer (notamment le Pt, Co, Ni, Te et Ce). Macroscopiquement, les encroûtements ferromanganésifères sont constitués d'une partie minéralisée appelée "cortex", déposée sur une roche appelée "substrat" (Figure 3). La partie basale du cortex, en contact avec le substrat, est plus ancienne que la partie sommitale récente, marquant le sens de dépôt et la polarité d'âge.

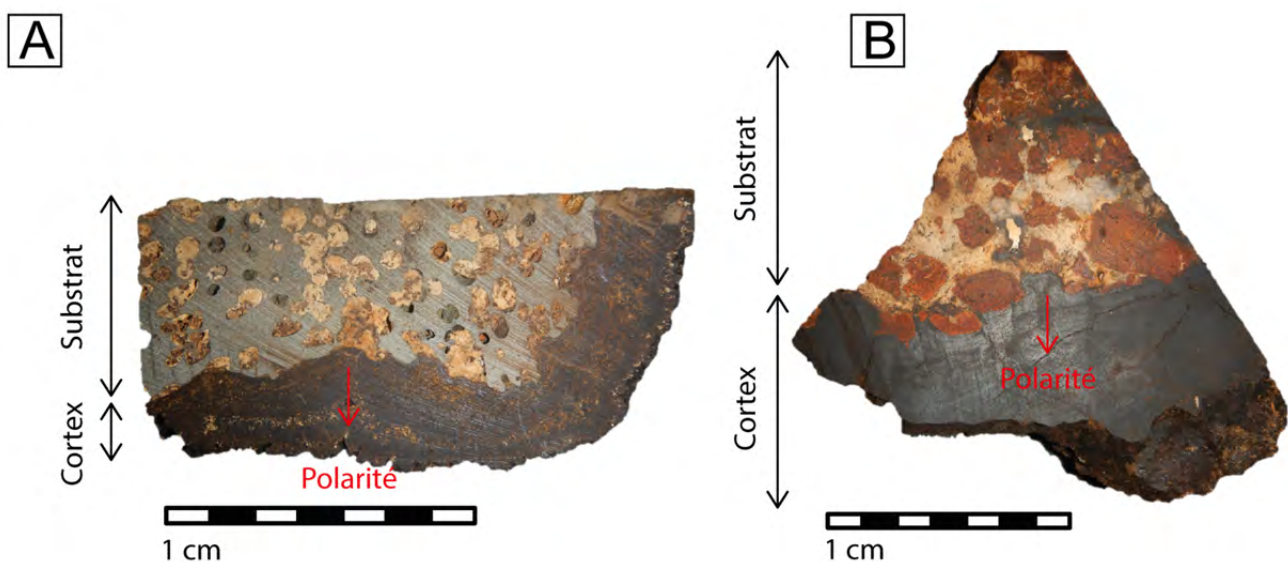


Figure 3. Exemples d'encroûtements ferromanganésifères sur (A) un basalte fortement vacuolaire et (B) une brèche hyaloclastique.

Les échantillons d'encroûtement ferromanganésifères hydrogénés de Nouvelle-Calédonie ont des épaisseurs variables allant de 2 mm à 115 mm, pour une moyenne de 27 mm. Certains échantillons ($n=9$) montrent des couches macroscopiquement discernables entre-elles, indiquant une variation des conditions de dépôt au cours du temps. Ces changements impliquent des modifications dans la dynamique de précipitation et les différentes couches ont ainsi été échantillonnées afin d'en observer les différentes compositions chimiques. Macroscopiquement tous les échantillons sont caractérisés par plusieurs textures

de croissance reflétant les conditions propres à l'environnement de dépôt et l'implication de la phase détritique (textures massives/laminées si peu de sédiment et courant fort, et textures colonnaires/dendritiques s'il y a présence de sédiments interstitiels lors de la précipitation). Des échantillons inhabituels avec des morphologies et des textures différentes des encroûtements hydrogénés ont été identifiés, indiquant que leur origine serait plutôt expliquée par la précipitation de fluides hydrothermaux et/ou diagénétiques.

Les analyses XRF et ICP-MS mettent en avant un enrichissement notable des encroûtements ferromanganésifères de Nouvelle-Calédonie en métaux de base, traces et terre rares. Les principales phases porteuses Mn et Fe ont respectivement des concentrations moyennes de 17,4% et 20,8%, avec un rapport Fe/Mn moyen de 1,26. Les éléments présentant le plus grand potentiel économique sont 4 188 ppm Co, 3 100 ppm Ni et 775 ppm Cu, avec comme autres éléments Mo, Nb, Zr, V, Zn, Ce, La, Nd et Y pouvant présenter un intérêt économique. Les minéralisations hydrothermales et/ou diagénétiques ont des compositions distinctes par rapport aux autres échantillons. Elles sont marquées par un fort fractionnement entre Fe et Mn (de 0,03 à 0,17), pour des concentrations moyennes respectives de 3,74% et 38,17%. Les éléments traces sont globalement appauvris, notamment Co, Mo, Nb, Zr, V, Zn, Ce, La, et Y. Certaines de ces minéralisations ont l'originalité de présenter une anomalie positive en Ni, pouvant atteindre des concentrations fortes (jusqu'à 0,7%).

Les encroûtements ferromanganésifères de Nouvelle-Calédonie sont dans les gammes de concentrations des minéralisations d'autres océans du globe. Les principaux éléments d'intérêt économique Co et Ni sont plus enrichis que dans les océans Indien (3 291 ppm et 2 563 ppm) et Atlantique (3 608 ppm et 2581 ppm), mais appauvris par rapport au Sud-Pacifique (6 167 ppm et 4 643 ppm) et Nord-Ouest Pacifique (6 655 ppm et 4 216 ppm). Les encroûtements de Nouvelle-Calédonie présentent un appauvrissement marqué en K, Ba, Rb et Terres rares par rapport aux autres océans, mais un enrichissement en Pb, Sr, V et Zn. A partir des cartes de répartition en éléments et des analyses chimiques et statistiques, il est possible de définir des zones présentant un intérêt économique notable en Co, Ni et Cu. C'est le cas de la partie Sud-Est de la ZEE où plusieurs clusters d'échantillons avec des concentrations élevées en métaux traces sont présents. Les monts sous-marins de la Ride des Loyauté, de la Ride de Norfolk et des rides situées entre les deux se prêtent particulièrement à de possibles futurs travaux exploratoires. Ces observations sont corroborées par des modèles de prédictivité d'encroûtement, effectués à l'échelle de la ZEE dans cette étude, à partir des données de bathymétrie et de réflectivité haute résolution. Ces modèles permettent de croiser plusieurs types de données spatialisées utiles dans la recherche d'encroûtement sur les fonds marins, et de proposer des cartes où les zones potentielles sont mises en avant. Lors de cette étude, ces modèles ont pu être comparés avec les vidéos d'engins submersibles prises lors de la campagne KANADEEP II, afin de tester leur robustesse à l'échelle d'un mont sous-marin. Il en ressort que les variations latérales des minéralisations sur le fond marin sont très fortes et difficilement modélisables avec le jeu de données actuel.

A l'avenir, de nouvelles campagnes océanographiques dédiées à l'étude des minéralisations profondes seront essentielles pour poursuivre le travail de caractérisation du potentiel en Nouvelle-Calédonie. Elles devront proposer une stratégie d'échantillonnage adaptée (ROV, carottage, dragage), l'acquisition de données bathymétriques et de réflectivité fine, et des propriétés physico-chimiques des masses d'eau au sein de la ZEE.

Table des matières

RESUME	1
RESUME ETENDU	4
TABLE DES MATIERES	10
1. RESSOURCES MINERALES MARINES	12
1.1. RESSOURCES MINERALES MARINES PROFONDES.....	13
1.1.1 <i>Nodules polymétalliques</i>	13
1.1.2 <i>Encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn)</i>	17
1.1.3 <i>Sulfures Massifs Hydrothermaux (SMS)</i>	21
1.2. ETAT DE L'EXPLORATION DES RESSOURCES PROFONDES DANS LE MONDE.....	23
1.2.1 <i>Cadre réglementaire</i>	23
1.2.2 <i>Nodules polymétalliques</i>	25
1.2.2.2 Exemple de la Zone de Clarion-Clipperton (CCZ).....	25
1.2.3 <i>Encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn)</i>	26
1.2.3.1 Exemple de la Pacific Prime Crust Zone (PCZ).....	26
1.2.4 <i>Sulfures hydrothermaux</i>	27
1.2.4.1 Exemple de Nautilus Minerals et du projet Solwara.....	27
3. LA NOUVELLE-CALEDONIE ET SA ZEE	30
3.1. CONTEXTE GEODYNAMIQUE.....	30
3.2. LA ZONE D'OXYGENE MINIMUM AU SEIN DE LA ZEE.....	32
4. DONNEES ET METHODES	35
4.1. DONNEES DE PRELEVEMENT.....	35
4.1.1 <i>Drague à roches</i>	35
4.1.2 <i>Échantillons de minéralisations sélectionnés</i>	36
4.1.3 <i>Le cas des nodules polymétalliques au Nord de la ZEE</i>	39
4.2. BATHYMETRIE ET IMAGERIE ACOUSTIQUE (REFLECTIVITE).....	40
4.3. METHODES D'ANALYSE CHIMIQUE.....	41
4.4. CHRONOLOGIE DES ETUDES SUR LES RESSOURCES PROFONDES DE NOUVELLE-CALEDONIE.....	42
4.4.1 <i>Campagnes océanographiques de l'ORSTOM (IRD)</i>	42

4.4.2	<i>Le programme ZoNéCo</i>	42
5.	RESULTATS	44
5.1.	CARACTERISTIQUES ET DESCRIPTIONS DES ECHANTILLONS	44
5.1.1	<i>Répartition au sein de la ZEE</i>	44
5.1.2	<i>Morphologie des encroûtements hydrogénés</i>	46
5.1.3	<i>Encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques</i>	50
i.	Dragage DW778	50
ii.	Dragage DW2482	51
5.2.	MINERALOGIE XRD ET MEB	54
5.2.1	<i>Diffraction des rayons X (XRD)</i>	54
5.2.2	<i>Microscope Electronique à Balayage (MEB)</i>	56
5.3.	GEOCHIMIE DES ECHANTILLONS	58
5.3.1	<i>Classification génétique des échantillons</i>	58
5.3.2	<i>Encroûtements hydrogénés</i>	61
5.3.3	<i>Encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques</i>	62
5.3.4	<i>Composition en Terre rares (REE)</i>	63
5.4	IMPACT DE LA PROFONDEUR SUR LES CONCENTRATIONS.....	64
5.5	CORRELATIONS STATISTIQUES DES ELEMENTS CHIMIQUES	66
5.5.1	<i>Matrice de corrélation</i>	66
5.5.2	<i>Analyse Factorielle</i>	66
5.5.3	<i>Classification ascendante hiérarchique des échantillons (CAH)</i>	72
5.6.	VITESSE DE CROISSANCE ET AGE DE DEBUT DE PRECIPITATION.....	77
5.7.	REPARTITION DES ELEMENTS ECONOMIQUES AU SEIN DE LA ZEE	79
6.	DISCUSSION	82
6.1.	COMPARAISON AVEC LES MINERALISATIONS D'AUTRES OCEANS	82
6.1.1	<i>Encroûtements hydrogénés</i>	82
6.2.1	<i>Minéralisations hydrothermales/diagénétiques</i>	85
6.2	COMPARAISON DES MODELES PREDICTIFS AVEC LES VIDEOS ROV.....	88
6.2.1	<i>Carte de prédictivité d'encroûtement</i>	88
6.2.2	<i>Comparaison avec les vidéos de fond ROV du mont D</i>	90
6.3.	NATURE DES MINERALISATIONS HYDROTHERMALES/DIAGENETIQUES	92
	CONCLUSION	93
	PERSPECTIVES	94
	REFERENCES	95
	ANNEXES	103

1. Ressources minérales marines

Les concentrations minérales et métallifères sont les conséquences de phénomènes géologiques communs (érosion, sédimentation, magmatisme et métamorphisme). Les gisements se forment dans un contexte géodynamique donné (rift, bassin, subduction, etc.), et leurs caractéristiques reflètent ce contexte. Inversement on peut remonter au cadre paléogéographique d'un gisement ancien grâce à ses caractéristiques. Ces principes s'appliquent également aux ressources minérales marines.

Dans le domaine marin, on distingue plusieurs types de ressources suivant les processus géologiques impliqués et la profondeur de formation. Les ressources de faibles profondeurs (< 300 m) regroupent les placers à minéraux lourds (Sn, Ti et Zr), les phosphates, les diamants, les sables et graviers, et les sels marins, dont certaines font déjà l'objet d'exploitation (ex : exploitation des placers à cassitérite en Malaisie). Les ressources minérales marines profondes sont constituées des minéralisations situées en grande profondeur (> 300 m), dont les 3 principales sont : les nodules polymétalliques, les encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn) et les sulfures massifs hydrothermaux [Dyment *et al.*, 2014].

La multiplication des campagnes marines scientifiques et privées pour l'exploration des ressources marines profondes, ainsi que les avancées dans la compréhension de la genèse de ces minéralisations, ont permis d'identifier des zones et contextes géodynamiques propices à la formation de ces dépôts (Figure 1). On retrouvera préférentiellement les sulfures massifs hydrothermaux au niveau des zones actives (dorsales océaniques, points chauds, arcs), les nodules polymétalliques en domaine de plaine abyssale et les encroûtements Fe-Mn sur des élévations topographiques (monts sous-marins, rides océaniques et continentales). A noter que d'autres ressources de grande profondeur existent également, comme les sédiments métallifères en Mer Rouge, les sédiments enrichis en terres rares, les hydrocarbures ou encore l'hydrogène naturel, mais qu'elles ne seront pas traitées dans ce rapport.

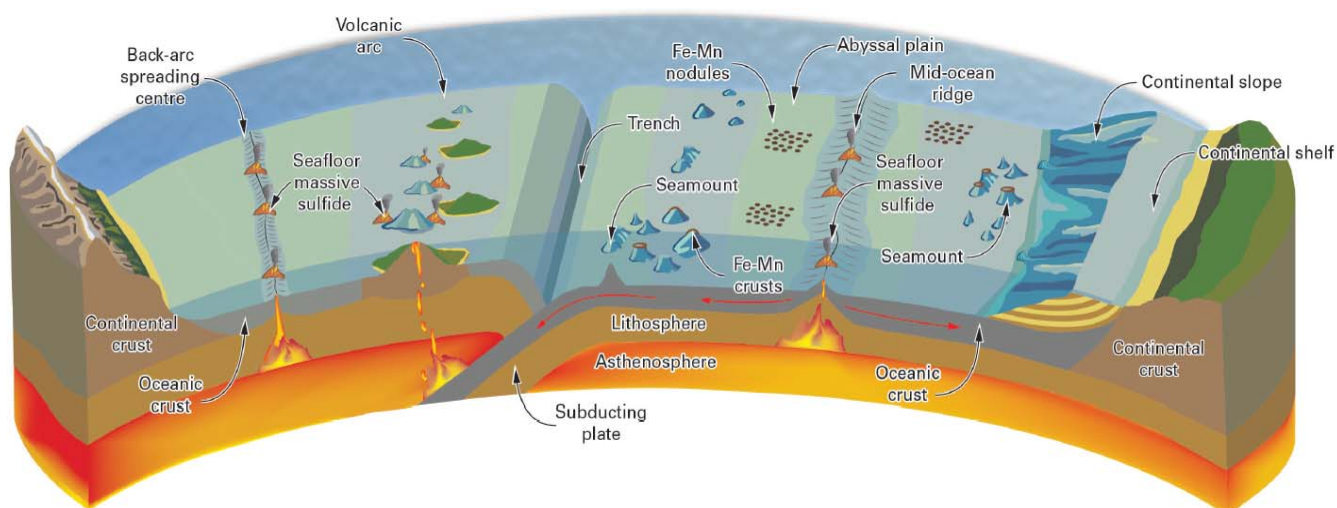


Figure 4. Coupe schématique de la croûte terrestre avec les différents contextes géodynamiques et les minéralisations marines profondes associées [Lusty *et al.*, 2018].

1.1. Ressources minérales marines profondes

1.1.1 Nodules polymétalliques

Les nodules polymétalliques sont composés d'oxydes et oxyhydroxydes de Fe et de Mn, déposés autour d'un nucleus (noyau) et présents préférentiellement dans les zones de plaines abyssales [Hein *et al.*, 2020; Kuhn *et al.*, 2017; Mizell and Hein, 2018]. Leurs tailles varient de quelques millimètres à une dizaine de centimètres de diamètre et peuvent présenter des teneurs en métaux rares et traces plutôt élevés. Les nodules sont regroupés entre l'interface eau-sédiment et les dix premiers centimètres de sédiment [Kuhn *et al.*, 2017], généralement sur un substrat meuble/peu consolidé. On retrouve des nodules dans toutes les mers du globe (Figure 5), à des profondeurs comprises entre 4 000 - 6 000 m, où le taux de sédimentation est inférieur à 20 mm/Kan [Hein and Koschinsky, 2014; Petersen *et al.*, 2016]. L'accumulation de métaux peut provenir de deux processus distincts suivant la position des nodules au sein de la tranche sédimentaire. Les métaux présents dans l'eau de mer peuvent former des particules colloïdales dans certaines conditions d'oxydation et s'accumuler sous forme de concrétions autour d'un nucléus, on parle de croissance "hydrogénétique" [Halbach and Puteanus, 1984; Hein and Koschinsky, 2014]. En conditions d'enfouissement ou de sub-surface, l'accumulation métallique se fait par remobilisation des éléments par les fluides interstitiels au sein du sédiment, on parle de croissance "diagénétique" [Hein *et al.*, 2020].

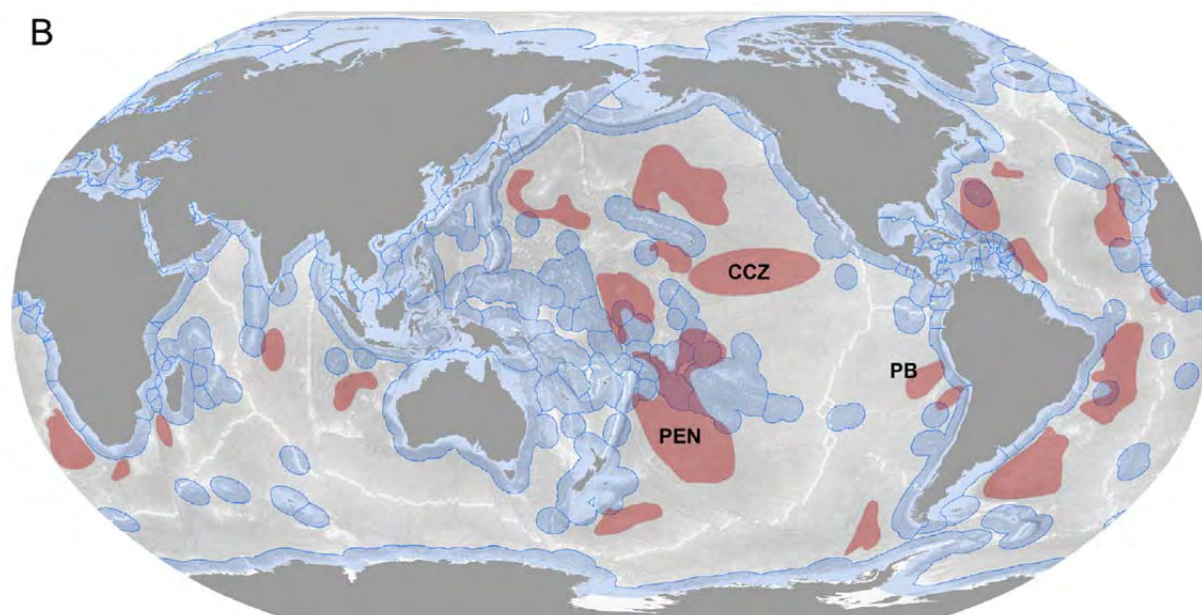


Figure 5. En rouge les zones avec le plus fort potentiel pour les nodules polymétalliques (morphologie du plancher océanique, âge de la croûte océanique, apport d'éléments, etc.); En bleu clair les zones économiques exclusives (ZEE) [Petersen *et al.*, 2016]; (CCZ : Clarion-Clipperton Zone, PB : Peru Basin, Pen : Penrhyn Basin).

Les nodules polymétalliques peuvent présenter de nombreuses formes suivant les processus de croissance impliqués, la nature du substrat ou la courantologie (les nodules peuvent être de forme sphéroïdale, ellipsoïdale, discoïdale, en "Chou-Fleur", en "multi-nodule", Figure 6). Chaque lamine d'oxydes et oxyhydroxydes de Fe et de Mn est caractérisée par une composition minéralogique et chimique

différente des autres, et est dépendante du processus de croissance principal au moment de la précipitation [Halbach and Puteanus, 1984; Halbach et al., 2017]. La profondeur de précipitation des nodules polymétalliques est majoritairement contrôlée par le fait d'être sous la CCD (*Carbonate Compensation Depth*), profondeur à laquelle les carbonates de calcium sont dissous. Sous la CCD, les sédiments sont quasi exclusivement composés de boues siliceuses enrichies en éléments détritiques et biogéniques. Cet environnement est favorable à la dégradation de la matière organique, à la présence de nucléus et à l'accumulation d'oxydes et oxyhydroxydes sous forme de lamines. A l'heure actuelle, les zones les mieux connues avec les concentrations les plus riches sont : la zone Clarion-Clipperton (CCZ) située dans l'océan Pacifique Central, le Bassin de Penrhyn près des îles Cook dans le Pacifique Sud, et le



Bassin du Pérou (Figure 5).

Figure 6. (Au-dessus) Forte abondance de nodules dans le bassin du Pérou, \pm 4 000 m; (A) Nodule hydrogénétique de forme sphéroïdale; (B) Nodule en « Chou-Fleur » du bassin du Pérou; (C) Nodule en forme de disque de la CCZ; (D) Nodule avec une face lisse et une rugueuse; (E) Petits nodules sphéroïdaux de la CCZ; (F) Section d'un nodule de la CCZ montrant les alternances de lamines concentriques [Kuhn et al., 2017].

L'environnement de dépôt au moment de la précipitation va également influencer les structures internes et la composition chimique des lamines autour du nucleus. A l'échelle microscopique, cela se traduit par différentes textures : dendritique, colonnaire, laminée ou encore massive (Figure 7).

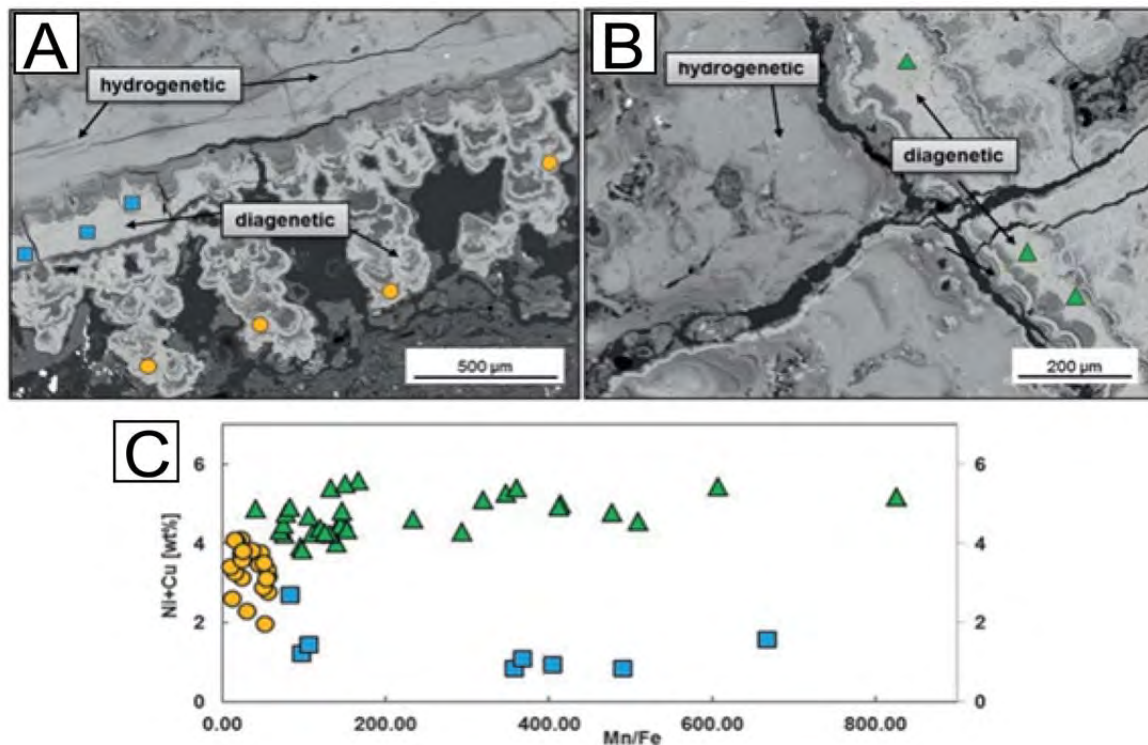


Figure 7. Images MEB de lamines hydrogénétique et diagénétique; **(A-B)** Alternance de lamines typiques des deux processus, présentant des textures dendritiques diagénétiques et massives hydrogénétiques (échantillons provenant de la CCZ); **(C)** Analyses chimiques associées aux différentes lamines [Kuhn et al., 2017; Wegorzewski and Kuhn, 2014].

La vitesse de croissance des nodules est aussi dépendante des processus de croissance. Pour une lamine purement hydrogénétique la vitesse se situe entre 1 à 5 mm/Ma [Koschinsky and Hein, 2003; Kuhn et al., 2017], et jusqu'à 250 mm/Ma pour une lamine diagénétique. La moyenne pour les nodules polymétalliques est de 10 à 20 mm/Ma avec des âges allant jusqu'à plusieurs millions d'années. La composition chimique des nodules est fonction du type de processus de croissance (hydrogénétique et/ou diagénétique), de l'environnement de dépôt (position géographique et profondeur dans la tranche d'eau) ainsi que de la vitesse de croissance [Hein et al., 2020; Kuhn et al., 2017]. Ainsi, les nodules diagénétiques seront définis par un rapport Fe/Mn < 1, et un enrichissement en Ni, Cu, Ba, Zn, Mo, Li et Ga. Les nodules hydrogénétiques auront plutôt un rapport Fe/Mn proche de 1, ainsi qu'un enrichissement en HFSE (Ti, REY, Zr, Nb, Ta, Hf) et en Co, Ce et Te. Dans la plupart des cas, les deux types de processus de croissance vont influencer sur la formation des nodules, avec une partie hydrogénétique en contact avec l'eau de mer et une partie diagénétique en contact avec le sédiment, on parlera de nodule mixte. Il existe également des cas particuliers où des phénomènes locaux d'hydrothermalisme, la présence d'hydrocarbure (Golfe de Cadix), ou encore des fluides provenant de failles peuvent influencer sur la composition chimique des nodules [Kuhn et al., 2017].

D'un point de vue caractéristiques physiques, les nodules ont une porosité moyenne comprise entre 25% et 61%, une densité humide de 1,99 g/cm³, une densité sèche de 1 à 2,4 g/cm³ et une surface spécifique

allant de 100 à 300 m²/g [Hein et al., 2013; Verlaan and Cronan, 2021]. Ces spécificités physiques particulières vont favoriser l'échange entre les nodules, l'eau de mer et le sédiment et favoriser l'accumulation de métaux.

Les éléments particuliers retrouvés dans les océans peuvent provenir de plusieurs sources : les fleuves transportant des produits d'érosion continentale, des particules atmosphériques riches en Fe et autres métaux (poussières volcaniques, désertiques et cosmiques), et des sources hydrothermales pouvant influencer localement la précipitation d'oxyhydroxydes de Fe-Mn (et de manière plus globale fournir un grand nombre d'éléments présents dans l'eau de mer). Dans le cas des nodules polymétalliques, des éléments peuvent également provenir d'une source biogénique issue de la dégradation des débris et coquilles d'organisme planctonique lors de la diagénèse. Toutes ces sources influent sur la précipitation des lamines d'oxyhydroxydes au cours du temps, ainsi que sur les processus de croissance impliqués et expliquent les fortes variations observées entre deux nodules différents.

On trouve à l'échelle des bassins océaniques des variations de composition qui nous renseignent sur le processus de formation majoritaire. Par exemple les nodules du bassin de Penrhyn dans l'océan Pacifique (Figure 8) ont des caractéristiques principalement hydrogénétiques (rapport Fe/Mn proche de 1, Co et HFSE enrichis), alors que le Bassin du Pérou montre des valeurs typiques d'un processus diagénétique (rapport Fe/Mn de 0,25, Mn enrichi et HFSE appauvris). Des cas intermédiaires comme la CCZ ou le

Element (units)	CCZ	CIOB	Peru Basin	Cook Islands-Penrhyn Basin
Iron/manganese ratio	0.22	0.21	0.25	0.96
Manganese (wt%)	28.4	24.4	34.2	16.9
Iron (wt%)	6.16	7.14	6.12	16.20
Nickel (wt%)	1.30	1.10	1.30	0.377
Copper (wt%)	1.070	1.040	0.599	0.231
Titanium (wt%)	0.320	0.420	0.160	1.280
Cobalt (wt%)	0.210	0.111	0.048	0.375
Molybdenum (ppm)	590	600	547	295
TREE (ppm)	717	931	334	1537
Vanadium (ppm)	445	497	431	504
Zirconium (ppm)	307	752	325	555
Thallium (ppm)	199	347	129	146
Lithium (ppm)	131	110	311	51
Yttrium (ppm)	96	108	69	141
Arsenic (ppm)	67	150	65	150
Tungsten (ppm)	62	92	75	59

Bassin Central Indien sont marqués par des compositions moyennes entre les deux pôles, marquant l'implication des deux processus dans la croissance des nodules [Hein et al., 2020].

Figure 8. Composition moyenne de différents champs noduleux (CCZ : Clarion-Clipperton Zone, CIOB : Central Indian Oceanic Basin) [Hein et al., 2020].

1.1.2 Encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn)

Les encroûtements Fe-Mn se forment par précipitation de particules colloïdales présentes dans l'eau de mer (processus hydrogénétiq ue) sur un substrat induré et sans sédiments. L'absence de sédiment dans l'environnement de dépôt implique que contrairement aux nodules polymétalliques, le processus de croissance diagénétique n'intervient pas dans la précipitation des encroûtements. La partie encroûtée (appelée le cortex) est composée de plusieurs générations de lamines d'oxydes de Mn et d'oxyhydroxydes de Fe et peut mesurer jusqu'à 25 cm d'épaisseur (bien que l'épaisseur moyenne soit plutôt comprise entre 20 et 50mm [Halbach et al., 2017; Verlaan and Cronan, 2021]). Les encroûtements sont présents sur l'ensemble des océans à des profondeurs allant de 400 m à 7 000 m, mais présentent les teneurs et épaisseurs les plus importantes entre 800 m et 3 000 m [Baturin and Dubinchuk, 2011; González et al., 2016; Halbach et al., 2017; Hein et al., 2017; Verlaan and Cronan, 2021; Zawadzki et al., 2018].

Les principaux environnements de dépôts sont les flancs/terrasses/sommets de monts sous-marins, les rides volcaniques submergées et les guyots (Figure 9). Ces élévations sont souvent sujettes à de forts courants limitant le dépôt de sédiments et garantissant la croissance des encroûtements parfois pendant plusieurs millions d'années. Les océans Indien et Atlantique contiennent moins d'encroûtements de par leurs plus faibles quantités de monts sous-marins que l'Océan Pacifique [Halbach et al., 2017]. Dans l'Océan Pacifique les encroûtements ont été trouvées sur de nombreux monts sous-marins, notamment à proximité des îles Hawaii, Tuvalu, Gilbert, Phoenix ou en Polynésie-Française [Verlaan and Cronan, 2021]. La PCZ (*Prime Crust Zone*) est située dans l'ouest Pacifique (Figure 9) et possède une croûte océanique très ancienne (+150 Ma), ainsi que les plus fortes concentrations chimiques d'encroûtements mesurées [Hein et al., 1987]. Ces spécificités font de cette zone le prospect le plus intéressant pour l'exploration des encroûtements Fe-Mn.

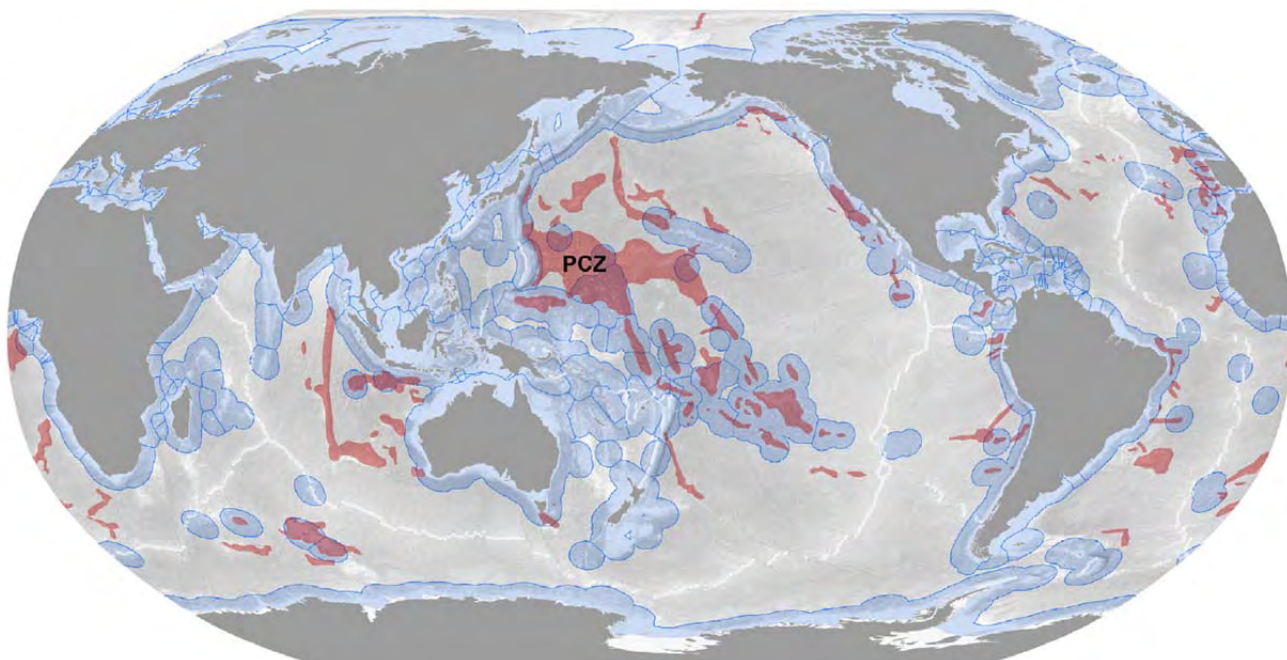
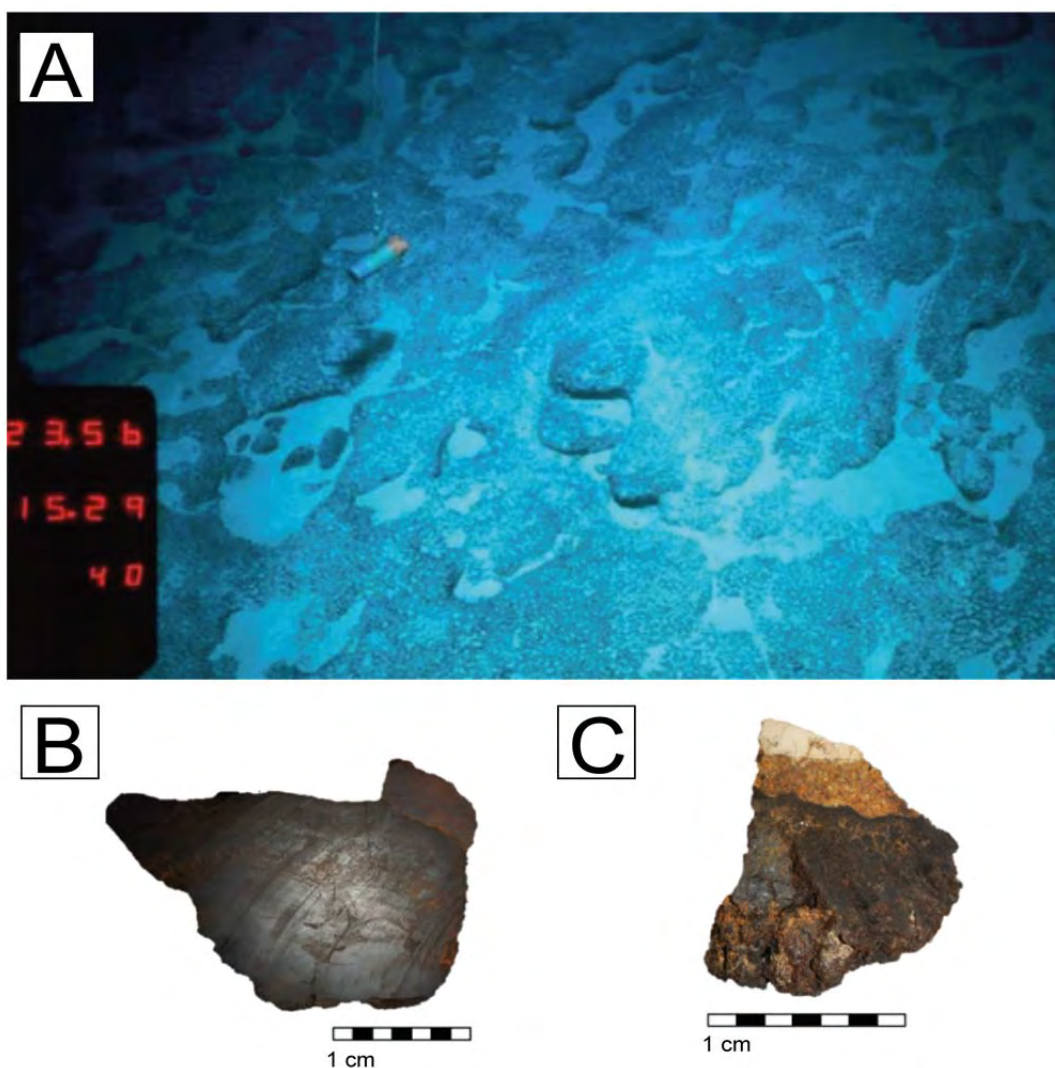


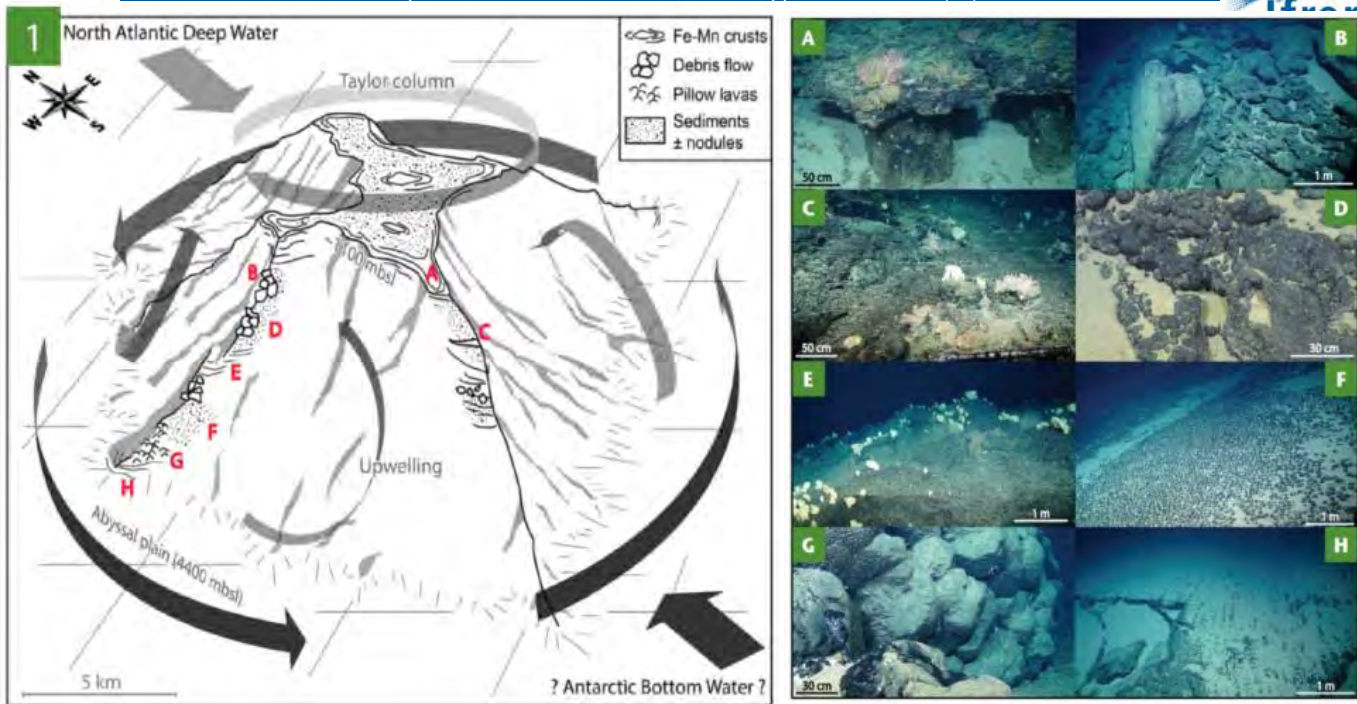
Figure 9. En rouge les zones avec le plus fort potentiel pour les encroûtements ferro-manganésifères (monts sous-marins/courantologie/substrat); En bleu clair les ZEE des différents pays [Petersen *et al.*, 2016] (PCZ : *Prime Zone for Crust*).

La morphologie et la composition des encroûtements est complexe et dépend de nombreux paramètres : forme et âge du mont sous-marin, courantologie, nature du substrat, âge de précipitation/vitesse de croissance, histoire tectonique et bio-productivité [Halbach *et al.*, 2017]. La surface des encroûtements est la résultante de la microtopographie du substrat sous-jacent (Figure 10), cette particularité explique la forte variabilité latérale d'épaisseur d'encroûtement observée à l'échelle d'un affleurement (blocs éparses, fractures, éboulement, etc.). Sous des conditions de fort courant la partie exposée directement au contact de l'eau de mer aura souvent un aspect botryoïdal (mamelonné), les botryoïdes allant du millimètre au



centimètre.

Figure 10. (A) Photo d'une dalle d'encroûtements Fe-Mn des Îles Marshall (5 m de côté, [Halbach *et al.*, 2017]); (B-C) Exemples d'encroûtement Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie (échelle : un carreau mesure 1 cm).

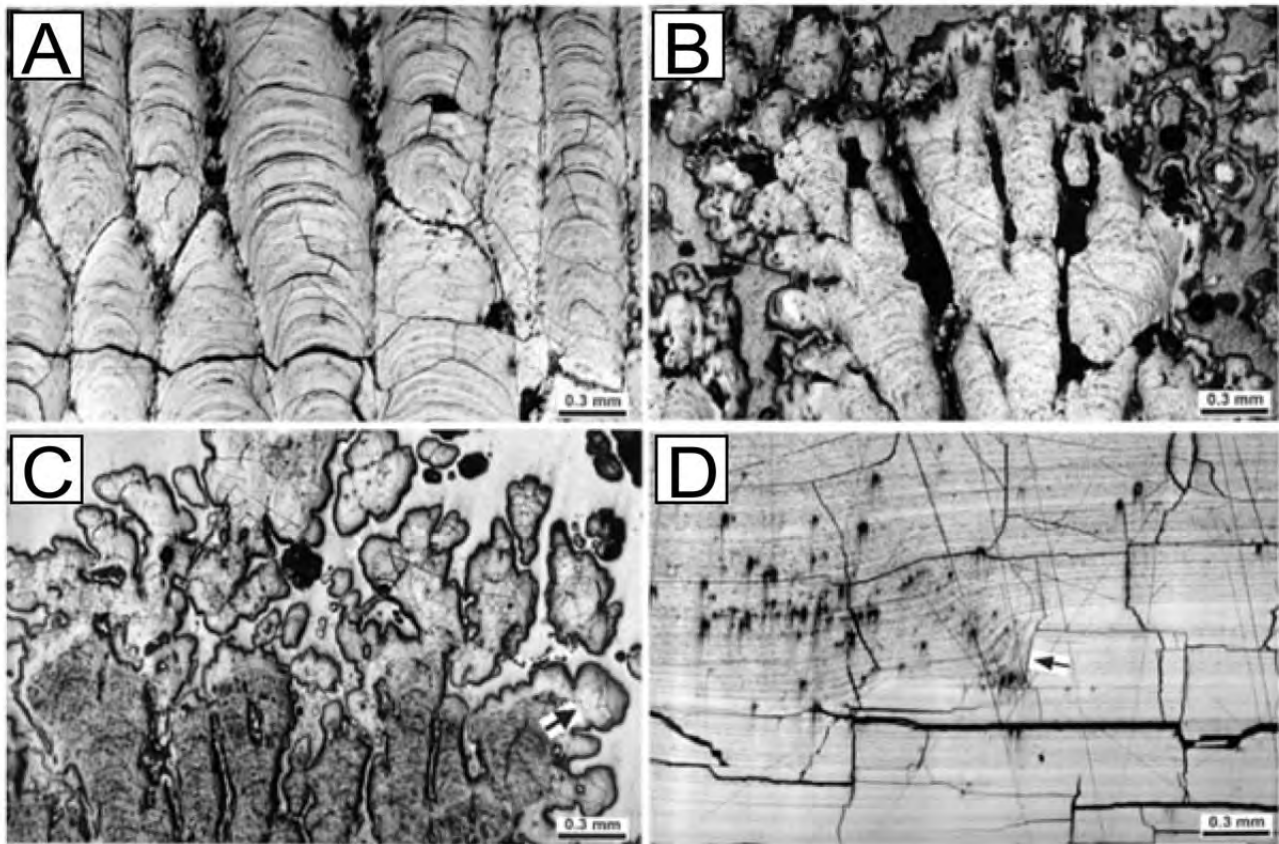


Les encroûtements en bordure des monts sous-marins (donc à l'abri du courant) vont croître moins vite et auront des textures plus poreuses et granuleuses [Hein et al., 1987; Hein et al., 2000]. Sur un même mont sous-marin, on peut observer des variations de faciès et de minéralisation importantes (zones de dalles continues, zone de blocs métriques encroûtés, zones de nodules, etc.). Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans le cadre d'une estimation de ressource (Figure 8).

Figure 11. Exemples de morphologie d'encroûtements observées sur le mont sous-marin Tropic (Océan Atlantique) résultant d'une dense campagne d'échantillonnage et de plongées; (1) schéma illustrant la localisation des différents faciès; A droite les photos associées au différents points : (A) Encroûtements sur un substrat de phosphorite en bord de plateau (1 150 m), (B) Eboulement recouvert d'encroûtement (1450 m), (C) Encroûtement avec débris biologiques sur une pente (1 600 m), (D) « Blocs » encroûtés avec présence de sédiment (3 772 m), (E) Dalles d'encroûtement sur une ride du mont sous-marin (3 330 m), (F) Champs de nodules dans une zone plus sédimentaire (3 640 m), (G) encroûtement sur des pillow lavas (3 800 m), (H) Encroûtements épais recouverts de sédiment (3 870 m) [Lusty et al., 2018].

L'accumulation de lamines d'oxyhydroxydes de Fe-Mn sur un substrat est un des phénomènes naturels les plus lents sur terre (1 à 5mm/Ma). Cette faible vitesse de croissance, couplée à une densité faible (1.3 g/cm³), à une forte porosité (60%), et à une surface spécifique très grande (350 m²/g), permettent aux encroûtements d'avoir un échange avec l'eau de mer important et de favoriser la captation/précipitation de métaux [Halbach et al., 2017; Hein et al., 2000; Lusty et al., 2018]. Ce phénomène de précipitation est particulièrement efficace sur certains métaux que l'on retrouve en grande quantité dans les encroûtements. Le Co, Mn, quelques REE et HFSE, Te et Ce peuvent être enrichis jusqu'à un facteur 9 par rapport à leurs concentrations dans l'eau de mer [Hein et al., 2000]. L'observation au microscope des lamines permet de retrouver des textures semblables à celles des nodules polymétalliques (principalement des textures colonnaires plus ou moins poreuses et des textures laminées, Figure 9). Les lamines claires sont généralement plus riches en Mn et les plus sombres en Fe et aluminosilicate. Les encroûtements sont constitués en majorité d'oxydes de Mn (δ -MnO₂), d'oxyhydroxydes de fer amorphes, ainsi que de minéraux

détritiques aluminosilicatés [Hein *et al.*, 2000]. Contrairement aux nodules polymétalliques, les éléments enrichis dans les encroûtements Fe-Mn sont Fe, Ca, P, Ti, Co, Pb, Ce, Pt, alors que Al, Si, Ni, Cu et Zn



seront plutôt appauvris. Les éléments présentant un intérêt économique sont principalement le Co qui peut atteindre des concentrations supérieures à 1%, et dans une moindre mesure Ni, généralement compris entre 0,2% et 0,5%. Les terres rares (REE) peuvent aussi être enrichies dans les encroûtements, avec des concentrations moyennes pouvant atteindre localement jusqu'à 0,7%. Le Pt et Te peuvent également être enrichis de manière non négligeable dans les encroûtements, avec respectivement des valeurs allant de 40 ppb à 3000 ppb, et 50 ppm à 205 ppm [Hein *et al.*, 2003; Koschinsky *et al.*, 2020].

Figure 12. Textures internes retrouvées dans les encroûtements Fe-Mn; (A) Texture colonnaire peu poreuse; (B-C) Texture colonnaire très poreuse (presque dendritique); (D) Texture laminée massive [Kim *et al.*, 2005].

Les enrichissements particulièrement importants concernent les éléments susceptibles de s'oxyder lors de leurs adsorptions à la surface des particules colloïdales [Koschinsky *et al.*, 2020]. Les réactions d'oxydo-réduction lors de l'adsorption du Co, Ce, Pt ou Te, marquent le changement du degré d'oxydation de ces éléments (Co^{2+} en Co^{3+} , Ce^{3+} en Ce^{4+} , Te^{4+} en Te^{6+}) et renforcent la capacité de capter d'autres ions présents dans l'eau de mer. La profondeur de précipitation est également primordiale dans la composition des encroûtements. La répartition des concentrations en métaux dissous le long de la tranche d'eau n'est pas homogène et présente des maximums autour de certaines profondeurs suivant les éléments. Par exemple, les éléments Mn, Co et Ni ont tendance à être fortement enrichis autour de 1 000 m de

profondeur, puis à décroître avec l'augmentation de la profondeur. Ce maximum proche des 1 000 m s'explique par la présence de la Zone d'Oxygène Minimum (OMZ), réservoir de métaux dissous issus des strates supérieures de la tranche d'eau qui va permettre d'alimenter le phénomène de précipitation hydrogénétique au niveau des monts sous-marins proches de cette couche.

1.1.3 Sulfures Massifs Hydrothermaux (SMS)

Les sulfures massifs hydrothermaux se développent dans des contextes géologiquement actifs, là où les échanges entre la croûte profonde et l'océan sont importants (Figure 13). En profondeur, la présence d'une chambre magmatique est à l'origine d'un gradient géothermique fort, et coïncide souvent avec une intense fracturation des roches sus-jacentes (Figure 14). L'eau de mer, pauvre en métaux et froide, s'engouffre dans le réseau de fractures et se réchauffe lors de sa descente. Les roches encaissantes sont lessivées par l'eau de mer (fixation du magnésium dans les minéraux néogènes) qui s'acidifie fortement et capte les métaux sous forme de composés chlorés. Par convection, l'eau de mer chaude et chargée en éléments remonte jusqu'à la surface, une partie précipitant sur place sous forme de sulfures, le reste étant dispersé dans le panache hydrothermal. La circulation de l'eau de mer à travers les roches océaniques est un phénomène majeur de dissipation de la chaleur provenant des dorsales et à plus grande échelle du manteau (Figure 14). Des approches quantitatives estiment que la quantité d'eau traversant chaque année les roches océaniques sont de $1,3 \cdot 10^{12}$ à $9 \cdot 10^{12}$ tonnes, dissipant au passage une quantité de chaleur comprise entre $36 \cdot 10^{15}$ et $44 \cdot 10^{15}$ kcal [Dyment *et al.*, 2014]. L'activité hydrothermale est fondamentale dans le processus de transport et de formation d'amas de sulfures massifs. Plusieurs gisements de classes mondiales exploités aujourd'hui sur terre sont d'anciens SMS et présentent des fortes concentrations en Cu, Zn, Ag et Au. En mer, les dépôts de sulfures sont situés à des profondeurs comprises entre 800 m et 5 000 m dans tous les océans, avec un regroupement des sites d'intérêt économique entre 800 m et 3 500 m. Plusieurs environnements de dépôt sont distingués en fonction de l'activité hydrothermale et de la spécificité géodynamique : les dorsales lentes, les dorsales rapides, les bassins d'arrière-arc et les volcans intraplaques. Chacun de ces environnements de dépôt présente des caractéristiques propres en fonction du taux d'expansion, de la nature du volcanisme et de la morphologie du système de fracture.

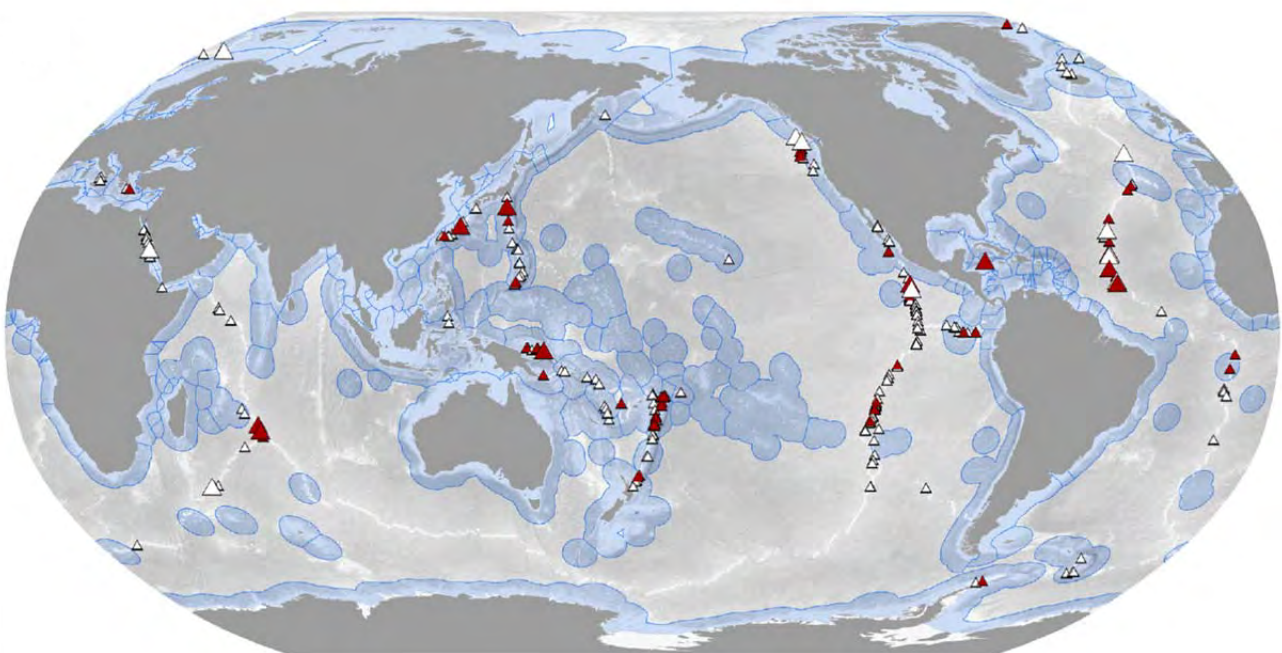
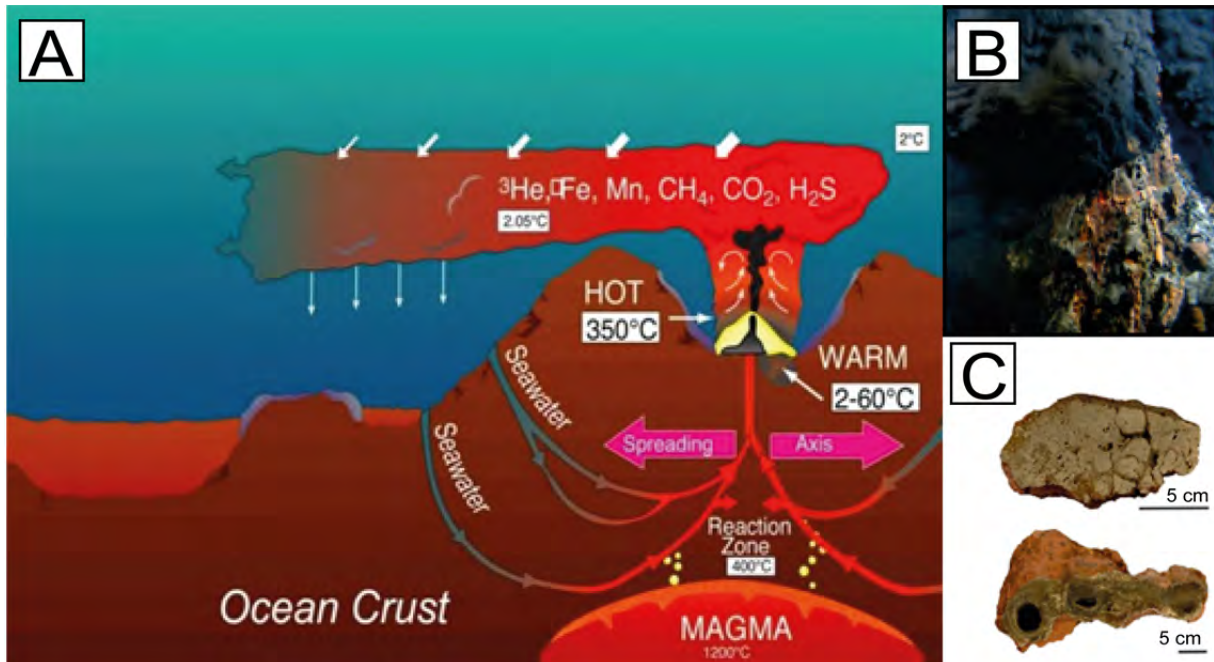


Figure 13. Localisation des SMS connus de haute température. Les triangles rouges indiquent les dépôts



économiquement intéressants (> 5 wt% Cu, > 15 wt% Zn, ou > 5 ppm Au) et les symboles de grande taille indiquant les occurrences avec un tonnage estimé supérieur à 1 millions de tonnes [Petersen et al., 2016].

Figure 14. (A) Schéma simplifié d'une dorsale océanique et du panache hydrothermal associé (source : Schmidt Ocean Institute); (B-C) cheminée et sulfures massifs de la Ride Océanique Atlantique, 3000 m [Lusty et al., 2018].

On distingue deux grands types de dépôts hydrothermaux :

- Les minéralisations enrichies en Zn appelées "White Smoker", avec comme minéraux principaux la pyrite, sphalérite, anhydrite, barytine et la silice amorphe. Ces dépôts sont dans la plupart des cas dépourvus de Cu et peuvent présenter des anomalies positives en Pb, Ag, Cd, Sb ou Ge ;
- Les minéralisations enrichies en Cu, indiquant une haute température de formation (> 300°C), appelées "Black Smoker". Les principaux minéraux sont zonés entre le centre du conduit où la température de formation est > 300°C (chalcopyrite, isocubanite et pyrrhotite) et l'extérieur où elle est < 250°C (pyrite, sphalérite et anhydrite). Des anomalies positives en Ni, Co, Mo ou Se peuvent également être rencontrées dans ce type de dépôt.

En termes de morphologie, les SMS se présentent sous forme de dômes avec des cheminées actives à leurs sommets. Le cycle de formation, destruction et remaniement de ces cheminées est à l'origine de l'accumulation en grande quantité de sulfures. Des estimations récentes proposent pour l'ensemble des sites hydrothermaux actifs connus un tonnage de 650 Mt de sulfures, contenant 10 Mt de Cu, 29 Mt de Zn, 1 Mt de Pb, 33 Mkg de Ag et 750 t d' Au [Hannington et al., 2011; Hannington et al., 2005]. La nature du substrat, l'environnement géodynamique, la profondeur de dépôt ou encore le type de manifestation

hydrothermale jouent un rôle crucial sur la composition chimique et minéralogique des SMS, et expliquent les variations drastiques observées entre les sites. Ainsi, on retrouve des associations d'éléments comme Cu, Zn et Ag au niveau des dorsales rapides (ex : Pacifique) résultant de l'interaction de l'eau de mer et des basaltes, ou encore Cu, Zn, Co et Au pour des dorsales lentes (ex : Atlantique) avec une interaction de l'eau de mer sur un substrat mantellique.

Plusieurs méthodes permettent de dater les dépôts et leurs vitesses de croissance, c'est notamment le cas des méthodes isotopiques U/Th, U/Pb ou encore $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$. Les sites hydrothermaux se forment sur des échelles de temps court (quelques milliers d'années) avec des taux de croissance rapide. Un ensemble d'une dizaine de fumeurs noirs de 2 cm de diamètre expulsant un fluide minéralisé avec 100 ppm de métaux à 2 m/s, produit 250 tonnes de sulfures métalliques par an [Dyment *et al.*, 2014]. Un champ de fumeurs noirs peut contenir plus de cinquante cheminées dont la durée de vie s'étale jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années. Les quantités accumulées pour un tel champ sont de l'ordre de 15 millions de tonnes de sulfures tous les 1 000 ans, avec des monts pouvant dépasser 70 m de haut et s'étaler sur plusieurs centaines de mètres de diamètre (par exemple le site hydrothermal de TAG en Atlantique [Dyment *et al.*, 2014]).

1.2. Etat de l'exploration des ressources profondes dans le monde

1.2.1 Cadre réglementaire

L'exploration et l'exploitation des ressources marines profondes sont encadrées par des réglementations et conventions internationales. La localisation des ressources par rapport au continent contraint le type de législation à appliquer (au sein de l'espace maritime d'un pays (Zone Economique Exclusive et plateau continental), ou en zones internationales appelées "La Zone").

La Convention des Nations-Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM), ou *United Nations Convention on the Law Of the Sea* (UNCLOS), est un traité international signé en 1982 à Montego Bay (Jamaïque) qui régit les droits et activités des parties prenantes au sein des espaces maritimes, et dans les zones de grands fonds au-delà des juridictions nationales.

Cette convention garantit l'existence d'espaces marins de la côte vers le large (200 miles nautiques) appelés "Zones Economiques Exclusive", où les états côtiers peuvent exercer des droits souverains (exploration et exploitation des ressources naturelles, biologiques et non biologiques). Les eaux internationales, leurs fonds marins et leurs ressources, sont considérées comme patrimoine commun de l'humanité et ne peuvent donc pas être revendiquées par un Etat. En 2016, la Convention comptait 167 parties (la France a ratifié la convention en 1996), à noter que les Etats Unies, Israël, et la Turquie ne l'ont pas ratifiée.

La ratification de cette convention a donné naissance à plusieurs entités chargées de faire appliquer les règles du CNUDM et de contrôler les activités menées en eaux internationales :

- L'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) ou *International Seabed Authority* (ISA) : L'AIFM est une organisation autonome internationale établie à Kingston (Jamaïque) depuis 1994 (date d'application du CNUDM). C'est par le biais de cette organisation que les états membres du CNUDM administrent et contrôlent les activités de prospection en eaux internationales. L'AIFM est aussi chargée de garantir la protection des environnements marins des possibles effets néfastes des activités de prospection profonde ;

- La Commission des Limites du Plateau Continental (CLPC) : La CLPC traite les demandes d'extension de délimitation du plateau continental des états côtiers. Il est en effet possible aux états côtiers d'étendre la zone maritime sous leur juridiction au-delà des 200 milles marins suivant certains « critères d'extension » définis par la CLPC (jusqu'à 350 milles marins vers la haute mer) ;
- Le Tribunal International du Droit de la Mer (TIDM) : Le TIDM est un organe judiciaire indépendant composé de 21 membres, compétent pour tous les différends relatifs à l'interprétation ou à l'application de la CNUDM (source : ITLOS).

En Nouvelle-Calédonie, c'est la loi organique n° 99-209 du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-Calédonie qui répartit les compétences entre l'Etat et la Nouvelle-Calédonie. L'article 22 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. »

« (...) 11°. La réglementation relative aux hydrocarbures, au nickel, au chrome, au cobalt et aux éléments des terres rares. »

La Nouvelle-Calédonie est donc compétente pour mener l'exploration et l'exploitation au sein de sa ZEE. Cependant le code minier actuel de Nouvelle-Calédonie "Nickel-Chrome-Cobalt" n'encadre pas les activités dans la ZEE.

Depuis sa création, l'AIFM a accordé au total 31 permis d'exploration pour l'ensemble des ressources marines minérales profondes (19 pour les nodules, 7 pour les sulfures massifs et 5 pour les encroûtements). La majorité des contrats pour les nodules est située dans l'Océan Pacifique au sein de la *Clarion-Clipperton Zone* (CCZ), couvrant une surface totale de 1,171 millions de km². Les 5 permis d'exploration pour les encroûtements Fe-Mn sont situés dans l'Océan Pacifique à l'est de la Fosse des Mariannes (PCZ) et dans l'Océan Atlantique sur la Ride de Rio Grande, représentant chacun une surface de 3 000 km². 7 permis pour les sulfures massifs ont été accordés depuis 2011 dans les océans Atlantique et Indien, pour une surface totale de 10 000 km² chacun [*Petersen et al.*, 2016].

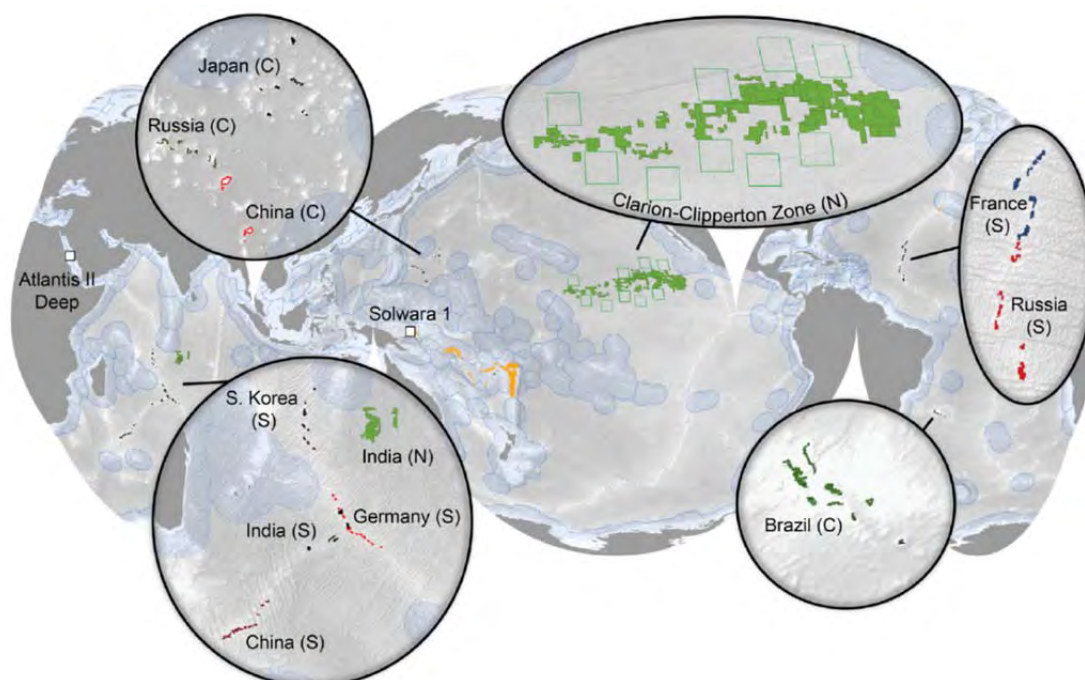


Figure 15. Localisation des permis d'exploration délivrés par l'AIFM, (N) pour les nodules polymétalliques, (C) pour les encroûtements ferro-manganésifères et (S) pour les sulfures massifs hydrothermaux [Petersen et al., 2016].

Parmi les 22 contracteurs de permis d'exploration, 3 sont des entités gouvernementales et les 19 autres sont des groupes privés soutenus par un état. Depuis 2011, il est possible pour une entreprise désirent mener des actions de prospection au-delà des juridictions nationales, de s'allier à un état pour obtenir un permis. Par exemple, *UK Seabed Resources Ltd* qui a obtenu en 2016 un permis d'exploration pour les nodules polymétalliques de la CCZ et en fait une filiale du groupe américain *Lockheed Martin*, première entreprise mondiale de défense et de sécurité, lié avec l'Angleterre (source : AIFM).

Tous les titulaires d'un permis d'exploration doivent restituer un rapport annuel faisant état des activités de prospection menées sur leurs prospects. Les contracteurs sont également dans l'obligation d'employer et de mettre en place des programmes de formation pour le personnel local issu des pays partenaires (source : AIFM). L'exploration au sein des zones économiques exclusives (ZEE) des pays ne relève pas de l'AIFM, donc les informations disponibles ne sont pas toujours rendues publiques. Cependant, certains pays comme la Corée du Sud, la France, le Japon ou la Norvège entreprennent des travaux d'exploration avancés dans leur ZEE respectives [Petersen et al., 2016].

1.2.2 Nodules polymétalliques

1.2.2.2 Exemple de la Zone de Clarion-Clipperton (CCZ)

La zone la plus prospective et avec le plus fort potentiel d'exploitation des nodules polymétalliques est située dans l'Océan Pacifique, en face du Mexique, entre les fractures de Clarion et Clipperton (CCZ). Cette zone, dont la surface est estimée à plus de 9 millions de km², est une plaine abyssale dont la profondeur varie entre 4 000 m et 5 000 m, et où la densité et la richesse en métaux des nodules polymétalliques est la plus forte. On estime la quantité de nodules sur l'ensemble de la CCZ à 21.1 Gt, soit 44 Mt de Co, 5 992 Mt de Mn, ou encore 4.2 Mt de Ti (Figure 16, [Hein et al., 2020]).

Element	Total CCZ nodule resource ^a (× 10 ⁶ tons)	Global terrestrial reserve base ^b (× 10 ⁶ tons)	Global terrestrial resource ^c (× 10 ⁶ tons)	Example metal uses
Manganese	5,992	5,200	ND	Steel, batteries
Nickel	274	150	ND	Stainless steel, superalloys, wind turbines, batteries
Copper	226	1,000	5,600	Electrical, electronic, most high-tech products
Titanium	67	900	1,200	Aerospace, superalloys
Cobalt	44	13	ND	Batteries, superalloys, electromagnets
TREE	15.1	128	ND	Turbines, high-tech smartphones etc.
Molybdenum	12	19	25.4	Steel for strength and hardness
Vanadium	9.4	38	~63	Steel alloys, jet engines
Zirconium	6.5	77	ND	Nuclear industry
Thallium	4.2	0.0007	0.65	Photoresistors, infrared optics
Lithium	2.8	11	62	Batteries, aircraft
Yttrium	2.0	0.6	ND	Red phosphor for televisions
Arsenic	1.4	1.6	ND	Semiconductors
Tungsten	1.3	6.3	ND	High-strength steel, superalloys, electrodes
Tellurium	0.08	0.05	ND	Solar cells, superalloys

Figure 16. Comparaison entre les ressources en nodules de la CCZ avec les ressources/réserves terrestres mondiales (la troisième colonne prend en compte les ressources sub-économique) [Hein et al., 2020; Hein et al., 2013].

Les estimations présentées en Figure 16 sont faites à partir de plusieurs milliers de prélèvements et permettent de donner la mesure de la quantité de métaux présents dans les fonds marins, et du potentiel que pourrait avoir ne serait-ce qu'un site d'exploitation limité à une zone du Pacifique. Plusieurs états/compagnies sont bien avancés dans la caractérisation de leurs prospects sur la CCZ. Par exemple, la société Canadienne *The Metals Company* (anciennement *DeepGreen*) a publié en septembre 2018 un rapport technique normé NI 43-101 faisant l'état de ressources inférés de 909 Mt de nodules titrant à 1.3% Ni, 29.2% Mn, 1.1% Cu et 0.2% Co pour une abondance moyenne de 13 kg/m² (cut-off à 4 kg/m²) sur son projet "NORI" (ce qui représente assez de métaux pour 140 millions de véhicules électriques, source : *The Metals Company*). Une phase d'exploitation serait donc envisageable dans les prochaines années, si les problématiques liées à l'environnement et à la faune profonde sont résolues.

1.2.3 Encroûtements ferromanganésifères (Fe-Mn)

1.2.3.1 Exemple de la Pacific Prime Crust Zone (PCZ)

La PCZ (*Prime Crust Zone*) est la zone avec le plus fort potentiel d'exploitation pour les encroûtements (Figure 17). Elle est située dans l'Océan Pacifique à l'est de la Fosse des Mariannes et regroupe plusieurs monts sous-marins de grande taille d'âge Jurassique/Crétacé. L'âge de ces monts sous-marins est un point clé dans l'épaisseur des encroûtements qui les recouvrent (1 mm à 260 mm, [Hein et al., 2000]) et dans les fortes concentrations en métaux économiques (Mn, Co, Ni, Cu, REE et Pt). Plusieurs campagnes d'échantillonnage et études sur cette zone ont permis d'estimer la quantité d'encroûtements à 7 533 Mt sèches, soit : 1 718 Mt de Mn, 50 Mt de Co, 87 Mt de Ti, 0.45 Mt de Te et 20 Mt de REE [Hein et al., 2013].

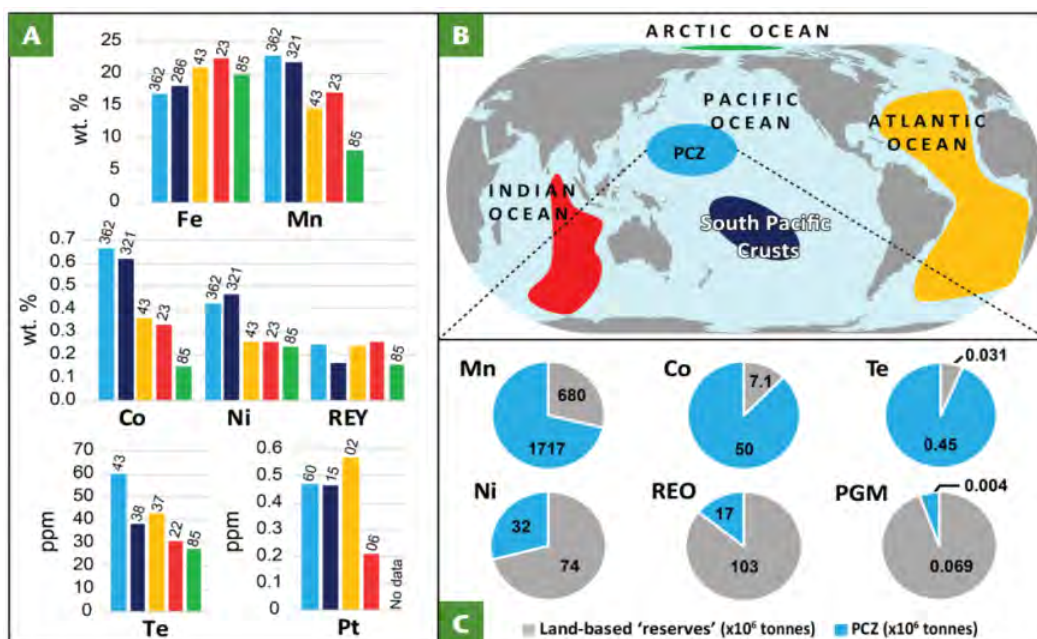


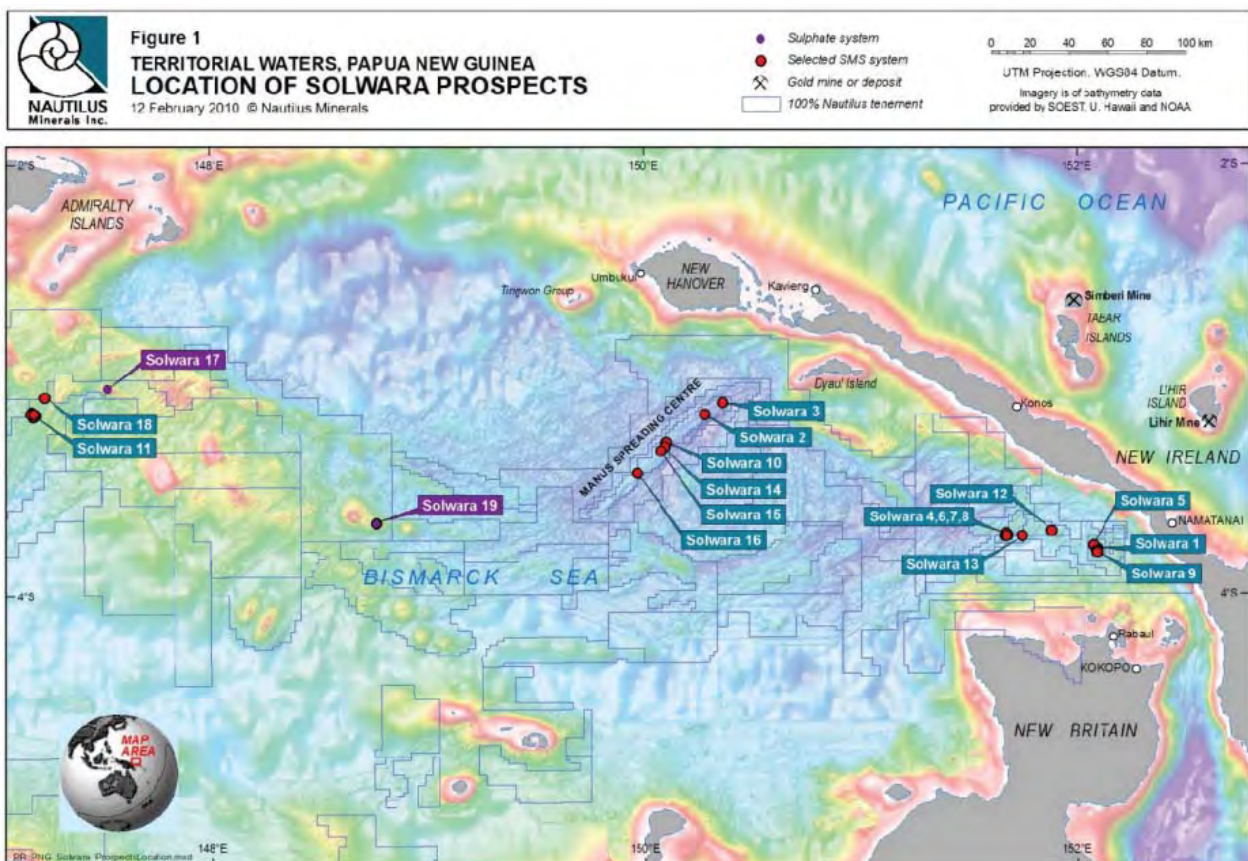
Figure 17. (A-B) Distribution des teneurs en métaux de plusieurs zones riches en encroûtements; **(C)** Comparaison entre les réserves terrestres mondiales et les ressources estimées de la PCZ pour certains éléments [Hein et al., 2013; Lusty et al., 2018].

Rien que dans la PCZ, les ressources en certains métaux sont largement supérieures aux réserves mondiales (2,5 fois plus de Mn, 7 fois plus de Co ou encore 14 fois plus de Te). Les problématiques liées à l'exploitation des encroûtements restent grandes (moyens techniques, récupération, impact environnemental, séparation du substrat), mais plusieurs idées commencent à émerger avec la progression des connaissances de ces systèmes et les avancées technologiques.

1.2.4 Sulfures hydrothermaux

1.2.4.1 Exemple de Nautilus Minerals et du projet Solwara

Les sulfures massifs hydrothermaux (SMS) ont fait l'objet d'intenses recherches lors des dernières décennies et sont les minéralisations marines profondes les mieux connues, et les plus prometteuses (fortes concentrations en métaux de base : Cu, Zn et Pb, et en métaux précieux : Ag et Au, et aussi parfois



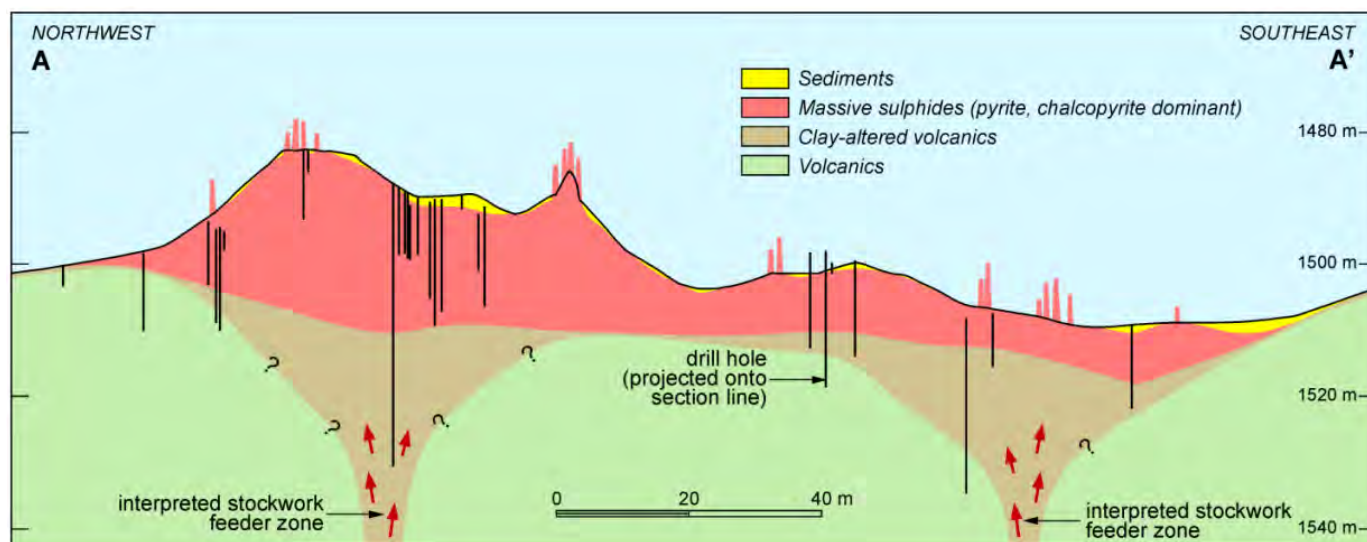
en métaux traces : Se, Ge, etc). Aujourd'hui, il est possible de définir les conditions rendant un dépôt de SMS économiquement exploitable suivant plusieurs conditions : des fortes concentrations en métaux de base (particulièrement Cu et Zn), un enrichissement en métaux précieux (Ag et Au), une proximité entre les

gisements et la côte, une profondeur d'eau de préférence inférieure à 2 000 m et la présence de plusieurs sites inactifs sur une même zone.

Figure 18. Localisation des sites hydrothermaux du prospect de Solwara en Mer de Bismarck, Papouasie Nouvelle-Guinée [White et al., 2011].

Les SMS sont les seules ressources avec un projet d'exploitation ayant été envisagé et porté au stade de pré-exploitation. C'est la société *Nautilus Minerals Inc* qui a débuté en 2005 des travaux de prospection en Mer de Bismarck avec pour objectifs de découvrir des sites hydrothermaux inactifs et d'en estimer le potentiel. *Nautilus Minerals* a identifié une série de 17 édifices volcaniques sous-marins s'étendant en échelon le long de la Ride de Manus (Figure 18). Ces édifices sont des sites de fortes activités hydrothermales associées au dépôt de sulfures massifs hydrothermaux. La précipitation de métaux se fait sous forme de cheminées allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de haut et plusieurs mètres de diamètre. C'est le processus continu de création, arrêt et écroulement des cheminées qui est à l'origine des accumulations observées sur le site de Solwara 1.

Une première phase d'exploration en 2007 a permis d'identifier trois zones de fortes teneurs à une profondeur d'environ 1 500 m et s'étirant latéralement sur une centaine de mètres. Ces zones minéralisées



sont encaissées dans des roches volcaniques et volcano-clastiques du type andésite à rhyolite et sont couvertes d'une couche de sédiment pluri-métrique. Le modèle géologique, défini par la société *Golder Associates* chargée de l'estimation des ressources, propose quatre formations principales subhorizontales avec : 1) à la base un socle volcanique sain, 2) une unité sus-jacente similaire, mais présentant une altération et une minéralisation plus ou moins marquée, 3) Les sulfures massifs et 4) les sédiments plus ou moins indurés (Figure 19).

Figure 19. Coupe transversale d'une des zones minéralisées du projet Solwara 1.

Les ressources ont été calculées à partir de forages carottés espacés de moins de 10 m à plus de 50 m sur la zone minéralisée, et d'échantillons récoltés directement à la surface lors de plongées ROV. Les résultats

des estimations sont donnés dans le tableau Figure 20. Les estimations répondent à la norme canadienne NI 43-101 utilisée dans l'industrie minière pour assurer la fiabilité des données. Les ressources sont présentées soit avec la dénomination "Inférées", indiquant que l'estimation est fondée sur des renseignements et un échantillonnage restreint, soit avec la dénomination "Indiquées", indiquant que l'estimation est fondée sur des renseignements détaillés et fiables relativement à l'exploration et aux mesures.

Les ressources indiquées (celles avec la plus grande fiabilité) ne sont calculées que pour la formation des sulfures massifs, les données dans les autres unités ne répondant pas au standard pour les classer en

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
	Inferred	Chimney	80	11	17	170	6
		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
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

ressources indiquées. L'estimation fait l'état de (Figure 20) :

- 0,91 Mt de sulfures massifs titrant à 7,7% Cu, 5,4 g/t Au, 24 g/t Ag et 0,4% Zn ;
- Des ressources inférées total de 1,365 Mt titrant à 8,8% Cu, 6,9 g/t Au, 36 g/t Ag et 0.9% Zn.

Figure 20. Ressources estimées pour le prospect de Solwara 1 avec un cut-off à 4% Cu.

En 2018, *Nautilus Minerals* a connu plusieurs revers majeurs. Le retrait du projet de la multinationale *Anglo American*, la vente du bateau censé permettre l'extraction à un groupe Indien par le constructeur chinois *Fujian Mawei Shipbuilding*, ainsi que les nombreuses revendications de la population locale quant aux problèmes environnementaux d'une telle exploitation, poussèrent *Nautilus Minerals* à arrêter le projet Solwara en 2019. L'arrêt du projet après un tel niveau d'investissement laissa la Papouasie Nouvelle-Guinée, actionnaire à 15% du projet, avec des dettes estimées à 157 millions de dollars. En 2019, plusieurs permis d'exploration ont été acquis par la société *Deep Sea Mining Finance* (joint-venture entre *USM Holdings Limited* et *MB Holding Company LLC*) au Tonga et en Papouasie Nouvelle-Guinée, dont le projet Solwara 1, laissant entrevoir une reprise possible des activités dans les années à venir.

3. La Nouvelle-Calédonie et sa ZEE

3.1. Contexte géodynamique

La Nouvelle-Calédonie est un territoire Français situé dans le Sud-Ouest Pacifique, à environ 2 000 km à l'Est de l'Australie. Sa ZEE et son plateau continental étendu couvrent une surface de plus de 1 470 000 km², et comprennent des îles, des rides continentales et océaniques, une zone de subduction active, des anciens volcans de points chauds et l'un des complexes ophiolitiques le plus vaste sur terre [Cluzel et al., 2012; Patriat et al., 2018]. La physiographie actuelle du Sud-Ouest Pacifique résulte d'une histoire géologique complexe, impliquant l'ouverture et la fermeture successive de bassins depuis la fragmentation du supercontinent Gondwana au Mésozoïque [Cluzel et al., 2010; Collot et al., 2020; Mortimer et al., 2008]. D'Ouest en Est, on trouve plusieurs rides continentales : la Ride de Dampier, La Ride de Lord Howe, la Ride de Fairway et la Ride de Norfolk (Figure 21).

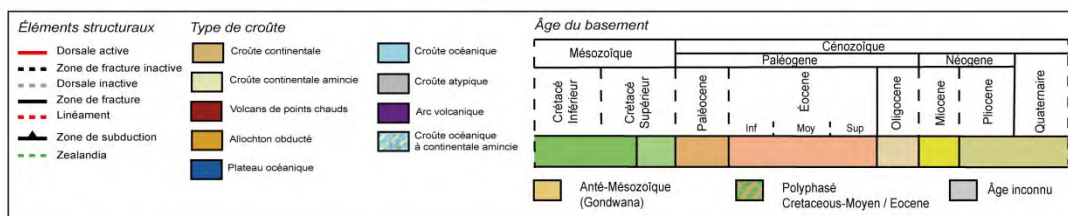
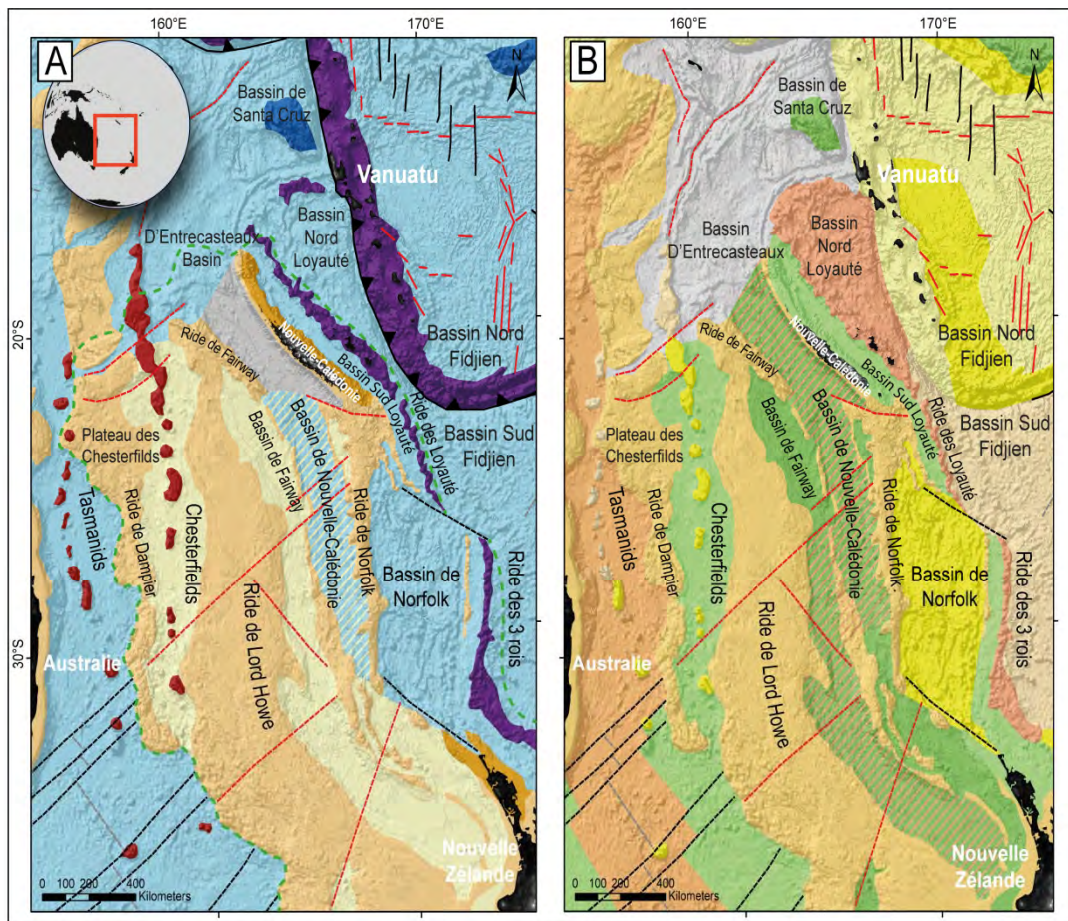


Figure 21. (A) Nature du socle de la zone SW Pacifique (d'après [Collot et al., 2020]); **(B)** Age du socle de la zone SW Pacifique (d'après [Collot et al., 2020]).

Ces rides sont séparées par le Bassin de Fairway, le Bassin de Nouvelle Calédonie et le Bassin Sud Loyauté, faisant toutes parties du continent submergé *Zealandia* (Figure 21A) [Mortimer et al., 2017]. Les affleurements Anté- Mésozoïque à Crétacé inférieur retrouvés en Nouvelle-Calédonie, en Australie et en Nouvelle-Zélande attestent de la présence d'une ancienne zone de subduction (proche de celle des Andes) le long de la marge Est du Gondwana allant de 260 à 110 Ma [Collot, 2009; Maurizot et al., 2020c; Mortimer et al., 2008]. Un changement dans le régime tectonique, passant de la convergence à l'extension, le long de la marge Est du *Gondwana* (110-100 Ma) entraîne la fragmentation et le morcellement de *Zealandia* et du *Gondwana* [Gaina et al., 1998; Maurizot et al., 2020b; Rouillard et al., 2017]. Cette phase d'extension se termine à l'Eocène inférieur et marque l'arrêt de l'ouverture océanique de la Mer de Tasman, ainsi que le développement de l'évènement régional TECTA (*Tectonic Event of the Cenozoic in the Tasman Area*) qui va durer jusqu'à l'Oligocène [Collot et al., 2008; Sutherland et al., 2017; Sutherland et al., 2020]. Cet évènement est caractérisé par une phase de déformation et de contraction des bassins, par un épisode de volcanisme qui a fortement marqué la partie Nord de *Zealandia* (formant la majeure partie de la physiographie actuelle de cette zone), et par un épisode terminal d'obduction de la nappe de péridotites sur la Nouvelle-Calédonie [Cluzel et al., 2001; Maurizot et al., 2020d; Patriat et al., 2018]. L'origine de cet évènement est probablement en lien avec l'initiation d'une zone de subduction le long de la marge Est de *Zealandia*, dont la vergence et la chronologie restent débattus [Collot et al., 2020]. Du fait du manque d'échantillons provenant de la Ride des Loyauté, sa nature exacte reste discutée, bien qu'un consensus veuille que cette ride soit associée à un arc d'âge Eocène à Miocène en lien avec cette zone de subduction [Maurizot et al., 2020a].

Les autres structures autour de la Nouvelle-Calédonie comme la Ride des Pins et le Bassin de Nouvelle-Calédonie ont aussi été formées au cours de cet évènement Éocène [Collot et al., 2017; Hackney et al., 2012; Patriat et al., 2018]. Le Néogène est marqué par une phase d'extension causant l'ouverture des bassins d'arrière-arc de Norfolk, Sud et Nord Fidjien [Sdrolias et al., 2003]. Un intense volcanisme intraplaque a affecté la région lors de cette période, entraînant notamment la mise en place de la chaîne des monts sous-marins de la Ride de Lord Howe (Chesterfield) et plusieurs monts sous-marins et guyots isolés [Etienne et al., 2021; Mortimer and Scott, 2020; Tournadour et al., 2021; Van de Beuque et al., 1998]. Le Miocène moyen est également marqué par l'initiation de la zone de subduction du Vanuatu à vergence Nord-Est le long de la fosse de Vitiaz, et de son *roll-back* jusqu'à sa position actuelle [Collot et al., 2020; Etienne et al., 2021]. La subduction de la plaque Australienne sous l'arc du Vanuatu est à l'origine de la flexure de la lithosphère plongeante, provoquant le soulèvement et l'extension des îles Loyautés et du Sud de la Grande Terre [Dubois et al., 1974; Sevin et al., 2020].

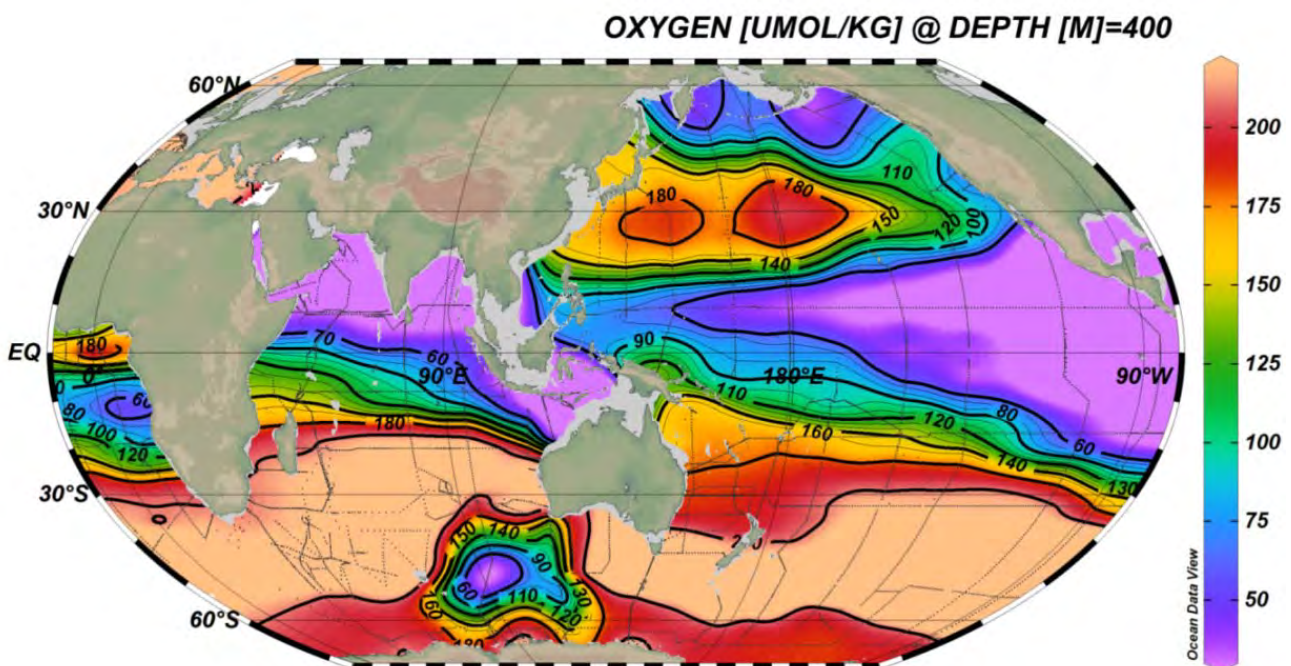
La complexité et la grande diversité des contextes géologiques rencontrés dans la zone Sud-Ouest Pacifique, et plus particulièrement au sein de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, offrent des environnements originaux pour la formation de ressources minérales marines profondes. La ZEE de Nouvelle-Calédonie s'étend sur plus de 1 470 000 km² avec environ 661 500 km² dont la profondeur est inférieure à 2 500 m, et 808 500 km² dont la profondeur est supérieure à 2 500 m. Cette caractéristique nous indique que 45% de la ZEE de Nouvelle-Calédonie est comprise dans des gammes bathymétriques potentiellement intéressantes pour les encroûtements Fe-Mn, avec un potentiel d'autant plus fort sur les différents édifices géologiques profonds (rides des Loyauté, de Lord Howe, Ride de Fairway, Ride de Norfolk et Chesterfield). La présence de bassins profonds (> 3 500 m) comme celui de Nouvelle-Calédonie, d'Entrecasteaux, ou encore Nord-Loyauté, laisse supposer l'existence de possibles ressources en nodules polymétalliques au sein de la ZEE (bien que les surfaces concernées soient relativement faibles). Également, les zones à

proximité de la fosse du Vanuatu et des îles de Matthew-Hunter, zones de fortes activités volcaniques, pourraient renfermer des ressources en sulfures massifs hydrothermaux.

3.2. La zone d'oxygène minimum au sein de la ZEE

Plusieurs études ont montrées le rôle essentiel de la Zone d'Oxygène Minimum (OMZ) dans le stockage et la précipitation des particules colloïdales sous forme d'oxydes et oxyhydroxydes de Fe et Mn [Halbach et al., 2017; Hein and Koschinsky, 2014]. Les éléments présents dans leur état réduit au sein de l'OMZ vont s'oxyder et s'accumuler sur un substrat lors de leur rencontre avec des eaux profondes chargées en oxygène (Upwelling). Suivant les caractéristiques régionales et locales (courants, activités biologiques, apports terrigènes, etc.), la profondeur de l'OMZ peut fortement varier (généralement comprise entre 500 m et 1 500 m). Les OMZ sont présentes le long des marges Est océaniques, au niveau des faibles latitudes du Pacifique et de l'Atlantique, et également en mer d'Arabie et au Golfe du Bengale. Elles sont définies par des concentrations en oxygène dissous comprises entre 0 $\mu\text{mol/l}$ et 40 $\mu\text{mol/l}$ selon les zones, les auteurs et les processus considérés.

La proximité de la Gyre Sud Pacifique, grand tourbillon d'eau formé par la force de Coriolis, riche en oxygène du fait de l'intense circulation qui y règne, explique les fortes valeurs d'oxygène dissous en Ouest



Pacifique (Figure 22). Les courants étant plus lents en bordure des gyres, notamment sur les bordures Est des océans, le renouvellement de ces eaux en est fortement réduit. Ce faible renouvellement, combiné à une productivité élevée en surface, entraîne la formation de régions où la quantité d'oxygène dissous est très faible.

Figure 22. Mesures d'oxygène dissous des prélèvements d'eau à 400 m de profondeur ($\mu\text{mol/kg}$) [Schlitzer, 2021].

Dans le secteur Ouest Pacifique et à proximité de la Nouvelle-Calédonie, les valeurs d'oxygène dissous en sub-surface (400 m) sont élevées (160 $\mu\text{mol/l}$ à 220 $\mu\text{mol/l}$). Plusieurs données sont disponibles afin de représenter les variations des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer à plus grande profondeur :

- La *World Ocean Database* (WOD) qui regroupe plusieurs millions de mesures faites sur l'ensemble des océans (salinité, température, oxygène, etc.) ;
- Les données acquises lors des campagnes marines du *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE), qui centralisent également de nombreuses mesures depuis les années 1990 (mesures de surface, courant, stations profondes, etc.).

Les données de la Nouvelle-Calédonie et de sa ZEE ont été représentées grâce au logiciel *Ocean Data View* [Schlitzer, 2021]. Ce visualisateur de données permet d'afficher les mesures océanographiques dans l'espace, sous forme de transect, de sections ou d'iso-surfaces de valeur à une profondeur donnée. Les sections A, B, C et D illustrent les variations des mesures d'oxygène dissous (en $\mu\text{mol/l}$) en fonction de la profondeur. Les valeurs des sections A et B sont des mesures issues du WOCE sur des profondeurs de 0 m à 5 000+ m, les valeurs des sections C et D sont obtenues à partir du WOD sur des profondeurs de 0 m à 1 400 m. De manière générale, sur l'ensemble des sections les valeurs les plus basses d'oxygène dissous sont comprises entre 1 100 m et 4 000 m. En surface (0 m à 100 m) les valeurs sont élevées (200 $\mu\text{mol/l}$ à 220+ $\mu\text{mol/l}$), alors que de 200 m à 1 000 m elles sont plutôt moyennes et stables entre 190 $\mu\text{mol/l}$ et 180 $\mu\text{mol/l}$. Dans les sections Ouest-Est au Nord de la Grande Terre (Figure 23B,C), on peut voir que les reliefs sous-marins ont peu d'influences sur les valeurs (continuité des valeurs sur le transect). Entre 0 m et 1 000 m, on distingue cependant des zonations locales de plus fortes valeurs, probablement en lien avec les zones de plus fortes activités sus-jacentes. La même tendance est observée sur la section D au sud de la Grande Terre, avec néanmoins une zone de plus faibles valeurs (150 $\mu\text{mol/l}$ à 170 $\mu\text{mol/l}$) entre 400 m et 1 000 m de profondeur (Figure 23).

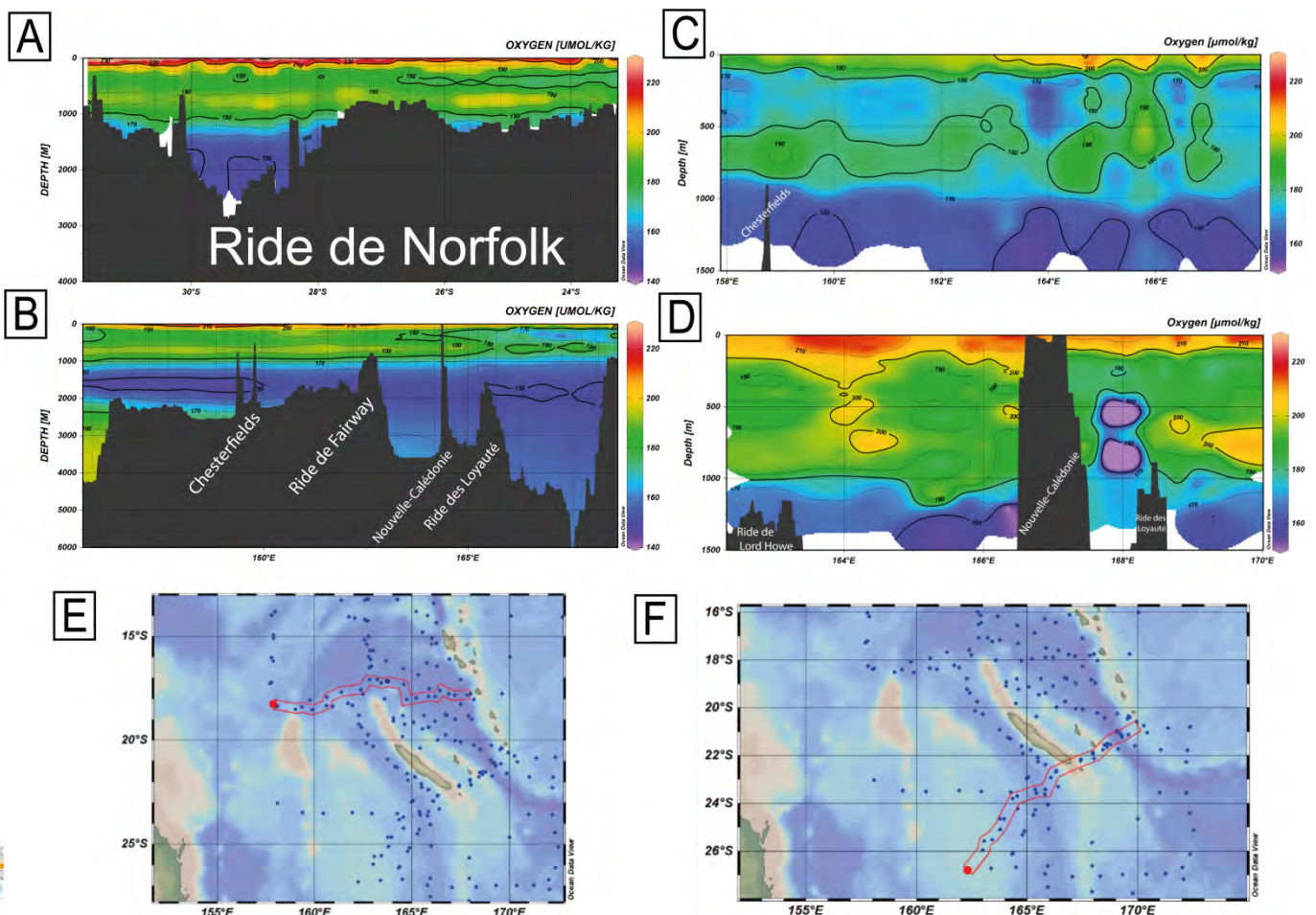


Figure 23. (A-D) Sections des valeurs en oxygène dissous dans l'eau de mer en fonction de la profondeur; **(E-F)** Localisation des tracés pour les sections C et D (respectivement E et F) [Schlitzer, 2021].

Ces faibles valeurs pourraient être expliquées par le phénomène de *downwelling* présent sur la partie Sud de la côte Est, marquant la descente d'eaux plus faibles en oxygène dissous provenant du Jet Sud Fidjien. Les valeurs en oxygène dissous au sein de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie sont globalement élevées, même en profondeur. Il est donc délicat de parler d'un phénomène d'OMZ dans la région, cependant les valeurs les plus faibles sont quand même comprises dans des gammes bathymétriques propices à la présence d'encroûtements (entre 1 000 m et 2 500 m). L'apport d'eaux faibles en oxygène dissous au niveau de la Ride des Loyauté, ainsi qu'un fort courant pourrait en faire un environnement propice au développement d'encroûtements Fe-Mn.

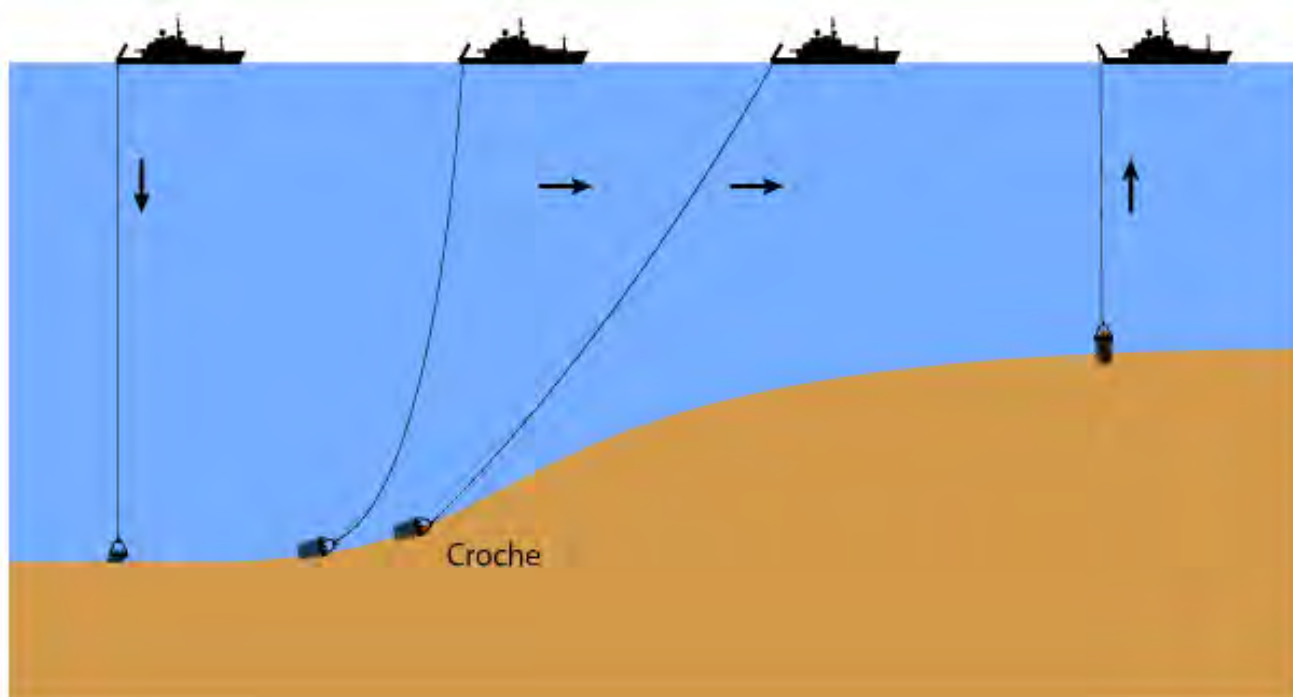
4. Données et Méthodes

4.1. Données de prélèvement

4.1.1 Drague à roches

L'ensemble des échantillons provient de dragages à roches fait au sein ou à proximité de la ZEE de Nouvelle-Calédonie. Le dragage de roches sur les fonds marins est un outil peu onéreux et efficace dans la caractérisation de la diversité géologique d'une zone. Cette méthode consiste à trainer une drague métallique à roches composée d'une nasse métallique pour extraire du fond marin les roches qu'elle rencontre (source : IFREMER).

La drague peut être utilisée sur des profondeurs allant de la centaine de mètres à plusieurs milliers de



mètres (suivant la longueur du câble et la dimension du navire). Pour ce faire, elle est descendue depuis le navire jusqu'au fond à une vitesse de 1 m/s, puis trainée lentement sur le fond pendant plusieurs dizaines de minutes. La tension sur le câble reliant la drague au navire permet de connaître en temps réel la position de la drague par rapport au fond marin. Lorsque le tensiomètre enregistre une forte tension provoquée par le contact avec un relief rocheux sous-marin, on parle de "croche" (Figure 24).

Figure 24. Schéma du fonctionnement d'une drague à roches (source : Université de Montpellier).

La tension sur le câble peut alors augmenter rapidement jusqu'à atteindre des valeurs comprises entre 2 à 20 tonnes. En utilisant la vitesse du courant, la profondeur d'eau, la longueur et la tension du câble, la position et la vitesse du bateau ainsi que la vitesse du vent, il est possible d'estimer le trajet qu'a suivi la drague. Malgré tout, l'incertitude sur la position de prélèvement des échantillons est un problème majeur de cette méthode.

4.1.2 Échantillons de minéralisations sélectionnés

Au total 104 échantillons de minéralisations Fe-Mn, parmi 3 326 références dans la géodatabase du SGNC (Figure 25), ont été sélectionnés pour analyse XRD/XRF (l'ensemble des talons d'échantillons sont disponibles au SGNC, seau 2021 P. STASZAK, dock SGNC Doniambo). La Table 1 regroupe les noms d'échantillons ainsi que les informations de localisation. Les échantillons de minéralisations Fe-Mn choisis proviennent de campagnes marines à but biologique ou géologique : BATHUS III, EBISCO, ECOSAT, EVA, GEORSTOM I, GEORSTOM II, GEORSTOM III, ECOSAT, ECOSAT III, IPOD, KANADEEP, KANADEEP II, et VESPA. Parmi toutes ces campagnes, seuls certains échantillons des campagnes GEORSTOM I, II, III et EVA avaient déjà fait l'objet d'analyses chimiques, le reste des échantillons provient de campagnes en mer récentes (après 2010) n'ayant jamais fait l'objet de description, ni d'analyse.

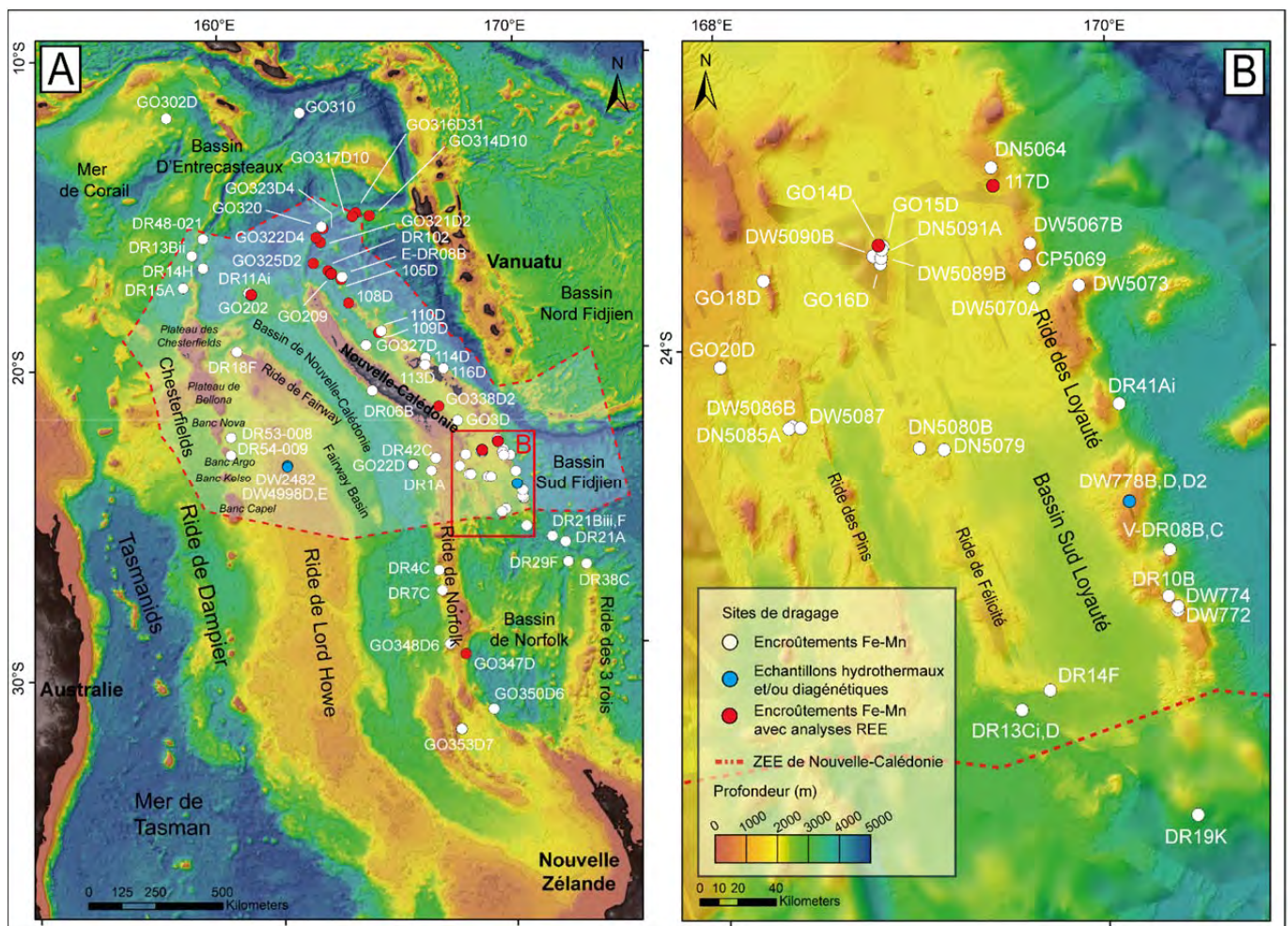


Figure 25. (A) Bathymétrie de la zone SW Pacifique avec localisation des échantillons; **(B)** Zoom au Sud-Est de la ZEE (en blanc les encroûtements hydrogénés, en bleu les minéralisations hydrothermales et/ ou diagénétiques et en rouge les échantillons analysés à l'ICP-MS).

Table 1. Noms et informations de localisation des 104 échantillons de minéralisations Fe-Mn.

Échantillon	Type	Épaisseur moyenne (mm)	Latitude	Longitude	Profondeur (m)	Campagne	Lithologie simplifié
DW772	Bulk	5	-25,2167	170,3670	902	BATHUS III	∅
DW774	Bulk	2	-25,2000	170,3670	925	BATHUS III	Volcanique
DW778B	Bulk	∅	-24,7167	170,1170	755	BATHUS III	∅
DW778D	Bulk	∅	-24,7167	170,1170	755	BATHUS III	∅
DW778D2	Bulk	∅	-24,7167	170,1170	755	BATHUS III	∅
DW2482	Bulk	∅	-23,8558	161,7183	430	EBISCO	∅
DR11Ai	Bulk	97	-17,9837	160,7285	2375	ECOSAT	∅
DR11Ai-1	Sous-échs	0-40	-17,9837	160,7285	2375	ECOSAT	∅
DR11Ai-2	Sous-échs	40-50	-17,9837	160,7285	2375	ECOSAT	∅
DR11Ai-3	Sous-échs	50-80	-17,9837	160,7285	2375	ECOSAT	∅
DR11Ai-4	Sous-échs	80-97	-17,9837	160,7285	2375	ECOSAT	∅
DR13Bii	Bulk	30	-16,6396	158,8356	1765	ECOSAT	∅
DR14H	Bulk	10	-17,0755	159,1991	2900	ECOSAT	Volcanique
DR15A	Bulk	2	-17,6898	158,4714	2225	ECOSAT	Calcaire
DR18F	Bulk	14	-19,9158	160,1924	1150	ECOSAT	∅
E-DR08B	Bulk	60	-17,5811	164,0079	1400	ECOSAT	∅
E-DR08B-1	Sous-échs	0-20	-17,5811	164,0079	1400	ECOSAT	∅
E-DR08B-2	Sous-échs	20-40	-17,5811	164,0079	1400	ECOSAT	∅
E-DR08B-3	Sous-échs	40-60	-17,5811	164,0079	1400	ECOSAT	∅
DR48-021	Bulk	44	-16,1061	159,2531	2060	ECOSAT III	∅
DR53-008	Bulk	31	-22,7581	159,7697	1390	ECOSAT III	∅
DR54-009	Bulk	8	-23,3483	159,7158	1350	ECOSAT III	Volcanique
102D	Bulk	∅	-17,36	163,52	2644	EVA	∅
105D	Bulk	∅	-17,665	163,97	1467	EVA	∅
108D	Bulk	∅	-18,4707	164,2	2954	EVA	∅
109D	Bulk	∅	-19,495	165,23	2245	EVA	∅
110D	Bulk	34	-19,4450	165,3190	2100	EVA	∅
113D	Bulk	11	-20,6292	166,8420	1200	EVA	Brèche
114D	Bulk	3	-20,3967	166,8640	1185	EVA	Calcaire
116D	Bulk	25	-20,7650	167,4970	2210	EVA	Brèche
117D	Bulk	30	-23,2667	169,4250	1800	EVA	Calcaire
GO14D	Bulk	14	-23,5333	168,8330	1450	GEORSTOM I	Brèche
GO15D	Bulk	5	-23,5383	168,8570	1325	GEORSTOM I	Mudstone
GO16D	Bulk	6	-23,6167	168,8420	1240	GEORSTOM I	Mudstone
GO18D	Bulk	16	-23,6850	168,2380	585	GEORSTOM I	Calcaire
GO20D	Bulk	2	-24,0767	168,0080	1220	GEORSTOM I	Grès
GO3D	Bulk	38	-22,5333	167,9680	2100	GEORSTOM I	Brèche
GO202	Bulk	57	-18,0517	160,8030	2425	GEORSTOM II	∅
GO209	Bulk	42	-17,4667	163,6330	1310	GEORSTOM II	∅
GO302D	Bulk	40	-12,0460	158,2280	2190	GEORSTOM III	∅
GO302D-1	Sous-échs	0-10	-12,0460	158,2280	2190	GEORSTOM III	∅
GO302D-2	Sous-échs	10-40	-12,0460	158,2280	2190	GEORSTOM III	∅
GO310	Bulk	43	-12,0282	162,7266	3375	GEORSTOM III	∅
GO314D10	Bulk	∅	-15,55	165,0220	3513	GEORSTOM III	∅
GO316D31	Bulk	∅	-15,4333	164,5529	3147	GEORSTOM III	∅
GO317D10	Bulk	∅	-15,5567	164,4299	3311	GEORSTOM III	∅
GO320	Bulk	6	-15,8683	163,3470	4150	GEORSTOM III	Grès
GO321D2	Bulk	∅	-16,3917	163,2949	4677	GEORSTOM III	∅
GO322D4	Bulk	∅	-16,225	163,1479	4336	GEORSTOM III	∅
GO323D2	Bulk	∅	-15,925	163,4019	4493	GEORSTOM III	∅
GO325D2	Bulk	∅	-17,0917	163,0229	4019	GEORSTOM III	∅
GO327D	Bulk	115	-19,9033	164,7570	1820	GEORSTOM III	∅
GO327D-1	Sous-échs	0-25	-19,9033	164,7570	1820	GEORSTOM III	∅
GO327D-2	Sous-échs	25-65	-19,9033	164,7570	1820	GEORSTOM III	∅

GO327D-3	Sous-échs	65-105	-19,9033	164,7570	1820	GEORSTOM III	∅
GO327D-4	Sous-échs	105-115	-19,9033	164,7570	1820	GEORSTOM III	∅
GO338D2	Bulk	∅	-22,0383	167,3000	2265	GEORSTOM III	∅
GO347D	Bulk	∅	-30,4681	168,0844	2416	GEORSTOM III	∅
GO348D6	Bulk	38	-30,1172	167,4856	1150	GEORSTOM III	∅
GO350D6	Bulk	33	-32,3522	169,1347	2500	GEORSTOM III	Grès
GO350D6-1	Sous-échs	0-20	-32,3522	169,1347	2500	GEORSTOM III	Grès
GO350D6-2	Sous-échs	20-30	-32,3522	169,1347	2500	GEORSTOM III	Grès
GO350D6-3	Sous-échs	30-33	-32,3522	169,1347	2500	GEORSTOM III	Grès
DR06B	Bulk	4	-21,4467	164,9231	878	IPOD	Calcaire
DW4998D	Bulk	∅	-23,8267	161,7233	650	KANADEEP	∅
DW4998E	Bulk	∅	-23,8267	161,7233	650	KANADEEP	∅
CP5069	Bulk	9	-23,6291	169,5891	1118	KANADEEP II	Calcaire
DN5064	Bulk	14	-23,1828	169,4166	1023	KANADEEP II	Brèche
DN5079	Bulk	47	-24,4691	169,1579	2038	KANADEEP II	Grès
DN5080B	Bulk	9	-24,4608	169,0321	1591	KANADEEP II	Brèche
DN5085A	Bulk	23	-24,3616	168,3563	1606	KANADEEP II	∅
DW5067B	Bulk	28	-23,5311	169,6136	864	KANADEEP II	Calcaire
DW5070A	Bulk	19	-23,7340	169,6294	1709	KANADEEP II	Volcanique
DW5073	Bulk	12	-23,7240	169,8625	796	KANADEEP II	Calcaire
DW5086B	Bulk	22	-24,3506	168,3741	1540	KANADEEP II	∅
DW5087	Bulk	17	-24,3594	168,4177	1680	KANADEEP II	Calcaire
DW5089B	Bulk	8	-23,5897	168,8465	1393	KANADEEP II	Volcanique
DW5090B	Bulk	3	-23,5809	168,8040	1328	KANADEEP II	Calcaire
DW5091A	Bulk	6	-23,5516	168,8498	1582	KANADEEP II	Grès
DR01A	Bulk	4	-24,2118	166,9707	1115	VESPA	Volcanique
DR04C	Bulk	54	-27,6086	167,1479	2321	VESPA	∅
DR07B	Bulk	27	-28,3018	167,2407	1569	VESPA	Brèche
DR08C	Bulk	55	-24,9381	170,3263	2271	VESPA	Volcanique
DR10B	Bulk	40	-25,1513	170,3192	1523	VESPA	Calcaire
DR13Ci	Bulk	24	-25,6681	169,5488	2731	VESPA	Brèche
DR13D	Bulk	15	-25,6681	169,5488	2731	VESPA	Brèche
DR14F	Bulk	60	-25,5786	169,6967	2112	VESPA	Brèche
DR14F-1	Sous-échs	0-35	-25,5786	169,6967	2112	VESPA	Brèche
DR14F-2	Sous-échs	35-60	-25,5786	169,6967	2112	VESPA	Brèche
DR19K	Bulk	58	-26,1529	170,4683	3028	VESPA	Brèche
DR19K-1	Sous-échs	0-25	-26,1529	170,4683	3028	VESPA	Brèche
DR19K-2	Sous-échs	25-60	-26,1529	170,4683	3028	VESPA	Brèche
DR21Biii	Bulk	16	-26,5021	171,4284	3385	VESPA	Volcanique
DR21F	Bulk	50	-26,5021	171,4284	3385	VESPA	∅
DR21F-1	Sous-échs	0-30	-26,5021	171,4284	3385	VESPA	∅
DR21F-2	Sous-échs	30-50	-26,5021	171,4284	3385	VESPA	∅
DR22A	Bulk	13	-26,6865	171,9271	2849	VESPA	Volcanique
DR29F	Bulk	27	-27,3615	172,0336	2145	VESPA	∅
DR38C	Bulk	35	-27,4344	172,7225	2072	VESPA	∅
DR38C-1	Sous-échs	0-25	-27,4344	172,7225	2072	VESPA	∅
DR38C-2	Sous-échs	25-35	-27,4344	172,7225	2072	VESPA	∅
DR41Ai	Bulk	8	-24,2663	170,0669	2861	VESPA	Volcanique
DR42B	Bulk	20	-23,7897	167,1401	1145	VESPA	Calcaire
V-DR08B	Bulk	52	-24,9381	170,3263	2271	VESPA	Hyaloclastite

Table 1. (suite)

Pour tous les échantillons sélectionnés, un échantillon "bulk" (roche totale) représentatif de tout l'encroûtement a été extrait pour analyse. Si des couches macroscopiquement discernables étaient présentes sur l'encroûtement, un (des) sous-échantillon(s) ont été fait(s) afin de représenter au mieux les variations de minéralogie et de chimie à l'échelle de l'encroûtement. Au total 9 encroûtements présentaient 1 ou plusieurs couches discernables qui ont fait l'objet de 1 à 4 sous-échantillons (classés stratigraphiquement de 1 à 4 dans le nom de l'échantillon, 1 étant la partie la plus basale, Table 1). L'épaisseur moyenne dans la Table 1 a été calculée à partir de la moyenne de 6 valeurs mesurées sur

toute la longueur de l'échantillon. La profondeur de dragage a été obtenue à partir de la valeur moyenne entre le premier et le dernier contact de la drague à roche avec le fond-marin. Dans la Table 1 les signes "Ø" indiquent soit que l'épaisseur n'a pas été mesurée, soit que l'échantillon d'encroûtement ne présentait pas de substrat.

4.1.3 Le cas des nodules polymétalliques au Nord de la ZEE

Plusieurs échantillons de nodules polymétalliques ont été dragués lors des campagnes GEORSTOM III sur la Ride Nord D'Entrecasteaux, notamment aux sites de dragages GO316 et GO317 (Figure 26). Ces échantillons ont été remontés à des profondeurs de 2 960 m et 3 200 m respectivement, ce qui est peu commun quand on sait que les nodules polymétalliques sont plutôt retrouvés au-delà de 4 000 m [5-8].

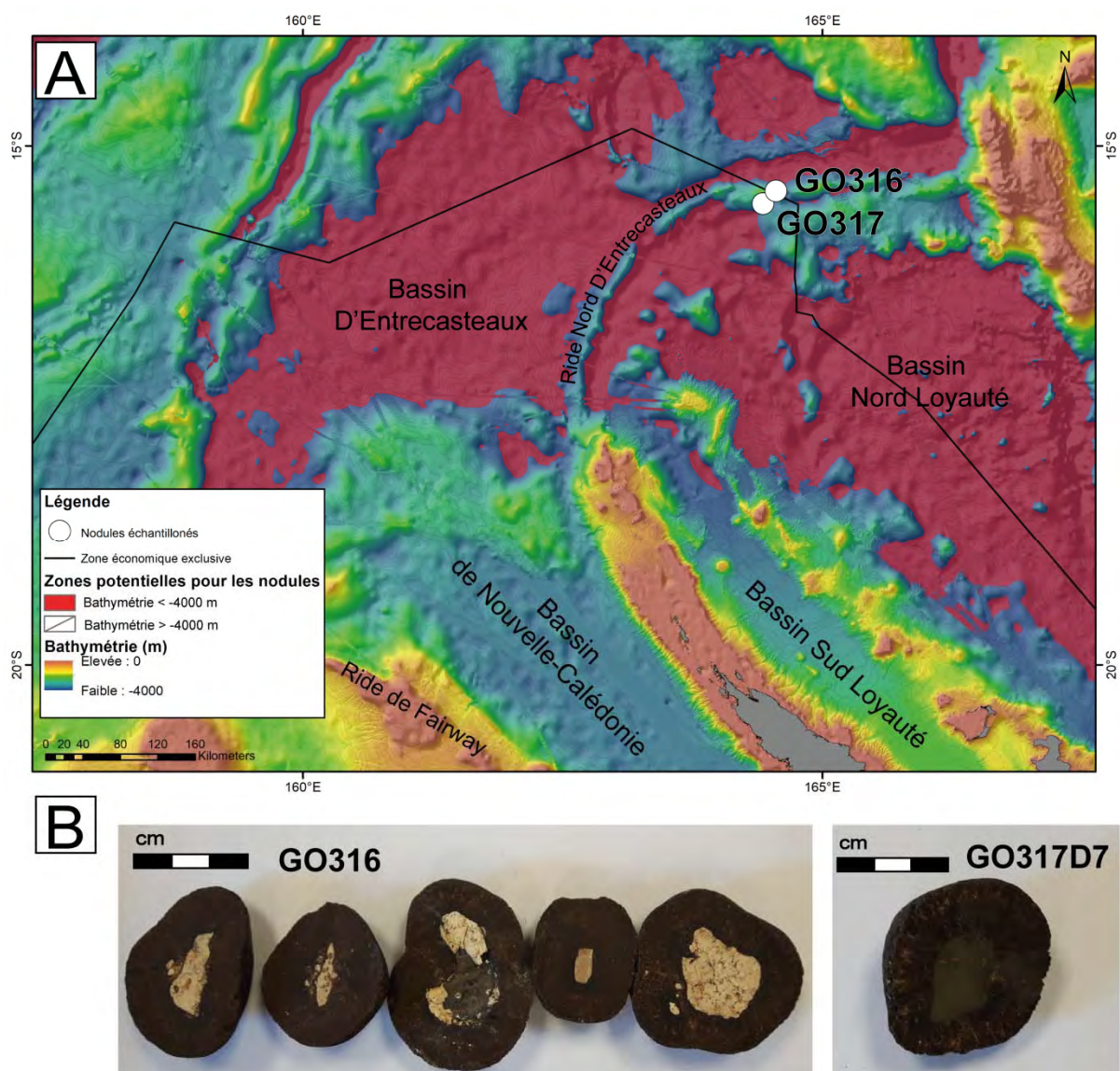


Figure 26. (A) Localisation des échantillons de nodules polymétalliques (en rouge les zones potentielles avec une profondeur inférieure à 4 000 m); (B) Photos des nodules dragués lors de GEORSTOM III.

Quelques nodules ont fait l'objet d'analyses par l'IFREMER en 2013, révélant des concentrations faibles en métaux traces ($Co+Ni+Cu\% < 0,6\%$), ainsi qu'un fractionnement marqué entre Mn et Fe, indiquant plutôt une prédominance d'une croissance hydrogénétique avec une composante détritrique marquée. Compte tenu de la physiographie de la zone Nord de la ZEE, d'autres nodules pourraient être attendus dans le Bassin D'Entrecasteaux et dans le Bassin Nord Loyauté (à des profondeurs $< 4\ 000\ m$, Figure 26).

4.2. Bathymétrie et imagerie acoustique (réflectivité)

Les relevés bathymétriques et la réflectivité sont obtenus à l'aide d'un sondeur multifaisceaux. Cet outil permet grâce à un signal sonore émis par le navire, et réverbéré sur le fond marin, d'estimer la profondeur moyenne à la verticale du navire à partir du temps de trajet de l'onde sonore. Le sondeur multifaisceaux mesure simultanément la profondeur dans plusieurs directions, permettant d'obtenir une grande résolution de données (source : IFREMER). Le sondeur multifaisceaux permet, en plus d'établir une carte topographique du relief sous-marin, de mesurer la réflectivité du fond. Cette mesure, exprimée en décibels, combine les effets de surface du fond (microtopographie, rugosité, etc.) et de volume lié à la granulométrie et à la nature des sols (source : IFREMER).

Pour cette étude, plusieurs jeux de données bathymétriques ont été utilisés suivant l'échelle d'observation. A l'échelle de la ZEE et du Sud-Ouest Pacifique, les données bathymétriques proviennent de la bathymétrie dérivée de l'altimétrie satellitaire (Figure 27). A l'échelle locale, les données bathymétriques sont issues de plusieurs campagnes marines réalisées dans le cadre du programme ZoNéCo, et d'autres campagnes plus récentes (notamment VESPA, FAUST II et TECTA), compilées sous forme d'un atlas en 2014. La précision de la bathymétrie utilisée dans cette étude est de 100 m pour l'atlas de 2014 et de 2 000 m pour les données issues de l'altimétrie satellitaire.

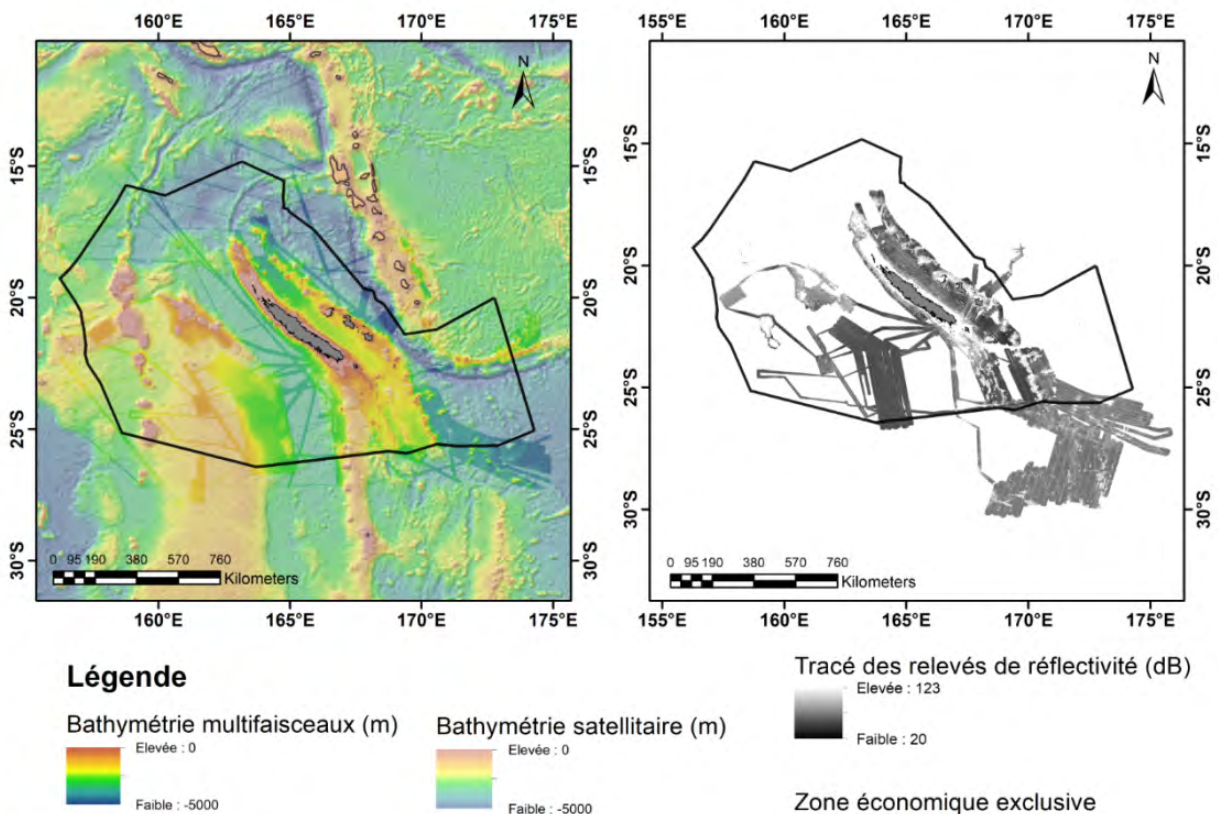


Figure 27. Données bathymétriques et de réflectivité utilisées lors de cette étude.

4.3 Méthodes d'analyse chimique

Les analyses de diffraction des rayons X (XRD) ont été réalisées avec un diffractomètre BRUKER AXS D8 Advance. Les échantillons ont été chargés par le haut dans des supports de cavité circulaires de 2,5 cm de diamètre et toutes les analyses ont été effectuées entre 5° et $70^\circ 2\theta$, avec un pas de $0,01^\circ 2\theta$ à 1s / pas (rayonnement Cu K α monochromatique, 40 kV, 30mA). Les minéraux ont été identifiés à l'aide du logiciel Diffrac.Suite EVA. Cette méthodologie permet d'identifier rapidement la plupart des minéraux (par exemple les silicates, les carbonates, les manganates bien cristallisés et les oxyhydroxydes bien cristallisés). Le δ -MnO₂ est à peine visible sur les diffractogrammes, même lorsqu'il constitue la phase cristalline principale d'un échantillon. L'estimation de la proportion de δ -MnO₂ provenant d'autres phases cristallines est faite sur la base d'une analyse qualitative des diffractogrammes, à partir du rapport entre les pics visibles de la vernadite (37° et $66^\circ 2\theta$) et le pic signal d'autres minéraux bien cristallisés.

Les analyses de fluorescence X (XRF) ont été réalisées avec un spectromètre de fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WD-XRF; BRUKER AXS S8 TIGER) sur des perles de fusion ou des pastilles compressées (respectivement pour les éléments majeurs et traces). Après l'acquisition des données, l'intensité des pics nettes mesurées, corrigées des interférences inter-éléments, a été convertie en concentrations à l'aide de courbes d'étalonnage générées à partir de l'analyse de poudres de matériaux de référence certifiés (en utilisant BHVO-2 [Jochum et al., 2005]) et mesurées dans des conditions analytiques identiques.

L'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée avec un MEB FEI Quanta 200 sur des lames minces polies. Des images de rétrodiffusion ont été acquises pour la caractérisation texturale des oxyhydroxydes de Fe-Mn.

Les éléments traces supplémentaires (Sr, Y, Zr, Nb, Th et REE) ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif à l'aide d'un ELEMENT II ICP-MS à l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) à Brest. La procédure de dissolution était la suivante : 0,1 g d'échantillon de poudre a été digéré dans une bouteille en téflon avec 4 mL d'acide chlorhydrique à 6 mol/L pendant 24 h sur une plaque chauffante (120°C) avec un pic au Tm [Barrat et al., 1996; Charles et al., 2021]. Si présente, la phase résiduelle composée majoritairement de silicates et de minéraux réfractaires a été extraite par centrifugation et digérée par un mélange d'acide fluorhydrique et d'acide chlorhydrique (3 : 1) pendant 48 h sur plaque chauffante (120°C), évaporée puis remixée avec la phase préalablement digérée. 0,5 μL de la solution a ensuite été évaporé sur une plaque chauffante et le résidu a été complété à 10 mL avec une solution d'acide nitrique à 2 % et à 0,05 % d'acide fluorhydrique pour l'analyse des éléments traces par ICP-MS. Les échantillons ont été corrigés à l'aide d'étalonnages internes, matériel de référence BHVO-2, et d'une correction du pic en Tm [Charles et al., 2021]. Chaque concentration plus loin dans le texte exprimé en %, représentera le % en poids (wt%).

4.4. Chronologie des études sur les ressources profondes de Nouvelle-Calédonie

4.4.1 Campagnes océanographiques de l'ORSTOM (IRD)

C'est lors des campagnes océanographiques mises en oeuvre par l'ORSTOM entre 1970 et 1980 visant à définir la composition et la nature des structures sous-marines autour de la Nouvelle-Calédonie que les premières ressources minérales profondes néo-calédoniennes ont été identifiées (GEOSTOM I, II, III et EVA). Certains de ces échantillons ont fait l'objet d'analyses permettant de définir qu'il s'agissait d'encroûtements Fe-Mn et de quelques nodules polymétalliques [Daniel et al., 1976; Monzier and Vallot, 1983; Monzier et al., 1989; Pichocki and Hoffert, 1987].

Dans sa thèse, Claude Pichocki a entrepris l'analyse de plusieurs encroûtements Fe-Mn enrichis en cobalt du Pacifique Sud afin d'en étudier la genèse et la relation avec le contexte géodynamique. Pour la zone de Nouvelle-Calédonie, les 7 échantillons sont répartis sur l'extrémité nord de la Ride des Loyauté (102D), sur la zone charnière de Nouvelle-Calédonie et de Norfolk (GO14D, GO16D, GO338 et GO340) et sur la ride de Norfolk (GO348 et GO350).

Il conclut après analyse de ces échantillons qu'ils présentent :

- Un rapport Mn/Fe proche de 1 ;
- Un appauvrissement en éléments traces ;
- Un enrichissement en REE ;
- Une porosité importante ;
- Une fraction détritique et sédimentaire importante ;
- Les encroûtements sont moyennement cobaltifères ($\text{Co} \pm 0,5\%$) ;
- Ils présentent une composante hydrogénétique majoritaire, à laquelle se superpose une composante volcanique mineure (substrat).

Le nombre restreint d'échantillons, les différences d'environnement de dépôt, la distance entre les prélèvements et les grandes différences entre les sédiments n'ont pas permis d'établir de relations directes entre les encroûtements et leur environnement sédimentaire. Les sédiments étudiés montrent une composante hydrothermale, cependant cette composante est mineure dans les encroûtements (plus particulièrement dans la fraction argileuse). Le processus de croissance principale est bien hydrogéné [Pichocki and Hoffert, 1987].

4.4.2 Le programme ZoNéCo

Suite aux premières découvertes et études sur les ressources profondes de Nouvelle-Calédonie et afin de continuer l'inventaire minier marin Calédonien commencé par l'ORSTOM, le programme ZoNéCo (Zone économique de Nouvelle-Calédonie) a été créé en 1991.

Ce programme, coordonné par l'Agence de Développement Economique de la Nouvelle-Calédonie (ADECAL) depuis 2002, rassemble l'Etat, la Nouvelle-Calédonie et les Provinces, l'IRD, l'IFREMER, l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC), l'Aquarium des lagons, Météo-France, et le SHOM. Les principaux objectifs de ZoNéCo sont de rassembler et de rendre accessible les informations nécessaires à l'inventaire, la valorisation, et la gestion des ressources minérales/vivantes de la Zone Economique Exclusive et des lagons de la Nouvelle-Calédonie (ZONECO.NC).

Le programme s'articulait autour de 3 phases : une première phase « stratégique » visant à réaliser la couverture morpho-bathymétrique, géophysique et océanographique des zones à explorer ; une deuxième phase « tactique » pour réaliser des opérations d'identifications des ressources par prélèvements ; une dernière phase « cible » pour quantifier la ressource sur les sites d'intérêts. En tout, 8 campagnes se sont succédé entre 1993 et 2007, et ont aidé à améliorer la connaissance globale des fonds marins au sein de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie, et d'en découvrir les ressources profondes :

- ZoNéCo 1 (1993) : Acquisition des données bathymétriques de la terminaison sud de la Nouvelle-Calédonie et des Iles Loyauté ;
- ZoNéCo 2 (1994) : Acquisition des données bathymétriques de la zone de Grand passage et du Bassin des Loyauté ;
- ZoNéCo 3 (1996) : Précision des structures aux abords des Iles Loyauté entre 50 m et 350 m ;
- ZoNéCo 4 (1996) : Acquisition des données bathymétriques à l'ouest de la Grande Terre, de la Ride de fairway, du plateau de Chesterfield-Bellona et de l'alignement des guyots de la Ride de Lord Howe ;
- ZoNéCo 5 (1999) : Acquisition des données bathymétriques d'ouest en est de la Ride de Lord Howe et de sa bordure orientale ;
- ZoNéCo 7 (1999) : Première campagne d'acquisition dans le lagon calédonien de données bathymétriques multifaisceaux couplées à celles de sismique réflexion petit-fond. Obtention des infos sur l'épaisseur des séries sédimentaires et précision de l'histoire de l'évolution du lagon ;
- ZoNéCo 11 et 12 (2004 et 2007) : Profils sismiques crustaux, carottages avec analyses sédimentologique, mesures de flux de chaleur, analyses géochimiques des eaux interstitielles, prospection pour des hydrates de gaz et hydrocarbures.

Du point de vue des ressources minérales marines profondes, les campagnes Zonéco 1 à 4 ont permis de définir la base de travail essentielle à tout travaux complémentaires qu'est la carte bathymétrique. C'est à partir de cette carte que la phase tactique visant à réaliser des opérations de prélèvements sur des sites d'intérêts devait être faite. Cependant, aucune opération de prélèvement spécifique aux ressources minérales n'a été menée suite à ces campagnes.

Une synthèse rédigée par Yves Lafoy en 1996 sur le potentiel de la ZEE de Nouvelle-Calédonie en ressources minérales profondes a permis de dresser le bilan des campagnes de prélèvements géologiques par dragages qui ont échantillonné, au sein de la ZEE, des roches présentant un cortex minéralisé. Les échantillons recensés font partie des campagnes Iles des Pins, GEORSTOM I, II, III et EVA, et regroupent principalement des encroûtements Fe-Mn et quelques nodules polymétalliques.

Seules des zones potentielles ont été déterminées à partir de la carte bathymétrique (prolongements des rides de Norfolk/Nouvelle-Calédonie et des Loyauté, zone de Grand Passage, récifs d'Entrecasteaux,

pourtour de l'Île des Pins, et la zone Chesterfield-Lansdowne-Fairway), mais la connaissance en termes de répartition, de composition et de chimie des ressources reste la même que dans les années 1970-1980.

5. Résultats

5.1. Caractéristiques et descriptions des échantillons

5.1.1 Répartition au sein de la ZEE

Les 104 échantillons de minéralisations Fe-Mn néo-calédoniennes sélectionnés sont situés en majorité sur le prolongement nord et sud de la Ride des Loyauté et de la Ride de Norfolk. On retrouve quelques encroûtements sur la Ride de Fairway, et sur les Chesterfield à l'Ouest de la ZEE, et également au nord en bordure du Bassin d'Entrecasteaux. Les échantillons proviennent de profondeurs allant de 520 m à 4 157 m pour une profondeur moyenne de 1 630 m. Comme attendu, les minéralisations sont principalement des encroûtements hydrogénés qui recouvrent les pentes et parties sommitales des élévations topographiques (anciens volcans, monts sous-marins, rides, etc.).

L'épaisseur moyenne des encroûtements hydrogénés est de 24 mm, avec une médiane à 16 mm et un écart-type de 22 mm. L'encroûtement le plus épais est situé au Nord-Est de la Grande Terre (115 mm) et le plus fin au Sud de la Ride des Loyauté (2 mm, Figure 28). La courbe de l'épaisseur d'encroûtement en fonction de la profondeur d'échantillonnage prend l'aspect d'une distribution normale centrée sur 2 000 m (Figure 29). On observe aussi un seuil de profondeur où les encroûtements dépassent l'épaisseur de 2 cm (entre 1 100 m et 3 400 m de profondeur).

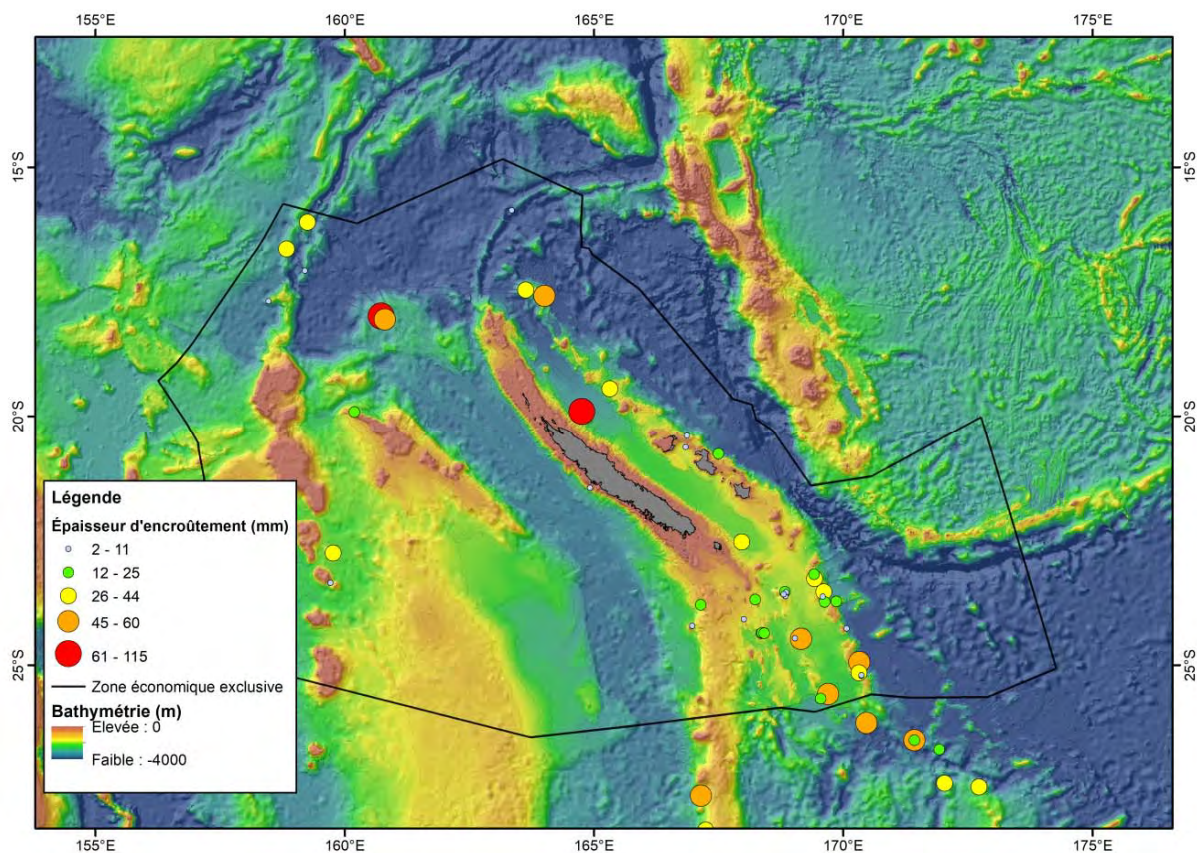


Figure 28. Épaisseur des encroûtements hydrogénés à l'échelle de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

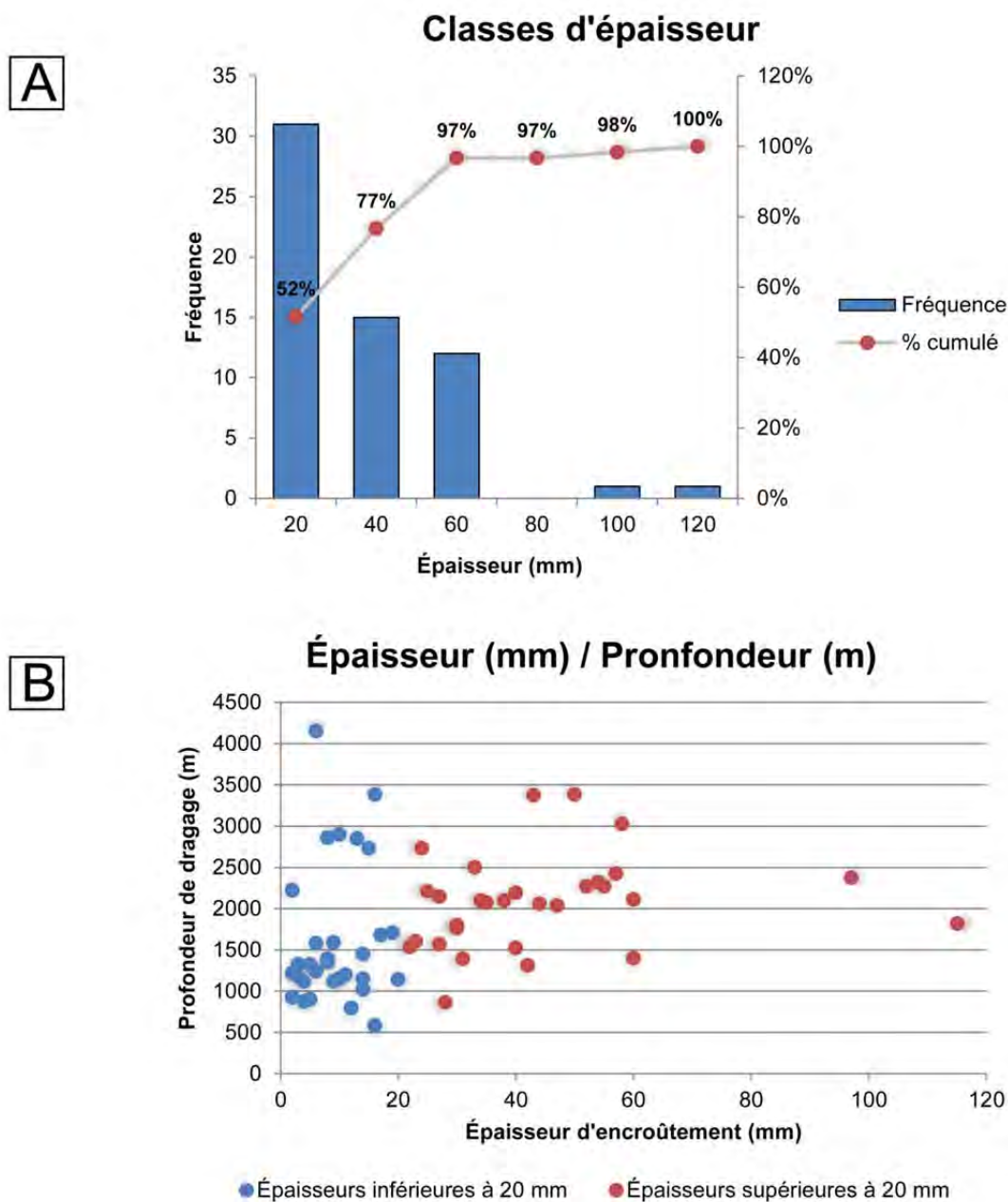


Figure 29. (A) Histogramme des fréquences cumulées des classes d'épaisseur d'encroûtement; (B) Épaisseurs d'encroûtement en fonction de la profondeur.

Ces observations sont cohérentes avec la théorie de formation des encroûtements Fe-Mn et notamment du processus hydrogénétique. En effet, l'accumulation de particules colloïdales (oxydes de Mn et oxyhydroxydes de Fe) sur le substrat est maximale en dessous de la limite du minimum d'oxygène et décroît avec la profondeur [Halbach et al., 2017; Hein and Koschinsky, 2014; Mizell and Hein, 2018]. On sait que le taux d'oxygène dissous est minimal à partir de 1 000 m au sein de la ZEE, on peut donc

proposer en première approximation qu'en Nouvelle-Calédonie les encroûtements les plus épais sont en majorité situés entre 1 100 m et 3 400 m. Cependant une forte épaisseur peut aussi indiquer une forte augmentation de la composante détritique, ce qui a été démontré dans le Pacifique [Hein et al., 2000].

5.1.2 Morphologie des encroûtements hydrogénés

Sur les 104 échantillons d'encroûtements, on observe deux familles de morphologie avec des caractéristiques différentes. Une présentant des textures et aspects "classiques" des encroûtements hydrogénés ($n=98$), et une deuxième morphologiquement très différente qui sera traitée séparément et considérée comme "hydrothermale et/ou diagénétique" ($n=6$).

Les encroûtements hydrogénés sont globalement compris dans des teintes marrons/noires pouvant varier d'un éclat métallique à terreux avec la proportion de phase détritique. Suivant les conditions et l'environnement de dépôt, l'accumulation et la précipitation de particules colloïdales sous forme d'oxyhydroxydes de Fe-Mn peut montrer plusieurs types de textures de croissance et d'aspects extérieurs (Figure 30). La surface des encroûtements sélectionnés est botryoïdale (avec des botryoïdes variant de quelques millimètres, à plusieurs centimètres), poreuse, ou lisse. Une exposition directe des encroûtements au contact de l'eau est généralement la cause d'une surface botryoïdale [Hein et al., 2000]. De nombreuses croutes montrent également une surface polie avec des botryoïdes aplatis, voire complètement lisse. Cet aspect extérieur particulier est expliqué par l'effet abrasif des courants profonds sur les encroûtements, et par l'accentuation des phénomènes d'érosion autour des botryoïdes (formes en "champignons"). Les encroûtements en bordure des dalles rocheuses sont généralement à l'abri des courants de fonds, et présentent donc plutôt des textures très poreuses riches en éléments détritiques.

En section, il est possible d'observer la manière donc s'accumulent et précipitent les particules de Fe-Mn. De manière générale, les encroûtements fins (épaisseur < 2 cm) de Nouvelle-Calédonie ne présentent qu'une seule couche macroscopiquement distinguable, plutôt peu/pas poreuse, noire sombre, et massive/laminée. Les encroûtements les plus épais (épaisseur > 3 cm), peuvent montrer des alternances distinguables à l'œil nu indiquant des variations des conditions de précipitation et d'environnement de dépôt.

C'est le cas de 9 encroûtements hydrogénés qui ont fait l'objet de 1 à 4 sous échantillons (Figure 31) :

- DR11Ai (97 mm) : (1) couche basale poreuse avec possible carbonate/fluoroapatite, (2) couche centrale litée massive, (3) couche centrale-sup laminée avec lamines sédimentaires et (4) couche supérieure plutôt massive ;
- E-DR08B (59 mm) : (1) couche basale plutôt poreuse, (2) couche centrale massive et (3) couche supérieure très poreuse ;
- GO302D (40 cm) : (1) couche basale massive un peu poreuse et (2) couche supérieure très laminée avec sédiments interstitiels ;
- GO327D (115 mm) : (1) couche basale plutôt massive, (2) Couche centrale très laminé avec sédiments interstitiels, (3) couche centrale-sup plutôt massive avec sédiments interstitiels et (4) couche supérieure massive sans texture ;
- GO350D6 (33 mm) : (1) couche basale très poreuse, (2) couche centrale plutôt massive et (3) couche supérieure massive ;
- DR14F (60 mm) : (1) couche basale poreuse et (2) couche supérieure plutôt massive ;
- DR19K (5.8 cm) : (1) couche basale massive et (2) couche supérieure très poreuse ;
- DR21F (49 mm) : (1) couche basale massive et (2) Couche supérieure poreuse ;

- DR38C (34 mm) : (1) Couche basale poreuse et (2) Couche supérieure massive.

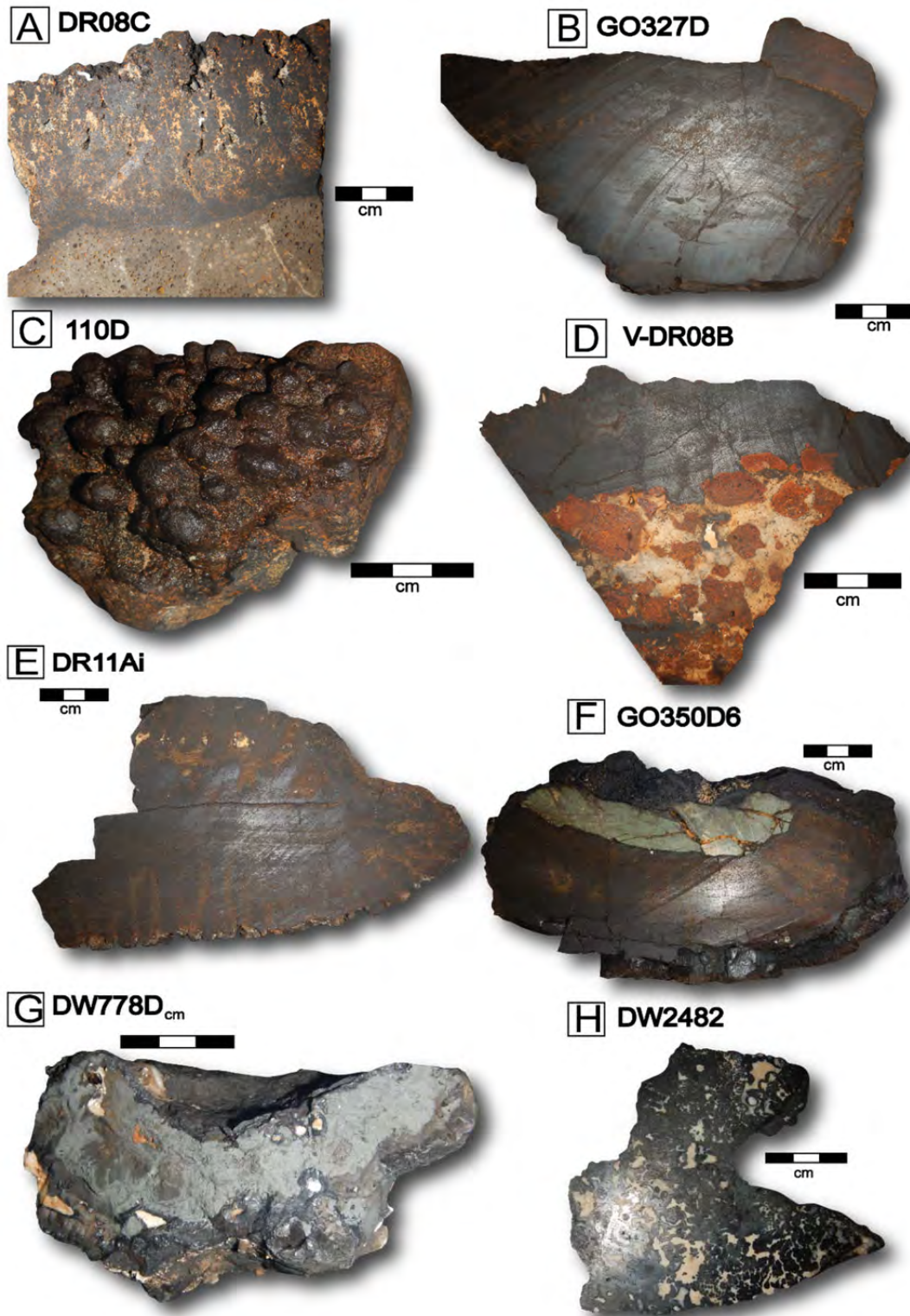
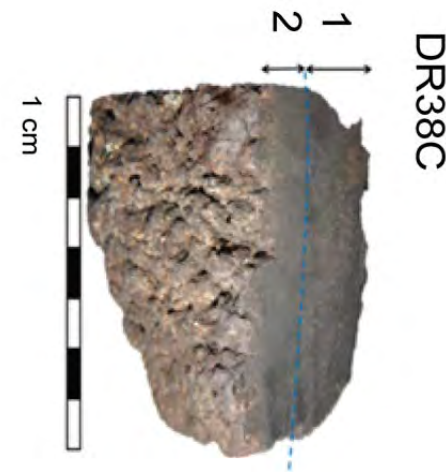
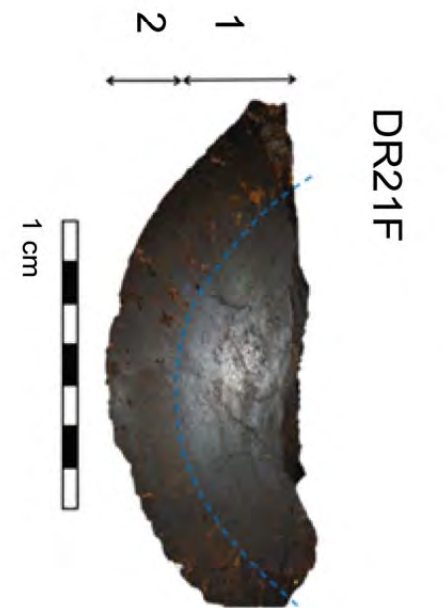
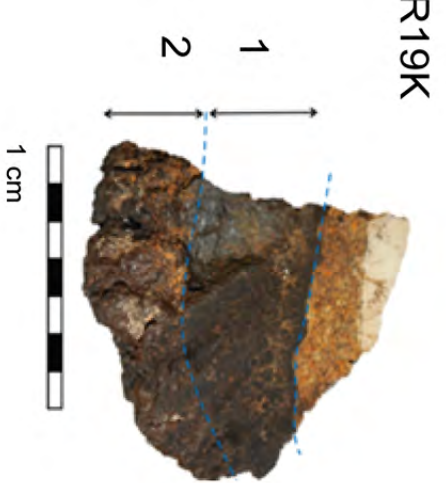
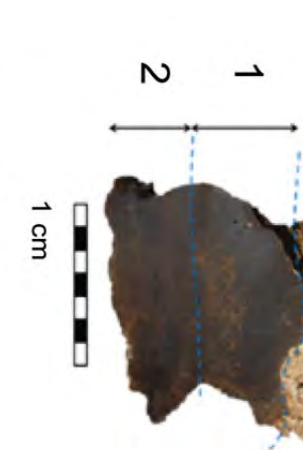
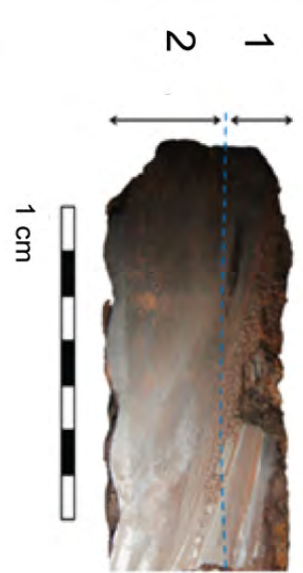
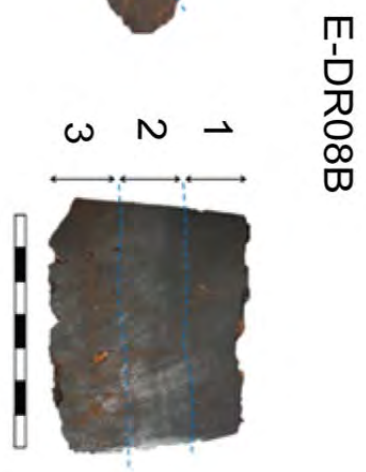
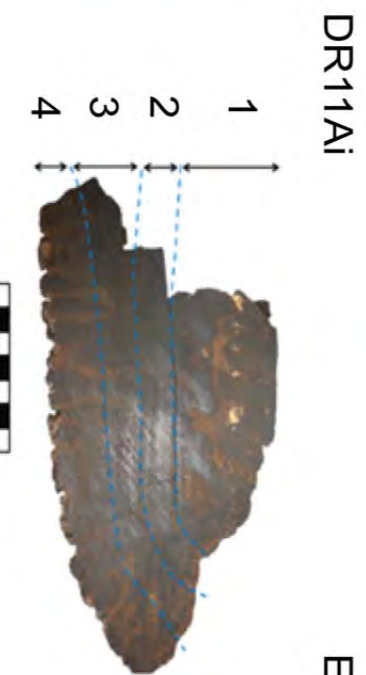


Figure 30. Exemple de la diversité des encroûtements Fe-Mn rencontrés en Nouvelle-Calédonie. (A) Texture colonnaire avec fort remplissage détritique interstitiel; (B) Encroûtement massif de 115 mm; (C) Surface botryoidale; (D) Encroûtement massif sur une hyaloclastite; (E-F) Encroûtements présentant des variations macroscopiques de textures entre la base et la surface; (G-H) Encroûtements hydrothermaux



et/ou diagénétiques avec des morphologies et couleurs complètement différentes des encroûtements hydrogénés.

Figure 31. Encroûtements ayant fait l'objet d'analyse en sous-échantillons (les lignes bleues indiquent la séparation entre chaque couche)

Les textures sont principalement laminées/massives avec un reflet métallique indiquant un faible taux de croissance, une faible composante détritique, une épaisseur plutôt faible (< 2 cm), et généralement une surface lisse. Plusieurs encroûtements présentent aussi des textures colonnaires signent d'un apport sédimentaire plus important, d'un courant de fond important, ainsi qu'une croissance du dépôt qui se fait préférentiellement dans la continuité des botryoïdes (expliquant les zones plus claires riches en sédiments entre les botryoïdes). La texture dendritique, plutôt associée aux nodules polymétalliques dont la croissance se fait en milieu sédimentaire meuble, semble présente sur certains échantillons avec une composante détritique très importante.

Les encroûtements hydrogénés sont retrouvés sur une grande variété de substrat, incluant des brèches, conglomérats, basaltes, calcaires, hyaloclastites, mudstones pour les roches les plus communes. Dans le cas de roches très indurées comme les basaltes, le contraste avec l'encroûtement est bien marqué, avec une délimitation franche et peu/pas d'imprégnations dans le substrat. Pour des roches tendres, notamment les calcaires, l'imprégnation d'encroûtement dans le substrat est beaucoup plus accentuée, rendant parfois même compliqué la séparation de l'encroûtement de la roche. Ces observations sont critiques pour l'évaluation des ressources, en effet la séparation et le traitement des encroûtements, et donc la nature même du substrat, seront des points clés à développer pour de futures exploitations.

5.1.3 Encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques

i. Dragage DW778

Un autre point notable est la présence de minéralisations avec des faciès très différents des autres (en bleu sur la Figure 32). Ces dépôts atypiques sont présents au Sud de la Ride des Loyauté sur le mont K, et sur les édifices volcaniques de la Ride de Lord Howe.

La campagne BATHUS III s'est déroulée en 1993 à bord de "L'Atalante" et avait pour but d'échantillonner le benthos sur les monts sous-marins du sud de la Ride des Loyauté, sur la Ride de Norfolk et sur la pente Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie. La drague DW778 sur le mont K est la seule parmi toutes les autres dragues identifiées à présenter des minéralisations aux faciès et morphologies différents des encroûtements hydrogénés classiques. Plusieurs échantillons portant tous le nom "DW778" ont été séparés en 4 sous-échantillons A, B, C et D, et décrits séparément. Ils montrent au final tous les mêmes unités et alternances dans des proportions variables.

On observe 4 unités distinctes (Figure 32A), qui semblent se succéder suivant des plans subparallèles (stratigraphie initiale/plan de croissance) :

- (1) une unité extérieure lisse (légèrement botryoïdale), de couleur gris métallisé, pas de texture visible, entre 1 mm et 1 cm, présente aussi au centre de l'échantillon en bordure des zones blanches (4), plutôt friable ;
- (2) une unité gris/bleu terne, poreuse avec des cavités à l'intérieur ;
- (3) une unité gris foncé terne, poreuse voire très poreuse, des lamines de croissance sont visibles, on la retrouve aussi en imprégnation dans (2) sous forme de dendrites ;
- (4) une unité blanche, parfois rougeâtre, souvent en bordure de l'unité (1), réagit à l'HCl.

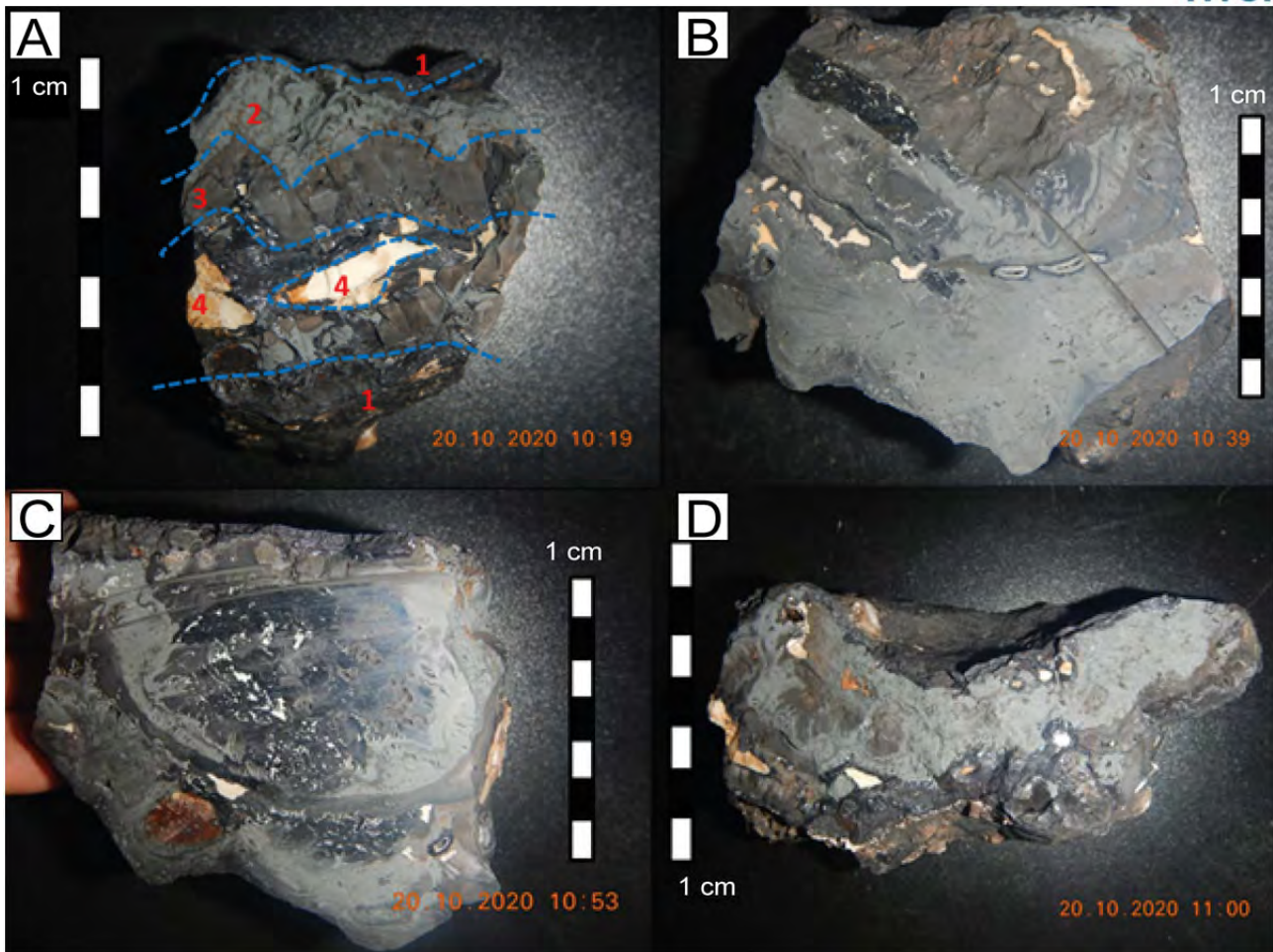


Figure 32. (A-D) Différents échantillons issus de la drague DW778 avec des morphologies similaires.

Ces échantillons ne semblent à priori pas "déposés" sur un substrat, mais pourraient plutôt s'être mis en place dans un contexte hydrothermal/diagénétique. Possiblement le long d'un plan de fracture, lors de différents pulses hydrothermaux (expliquant les alternances d'unités), ou encore lors d'un remplacement/imprégnation du substrat par des fluides diagénétiques/hydrothermaux [Hein *et al.*, 2008; Hein *et al.*, 1997].

ii. Dragage DW2482

La campagne EBISCO menée par Bertrand Richer de Forges en 2005 à bord de "L'Alis" avait pour objectifs de faire l'inventaire et la description de la faune bathyale macrobenthique à l'Ouest de la Nouvelle-Calédonie (les bancs de Landsdowne, Fairway, Nova, Argo, Kelso et Capel, ainsi que les Atolls de Chesterfield et Bellona). La drague DW2482, effectuée à une profondeur de 430 m sur le mont sous-marin principal du chapelet d'édifices volcaniques de la Ride de Lord Howe, a remonté un type de minéralisation qui ne s'apparente morphologiquement ni à un encroûtement hydrogéné, ni à un dépôt sulfuré type SMS (Figure 33). Ces monts sous-marins sont situés au centre de la Ride de Lord Howe à des profondeurs

comprises entre 500 m et 1 000 m, et suivent deux directions d'alignement préférentiel N110°E et Nord-Sud [Exon *et al.*, 2004; Van de Beuque *et al.*, 1998]. Des échantillons dragués lors de la campagne ZoNéCo 4 en 1996 ont permis de proposer que leur mise en place se soit déroulée au Miocène Inférieur [Van de Beuque *et al.*, 1998].

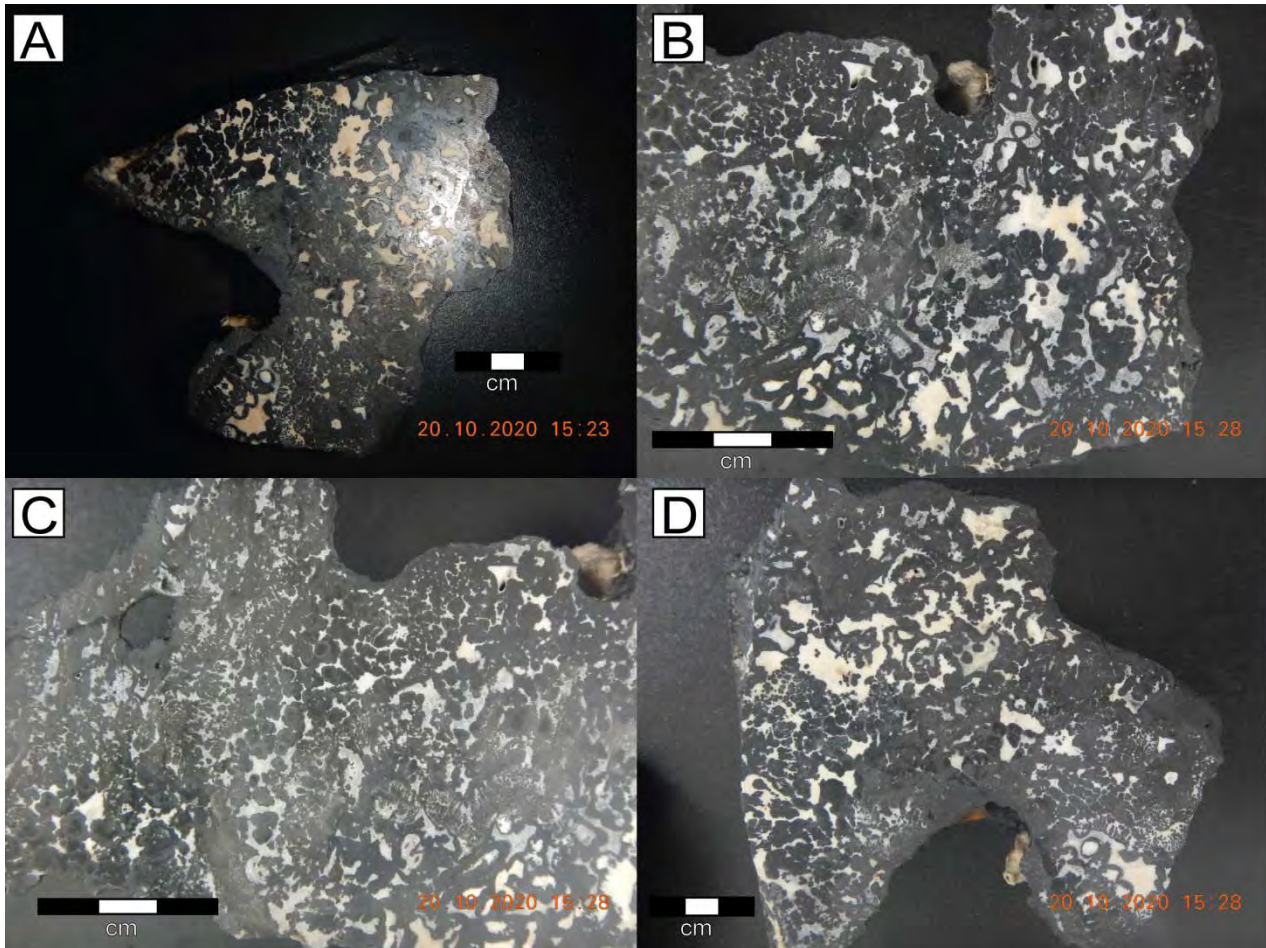


Figure 33. (A-D) Echantillon hydrothermal et/ou diagénétique DW2482

L'échantillon DW2482 mesure une dizaine de centimètre, il est plus dense et beaucoup plus compétent qu'un encroûtement hydrogéné classique, sa surface est lisse et de couleur gris métallisé, et il ne semble à priori pas déposé sur un substrat. En tranche on peut distinguer plusieurs unités interconnectées et fortement imbriquées les unes dans les autres. La première est une unité blanche laiteuse à translucide pouvant tendre vers des teintes rougeâtres qui réagit à l'HCl (indication de calcite ou fluoroapatite). On retrouve en bordure de cette unité, ou en imprégnations à l'intérieur, une deuxième unité gris/noir métallisée. Il est difficile de distinguer clairement les interactions entre ces deux unités, cependant la croissance de l'unité grise/noire semble se faire par l'accumulation de lamines à petites échelles (quelques mm), et montre parfois des aspects de texture colonnaire voire dendritique. Contrairement à DW778, aucune autre unité n'est distinguable à l'œil nu et aucun plan de croissance/stratigraphie n'est visible. Le lien entre la mise en place de l'édifice volcanique et le dépôt de cet échantillon est fort probable.

iii. *DW4998D et DW4998E*

La mission KANADEEP s'est déroulée à bord du N/O l'Alis en 2017 dans le secteur de Lansdowne Bank et le long de la chaîne des points chauds de Lord Howe (Plateau des Chesterfield-Bellona, Bancs Argo, Nova, Kelso, Capel, ainsi que les pointements volcaniques de la Ride de Lord Howe). L'objectif principal était la caractérisation des organismes benthiques profonds entre 0 et 1 000 m de profondeur. La drague DW4998 est située à 3,3 km au nord de l'échantillon DW2482, en bordure du même édifice volcanique, à une profondeur de 650 m.

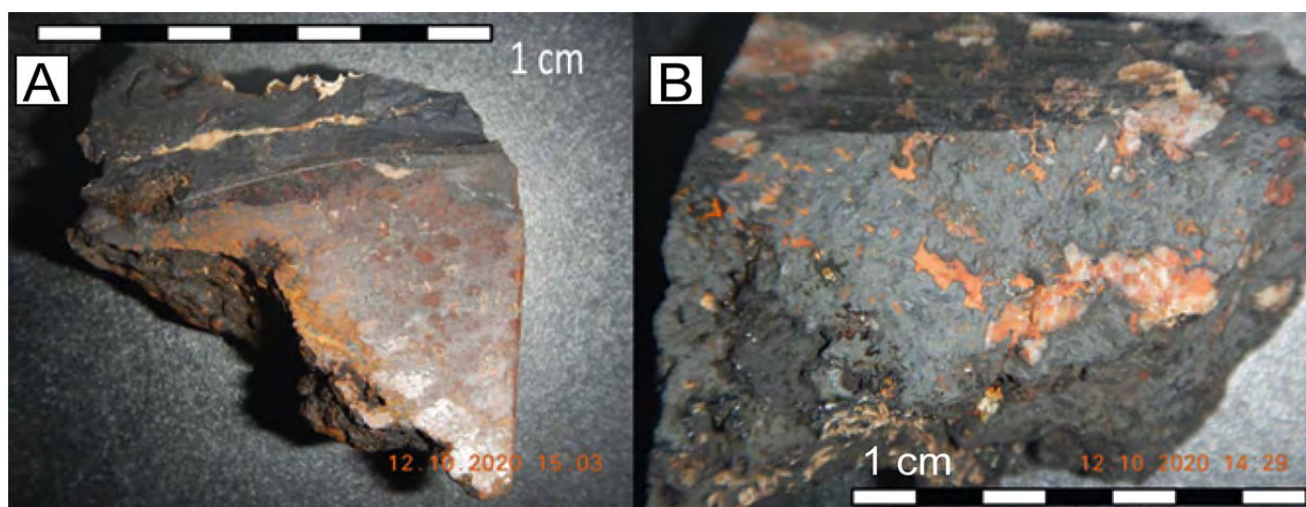


Figure 34. Echantillons hydrothermaux et/ou diagénétiques (A) DW4998E et (B) DW4998D.

Deux échantillons distincts avec un dépôt minéralisé ont été échantillonnés (Figure 34).

- DW4998E avec également deux unités, une blanche/rougeâtre très similaire à DW4998D, et une unité gris métallisé sous forme de fines lamines. Cette minéralisation est déposée sur une hyaloclastite à clastes fins très oxydés (Figure 34A) ;
- DW4998D présente 2 unités, une blanche/rougeâtre laiteuse qui réagit à l'HCl (forte ressemblance avec DW2482), et une grise/bleue terne (ressemblance avec l'unité 2 bleue terne des échantillons DW778). Aucune texture n'est visible à l'œil nu et la minéralisation ne semble pas être déposée sur un substrat (Figure 34B).

Les 2 échantillons présentent certaines similitudes avec DW2482 (une unité blanche/rougeâtre qui réagit à l'HCl et une unité gris métallisé pour DW4998E), mais morphologiquement on ne retrouve pas de textures communes. DW4998D est plutôt massif et les deux unités n'ont aucune interconnexions comme DW2482. L'éclat métallisé de DW4998E rappelle celui de DW2482, mais les textures ici sont différentes. La présence

d'une hyaloclastite imprégnée par la minéralisation comme substrat pour DW4998E indique possiblement une contemporanéité entre la mise en place de cette roche et celle de la minéralisation.

5.2. Minéralogie XRD et MEB

5.2.1 Diffraction des rayons X (XRD)

La caractérisation XRD menée sur 91 échantillons d'encroûtement a permis de confirmer la nature hydrogénétique d'une majorité de ces échantillons. Les données XRD sont compilées dans la Table 2. Les deux phases principales sont δ -MnO₂ (oxydes de Mn), dont l'abondance peut atteindre 90%, et les oxyhydroxydes de Fe qui ressortent difficilement au XRD car étant amorphes. Quartz, feldspath, calcite, calcite magnésienne, ainsi que les argiles et les micas peuvent être présent en proportions variables dans les encroûtements suivant l'implication de la phase détritique. Il existe plus d'une trentaine de minéraux d'oxyhydroxydes de Mn retrouvés aussi bien en contexte continental que marin. L'identification XRD de ces minéraux est complexe car ils précipitent le plus souvent sous forme de colloïdes variant de 100 à 130 Å, et s'approche donc de la limite de détection de la méthode de diffraction des rayons X. De plus, plusieurs raies de diffraction sont communes à de nombreux minéraux manganésifères provenant des ressources marines (par exemples les raies à 2.40-2.45 Å, 9.5-9.8 Å ou 7.0-7.3 Å [Burns and Burns, 1979]). Sans méthodes analytiques plus fines, la distinction d'un minéral distinct seulement à partir du XRD sur poudre n'est pas possible. Pour la suite, on parlera de 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates pour désigner ces phases (les 7 Å et le 10 Å manganates les plus communs dans les ressources minérales profondes sont respectivement la birnessite et la todorokite). La présence de 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates dans certains échantillons est un possible indicateur de phénomènes diagenétiques impliquant des conditions de faible potentiel redox lors de la précipitation, ou la présence d'un apport hydrothermal. Les échantillons avec de la 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates sont également composés de fluoroapatite, minéral phosphoré également symptomatique des phénomènes diagenétiques. Quelques échantillons présentent de la pyrolusite (MnO₂), minéral plutôt inhabituel dans les minéralisations profondes et qui provient généralement de la précipitation directe de fluides hydrothermaux, ou de la dissolution/re-précipitation de la todorokite (10 Å manganates) primaire.

Table 2. Minéralogie XRD/MEB des 104 échantillons de minéralisations de Nouvelle-Calédonie.

Echantillons	Majeur	Moyen	Mineur
102D	-	-	-
105D	-	-	-
108D	-	-	-
109D	-	-	-
110D	δ -MnO ₂ , Quartz, Plagioclase	-	Calcite
113D	δ -MnO ₂	-	Quartz, Plagioclase
114D	δ -MnO ₂	Plagioclase, Calcite	Quartz, Gypse
116D	δ -MnO ₂	Quartz, Plagioclase	-
117D	δ -MnO ₂	-	Quartz
CP5069	δ -MnO ₂	Fluoroapatite, Calcite	10 / 7 Å manganates
DN5064	δ -MnO ₂	-	Calcite
DN5079	δ -MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DN5080B	δ -MnO ₂	-	Fluoroapatite, Quartz
DN5085A	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
DR01A	δ -MnO ₂	-	-
DR04C	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase

DR06B	δ-MnO ₂	Quartz	Mg-Calcite, Plagioclase
DR07B	δ-MnO ₂	-	-
DR08C	δ-MnO ₂ , Calcite	Argiles/Micas, Quartz	Plagioclase
DR10B	δ-MnO ₂	-	Quartz
DR11Ai	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
DR11Ai-1	Quartz, Plagioclase	δ-MnO ₂	-
DR11Ai-2	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
DR11Ai-3	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
DR11Ai-4	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
DR13Bii	δ-MnO ₂ , Quartz	Calcite	-
DR13Ci	δ-MnO ₂	Calcite	Quartz
DR13D	δ-MnO ₂	Quartz	Calcite, Plagioclase
DR14F	δ-MnO ₂	Quartz	-
DR14F-1	δ-MnO ₂	Quartz	Calcite, Plagioclase
DR14F-2	δ-MnO ₂	Quartz	-
DR14H	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
DR15A	δ-MnO ₂	Quartz, Plagioclase	-
DR18F	δ-MnO ₂	-	Plagioclase
DR19K	δ-MnO ₂ , Argiles/Micas	-	Quartz, Calcite
DR19K-1	δ-MnO ₂ , Argiles/Micas	Calcite	Quartz, Plagioclase
DR19K-2	δ-MnO ₂	Quartz	-
DR21Biii	δ-MnO ₂ , Argiles/Micas	Quartz, Plagioclase	-
DR21F	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DR21F-1	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DR21F-2	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DR22A	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DR29F	δ-MnO ₂	Quartz	Quartz
DR38C	δ-MnO ₂	-	Quartz, Calcite
DR38C-1	δ-MnO ₂	-	Quartz
DR38C-2	δ-MnO ₂	Calcite	Quartz
DR41Ai	δ-MnO ₂ , Plagioclase	Quartz	-
DR42B	δ-MnO ₂	-	-
DR48-021	δ-MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
DR53-008	δ-MnO ₂	-	Quartz
DR54-009	δ-MnO ₂	-	Quartz, Plagioclase
DW4998D	Pyrolusite	Mg-Calcite	Calcite, Fluorapatite
DW4998E	FeOOH, Calcite	Fluorapatite, 10 / 7 Å manganates	-
DW5067B	δ-MnO ₂	Calcite	-
DW5070A	δ-MnO ₂	-	Quartz, Calcite
DW5073	δ-MnO ₂	-	Calcite
DW5086B	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DW5087	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase
DW5089B	δ-MnO ₂	-	Quartz
DW5090B	δ-MnO ₂	-	Quartz
DW5091A	δ-MnO ₂	Quartz	Calcite
DW772	δ-MnO ₂	-	-
DW774	δ-MnO ₂	-	Calcite
DW778B	Pyrolusite	Mg-Calcite	-
DW778D	Pyrolusite	Mg-Calcite	-
DW778D2	Pyrolusite	Mg-Calcite	-
DW2482	10 / 7 Å manganates	Mg-Calcite	Fluorapatite
E-DR08B	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
E-DR08B-1	δ-MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
E-DR08B-2	δ-MnO ₂ , Quartz	-	-
E-DR08B-3	δ-MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
GO14D	δ-MnO ₂	-	-
GO15D	δ-MnO ₂	Calcite	Quartz, Plagioclase
GO16D	δ-MnO ₂	Quartz	Plagioclase, Calcite
GO18D	δ-MnO ₂	-	Quartz, Plagioclase
GO202	δ-MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase

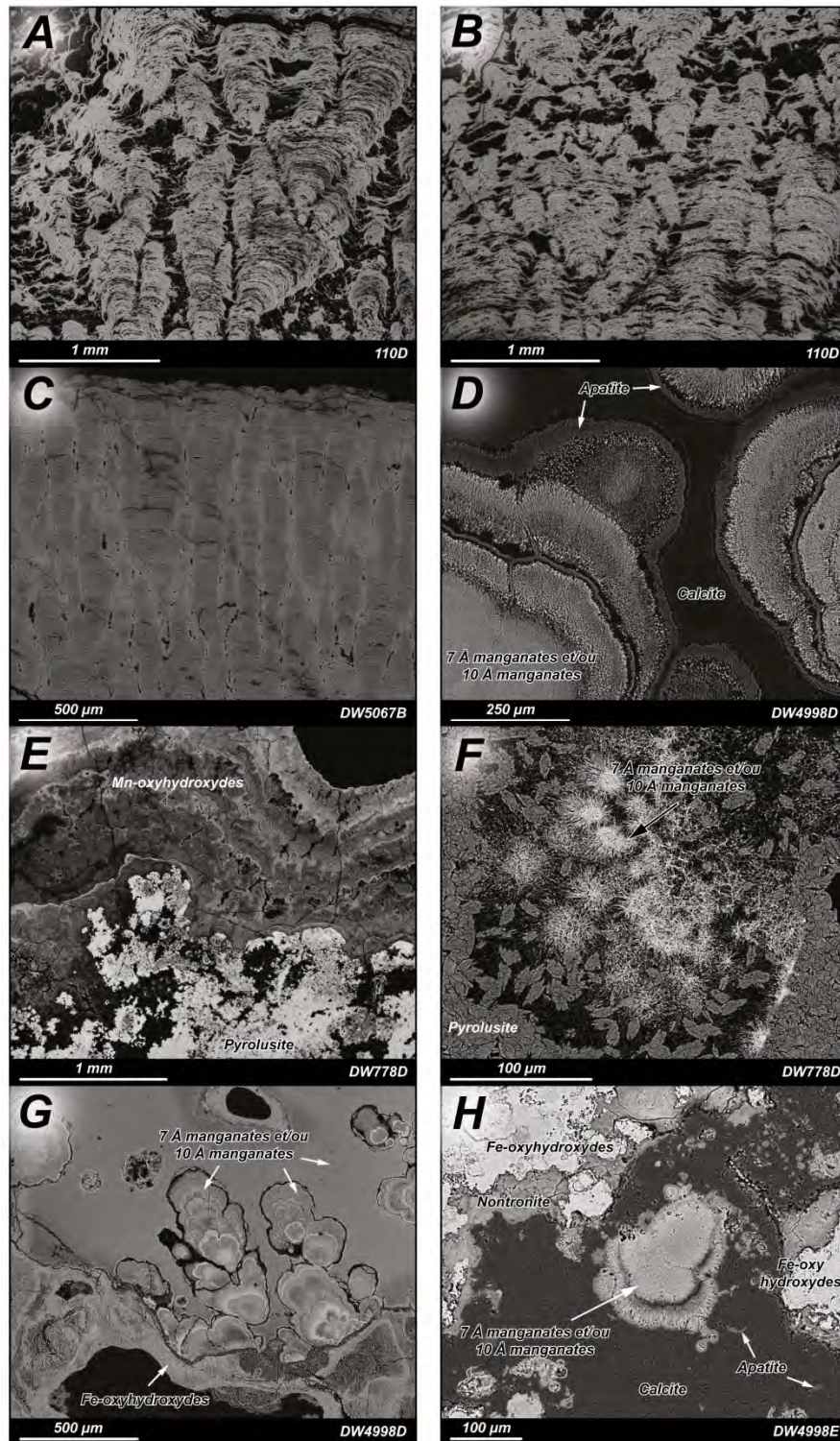
GO209	δ -MnO ₂	Quartz	Plagioclase
GO20D	δ -MnO ₂	-	Quartz
GO302D	δ -MnO ₂ , Plagioclase	Quartz	-
GO302D-1	δ -MnO ₂ , Plagioclase	Quartz	-
GO302D-2	δ -MnO ₂ , Plagioclase	Quartz	-
GO310	δ -MnO ₂ , Argiles/Micas	Amphibole	Quartz, Calcite, Plagioclase
GO314D10	-	-	-
GO316D31	-	-	-
GO317D10	-	-	-
GO320	δ -MnO ₂	-	Plagioclase, Quartz
GO321D2	-	-	-
GO322D4	-	-	-
GO323D2	-	-	-
GO325D2	-	-	-
GO327D	δ -MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	-
GO327D-1	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
GO327D-2	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
GO327D-3	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
GO327D-4	δ -MnO ₂ , Quartz	-	Plagioclase
GO338D2	-	-	-
GO347D	-	-	-
GO348D6	δ -MnO ₂	-	Quartz
GO350D6	δ -MnO ₂	Quartz, Plagioclase	-
GO350D6-1	δ -MnO ₂	Plagioclase, Quartz	-
GO350D6-2	δ -MnO ₂	Quartz, Plagioclase	-
GO350D6-3	δ -MnO ₂	-	Quartz, Plagioclase
GO3D	δ -MnO ₂	Quartz	Plagioclase
V-DR08B	δ -MnO ₂ , Quartz	Plagioclase	Calcite

5.2.2 Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Des lames minces ont été faites sur plusieurs échantillons hydrogénés et hydrothermaux/diagenétiques afin de les caractériser microscopiquement. L'étude des lames minces d'encroûtements hydrogénés confirme les observations macroscopiques faites sur ces échantillons. Les oxydes de Mn et oxyhydroxydes de Fe forment des alternances reflétant à un instant t les caractéristiques propres aux conditions de dépôts.

On retrouve des textures massives/laminées (Figure 35B,C) attestant d'un courant de fond important et un taux de sédimentation très faible, l'accumulation de métaux est maximale. Des textures colonnaires avec un remplissage détritique interstitiel plus ou moins marqué (Figure 35A,B) indiquent un apport en sédiment plus important et donc une dilution de la quantité de métaux. L'exemple de la Figure 35B montre que les conditions de dépôt peuvent varier au cours du temps, passant d'un environnement stable et dominé par la précipitation hydrogénétique, à un environnement où la composante détritique est plus importante (probablement en lien avec des changements physico-chimiques et géologiques à l'échelle régionale).

Les encroûtements hydrothermaux sont eux composés d'une alternance d'oxyhydroxydes de Mn amorphes/microcristallins et de 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates quand cette phase est bien cristallisée (Figure 35D,H). Ces alternances reflètent les variations de composition des fluides minéralisateurs et des conditions physico-chimiques de l'environnement de dépôt. Par exemple, les images MEB de l'échantillon DW778D (Figure 35E,F) permettent d'identifier une séquence de minéralisation : précipitation d'oxyhydroxydes de Mn amorphes et microcristallins, puis remplacement progressif de cette



phase par de la pyrolusite ± calcite, suivi par un dépôt terminal d'oxyhydroxydes de Mn riches en Ba et présentant une texture de croissance aciculaire.

Figure 35. Images MEB des minéralisations Fe-Mn. (A-C) Encroûtements hydrogénés; (D-H) Minéralisations hydrothermales/diagénétiques (Mn±Fe±Si). (A) Texture colonnaire avec quartz interstitiels; (B) Texture laminée évoluant vers colonnaire; (C) Texture massive; (D) Alternance de 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates avec calcite tardive; (E) 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates remplacées progressivement par de la pyrolusite; (F)

Remplacement d'oxyhydroxydes microcristallins/amorphes par de la pyrolusite \pm calcite; (G) Alternance d'oxyhydroxydes microcristallins/amorphes présentant une texture de croissance orientée (sphérolitique); (H) Remplacement hydrothermal des clastes d'une hyaloclastite par des argiles et oxyhydroxydes de Fe, suivi par un remplissage terminal de carbonates (calcite et apatite).

5.3. Géochimie des échantillons

5.3.1 Classification génétique des échantillons

A partir des morphologies et de la minéralogie des échantillons, on observe que plusieurs types de croissance et d'origine sont impliqués. Afin de faciliter l'analyse géochimique, statistique et la suite de l'étude, il est intéressant de commencer par distinguer ces groupes à l'aide de diagrammes génétiques.

Deux diagrammes différents ont été tracés pour caractériser le processus principal de croissance pour les échantillons. Le premier diagramme de [Enrico *et al.*, 1972] (Figure 36A) représente les échantillons suivant 3 pôles : un pôle Fe, un pôle Mn et un pôle avec les éléments traces $10^*(Co+Cu+Ni)$. Cette représentation permet de distinguer les 3 grands groupes de ressources minérales marines profondes, tel que : les encroûtements hydrogénés avec une concentration en Fe plus élevée, ainsi qu'un Mn et Co+Cu+Ni plus faibles (bien que Co soit généralement plus élevé), les encroûtements hydrothermaux marqués par des fortes concentrations en Fe ou Mn et une faible concentration en éléments traces, et les nodules avec un Mn plutôt fort, un Fe faible et un Co+Cu+Ni élevé. Le diagramme de [Josso *et al.*, 2017] (Figure 36B) permet de mieux mettre en avant la grande diversité des ressources minérales marines profondes et notamment les encroûtements hydrothermaux enrichis en métaux [Pelleter *et al.*, 2017]. Pour cela, les 3 pôles utilisés sont : un pôle ferromanganésifère $(Fe+Mn)/4$, un pôle avec les éléments traces $15^*(Cu+Ni)$ et un pôle formé de l'association de terres rares (Ce et Y), et de HFSE (Zr) égal à $100^*(Zr+Y+Ce)$. Cette représentation permet de mieux rendre compte de la variété des processus impliqués dans la précipitation des dépôts. En effet, un enrichissement en Co, HFSE et REE marque la prédominance du processus hydrogénétique. Un excès de Mn, Cu et Ni est généralement un marqueur du processus diagénétique, avec comme spécificité des concentrations plus forte en Mn et Fe dans le cas d'un milieu sub-oxique que dans un milieu oxique. Alors qu'une forte anomalie négative en HFSE et REE (typique d'un taux de croissance élevé), ainsi que des concentrations en Fe et Mn élevées, sont la marque d'un dépôt hydrothermal. Ce diagramme permet également de figurer les types mixtes, comme la présence d'une source hydrothermale à proximité d'encroûtements hydrogénés (deux signaux de processus de croissance).

Dans le premier diagramme (Figure 36A), on peut voir qu'une majorité d'échantillon est regroupée dans la zone des encroûtements hydrogénés. Cette première observation confirme l'hypothèse de départ que les échantillons analysés, de par leurs morphologies, textures, structures, sont bien majoritairement hydrogénés. Les 5 échantillons avec un enrichissement en Mn et une anomalie négative en Co+Ni+Cu sont retrouvés dans, ou à proximité, de la zone des encroûtements hydrothermaux (DW2482, DW4998D, DW778D, DW778D2 et DW778B). Cette observation est conforme avec les différences de morphologie observées lors de la phase d'échantillonnage. A noter que DW4998E est lui présent au sein de la zone hydrogénée.

Le deuxième diagramme (Figure 36B) montre également une majorité de points dans le domaine hydrogéné. Quelques points sont situés plus ou moins à proximité de cette zone, notamment dans le pourtour du cercle, indiquant une concentration moindre en HFSE et REE, ainsi qu'une concentration en Cu+Ni plus forte (DN5085 et GO16D). Les 5 échantillons précédemment identifiés dans le premier

diagramme sortent également du domaine hydrogéné, avec quelques spécificités : les échantillons DW4998D, DW778D et DW778D2 sont situés dans le domaine des encroûtements hydrothermaux, alors que DW2482 et DW4998E sont à mi-chemin entre le domaine hydrothermal et diagénétique, indiquant un enrichissement anormal en Cu+Ni par rapport à des encroûtements hydrothermaux ou hydrogénés "classiques".

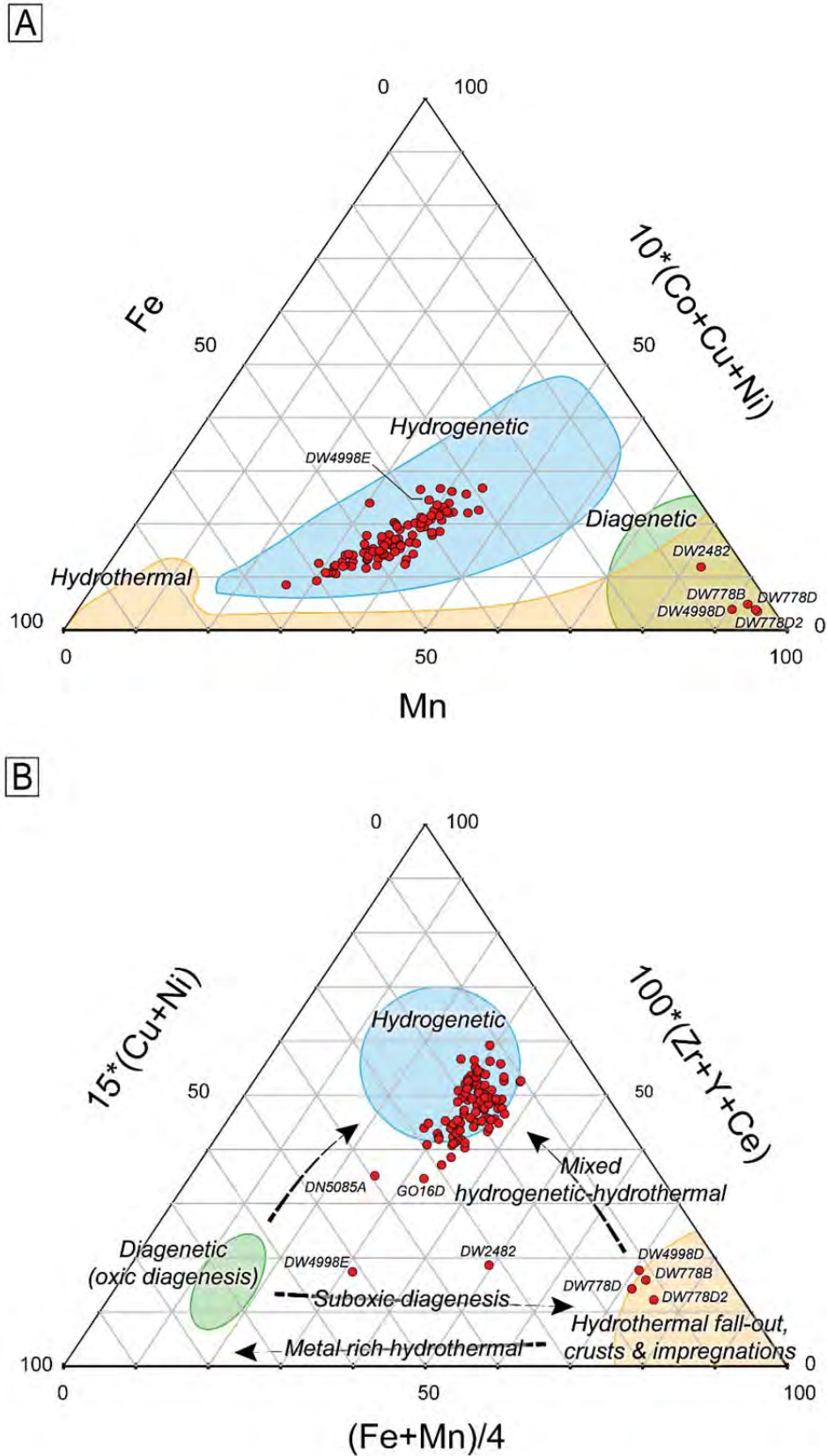


Figure 36. Diagrammes génétiques des minéralisations Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie d'après (A) [Enrico et al., 1972] et (B) [Josso et al., 2017].

5.3.2 Encroûtements hydrogénés

La composition chimique de chaque échantillon est compilée en Annexe 1, et les moyennes dans la Table 3. Sur l'ensemble des échantillons d'encroûtement hydrogénés bulk et sous-échantillons ($n=98$), Fe et Mn varient respectivement entre 13,95% et 24,06% (moyenne de 20,79%), et entre 7,73% et 26,90% (moyenne de 17,37%). Le rapport Fe/Mn est compris entre 0,65 et 2,45 (moyenne de 1,26), indiquant la présence d'encroûtement avec un fort fractionnement entre Fe et Mn (possiblement hydrothermal), et une majorité d'encroûtement d'origine hydrogénétique (rapport Fe/Mn moyen proche de 1). Le cumul des éléments d'intérêt économique principaux (Ni, Cu et Co) varie entre 0,25% et 1,62% (sur la Ride des Loyauté). Le Co varie entre 0,12% et 1,01% (moyenne de 0,42%), avec des valeurs globalement élevées au sud de la Grande-Terre (entre la Ride de Norfolk et la Ride des Loyauté). Plusieurs fortes concentrations en Co sont aussi associées à des concentrations élevées en Ni (comprises entre 0,09% et 0,61%, pour une moyenne de 0,31%). Cependant les fortes concentrations en Cu (comprises entre 340 ppm et 2 333 ppm avec une moyenne à 775 ppm) ne sont pas corrélées avec des concentrations élevées en Co et Ni. Les autres éléments ayant un possible intérêt économique sont (valeur moyenne) : 430 ppm Mo, 60 ppm Nb, 665 ppm Zn, 0,15% Pb, 0,66 ppm Pt. D'autres éléments présentent également une concentration élevée : 751 ppm V, 100 ppm Tl, 1 500 ppm Ba et 1 482 ppm Sr.

La phase détritique est particulièrement élevée dans les encroûtements de Nouvelle-Calédonie, avec 6,15% Si et 1,63% Al, cependant les éléments secondaires généralement associés à cette phase ne sont pas présents en fortes concentrations : 0,42% K, 1,56% Na et <5 ppm Rb. Le rapport Si/Al varie de 1,10 à 6,74, pour une moyenne de 3,76. Ces valeurs sont dans la norme des encroûtements Fe-Mn, généralement compris entre 2,37 et 6,09 [Hein *et al.*, 2000]. La concentration moyenne en P est de 0,57% pour les encroûtements hydrogénés, avec une valeur max de 1,46% indiquant possiblement un épisode diagénétique (les autres valeurs sont dans la norme).

Table 3. Composition moyenne des encroûtements hydrogénés et hydrothermaux normalisées à 0% H₂O.

Elément	Encroûtements hydrogénés			Minéralisations hydrothermales et/ou diagénétiques					
	N	Moyenne	$\pm 2\sigma$	DW778B	DW778D	DW778D2	DW4998D	DW4998E	DW2482
(H ₂ O) (%)	85	10,26	11,93	0,42	0,36	0,82	0,6	2,61	1,59
LOI	85	17,98	4,60	17,34	17,76	17,36	21,46	21,35	18,91
Mn	98	17,37	7,18	50,38	48,37	48,82	28,96	14,03	38,44
Fe	98	20,79	3,57	1,27	1,59	1,28	1,82	13,67	2,8
Si	98	6,15	5,98	0,49	0,53	0,51	0,35	1,07	0,29
Al	98	1,63	1,50	0,25	0,27	0,23	0,28	1,99	0,57
Mg	98	1,28	0,69	0,99	0,92	0,8	1,25	3,58	2,31
Na	98	1,56	0,42	0,42	0,32	0,21	0,3	0,42	0,84
Ca	98	2,61	1,69	6,21	7,54	8,14	17,79	13,52	8,67
K	98	0,42	0,29	0,2	0,13	0,11	0,13	0,2	0,37
Ti	98	0,90	0,36	0,05	0,08	0,06	0,05	0,17	0,1
P	98	0,57	0,31	0,53	0,41	0,37	1,88	1,97	1
As (ppm)	98	275	136	71	72	59	63	260	89
Ba	98	1500	560	8460	4946	3339	4151	869	11719
Ce	98	711	384	148	112	81	86	221	275

Co	98	4188	3762	514	898	655	405	1409	1148
Cr	85	45	78	<10	<10	<10	<10	35	12
Cu	98	775	611	283	242	187	108	655	295
La	98	239	88	88	105	96	74	80	88
Mo	98	430	268	168	141	128	82	410	228
Nb	98	60	26	5	10	7	7	18	15
Nd	98	150	66	30	30	30	30	30	30
Ni	98	3100	2185	1095	1432	1178	736	6936	4138
Pb	98	1544	1176	219	359	257	171	322	349
Pt ^C	46	0,66	0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Rb	98	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	7	< 5
Sr	98	1482	550	1858	1440	1261	1119	719	2656
Tl	98	100	112	77	75	61	43	78	141
V	98	751	336	271	263	214	289	796	525
Y	98	165	66	62	65	61	68	74	41
Zn	98	665	235	182	201	111	161	459	589
Zr	98	535	170	73	73	61	39	91	73
Co+Cu+Ni (%)	98	0,81	0,56	0,19	0,26	0,20	0,12	0,90	0,56
Si/Al	98	3,76	2,37	1,96	1,96	2,22	1,25	0,54	0,51
Fe/Mn	98	1,26	0,66	0,03	0,03	0,03	0,06	0,97	0,07

5.3.3 Encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques

En plus d'une morphologie distincte, les encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques se distinguent des encroûtements hydrogénés par des concentrations chimiques différentes. Pour ces échantillons, le fractionnement Fe/Mn est particulièrement faible (moyenne de 0,20, alors qu'il est de 1,38 pour les encroûtements hydrogénés), avec des concentrations moyennes en Mn et Fe respectivement de 38,17% et 3,74%. Les éléments 0,54% Si, 0,60% Al, 0,42% Na, 0,19% K, 0,085% Ti, 102 ppm As, 154 ppm Ce, 838 ppm Co, <10 ppm Cr, 295 ppm Cu, 88,5 ppm La, 192 ppm Mo, 10 ppm Nb, 30 ppm Nd, 2586 ppm Ni, 280 ppm Pb, 393 ppm V, 62 ppm Y, 284 ppm Zn et 68 ppm Zr sont tous significativement plus bas que les moyennes des encroûtements hydrogénés. Alors que 10,31% Ca, 55801 ppm Ba et 1 509 ppm Sr sont eux plus élevés dans les encroûtements anormaux. Les valeurs de 19,03% LOI et Mg 1,64% % sont proches pour les deux groupes d'encroûtements. Pour DW4998D, DW778D, DW778D2 et DW778B Mn est élevée (entre 28,96% et 50,38%), mais aucun autres éléments traces ne montre une concentration plus élevée que la normal. DW2482, comme les échantillons précédant, montre un Mn fort (38,44%), un Fe faible (2,8%), mais également une forte concentration en Ba (1,2%), Ni (0,41%) et dans une moindre mesure en Co (0,1%). Les concentrations en Mo, Cr, Cu et Zn restent dans la norme. Ces observations laissent penser qu'un facteur d'enrichissement doit expliquer la concentration en certains éléments traces pour DW2482 (notamment en Ni). KANADEEP 4998E présente une morphologie différente des encroûtements hydrogénés et possède des caractéristiques plus proches d'un mix entre le pôle hydrothermal et hydrogénés. Mn et Fe ont des valeurs proches (14,03% et 13,67%), plutôt caractéristique d'une origine hydrogénétique. Ca et P sont particulièrement élevés (13,52% et 1,97%) du fait de la minéralogie particulière de l'échantillon (calcite et fluoroapatite). L'élément le plus enrichi est Ni (0,7%). Cependant le Ba qui est enrichi fortement dans tous les encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques, ne présente dans cet échantillon aucun enrichissement par rapport aux encroûtements hydrogénés (869 ppm).

5.3.4 Composition en Terre rares (REE)

Dix-sept échantillons d'encroûtement hydrogéné ont été sélectionnés et analysés à l'ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) afin d'étudier la composition et la répartition des terres rares (les données sont compilées dans la Table 4). Les spectres de terres rares normalisés aux PAAS (*Post-Archean Australian Shale*) permettent de comparer les enrichissements et appauvrissement des REE par rapport à des valeurs normées. La Figure 37A illustre les teneurs élevées en terres rares des encroûtements Fe-Mn, notamment le Ce ainsi que les terres rares moyennes/lourdes. Le diagramme de la Figure 37B permet, à partir des concentrations en Ce, Y et Ho, de discriminer le phénomène de croissance principal des minéralisations Fe-Mn (hydrogénétique, diagénétique ou hydrothermal). Ici tous les échantillons de Nouvelle-Calédonie tombent bien dans le domaine hydrogéné, ce qui confirme les observations macro et microscopiques.

Table 4. Composition en terres rares des 17 échantillons d'encroûtements hydrogénés.

	Prof. (m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REY	%HREE (Eu-Lu+Y)
DR102	2525	169	557	26	117	24	6	29	4	27	149	6	17	4	16	3	1155	23
DR105	2498	187	612	32	133	27	7	31	5	28	140	6	17	4	16	2	1248	20
DR108	2080	192	690	34	142	29	8	35	5	33	164	7	20	4	19	3	1385	21
DR117	1800	216	545	34	142	28	7	35	5	34	215	8	22	4	21	3	1319	27
GO14D	1450	289	862	45	173	35	9	38	6	35	162	7	20	4	18	3	1705	18
GO202	2425	205	741	37	149	31	8	35	5	33	163	7	21	4	19	3	1461	20
GO209	1310	210	523	34	141	28	7	34	5	33	206	8	23	4	21	3	1281	27
GO314D10	3120	138	392	24	110	23	6	29	4	26	125	6	16	3	15	2	919	25
GO316	3200	148	411	26	114	24	6	29	4	27	142	6	17	4	16	2	975	26
GO317D10	3200	151	522	32	135	30	8	35	5	32	153	7	19	4	17	3	1154	25
GO321D1	4190	135	535	25	111	24	6	28	4	27	135	6	17	4	16	3	1077	23
GO322	3680	199	763	40	161	35	9	37	6	33	153	7	19	4	17	3	1485	19
GO323	4180	166	972	29	125	26	6	28	4	25	114	5	14	3	13	2	1535	14
GO325	4000	177	809	38	152	34	8	36	6	33	138	7	19	4	18	3	1482	18
GO338D2	1600	202	715	30	136	27	7	33	5	32	186	7	21	4	19	3	1426	22
GO347	2070	181	638	26	120	23	6	29	4	29	191	7	20	4	18	3	1299	24
Moyenne	2751	186	643	32	136	28	7	33	5	31	156	7	19	4	17	3	1307	22
2σ	1945	75	323	12	36	8	2	7	1	7	57	1	5	1	4	1	426	7

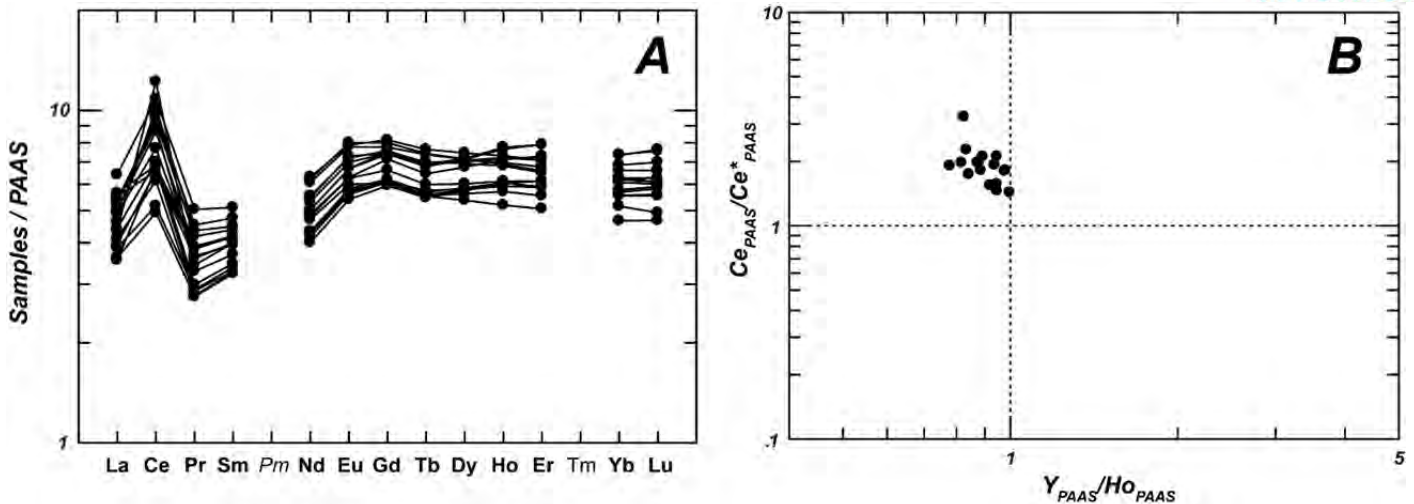


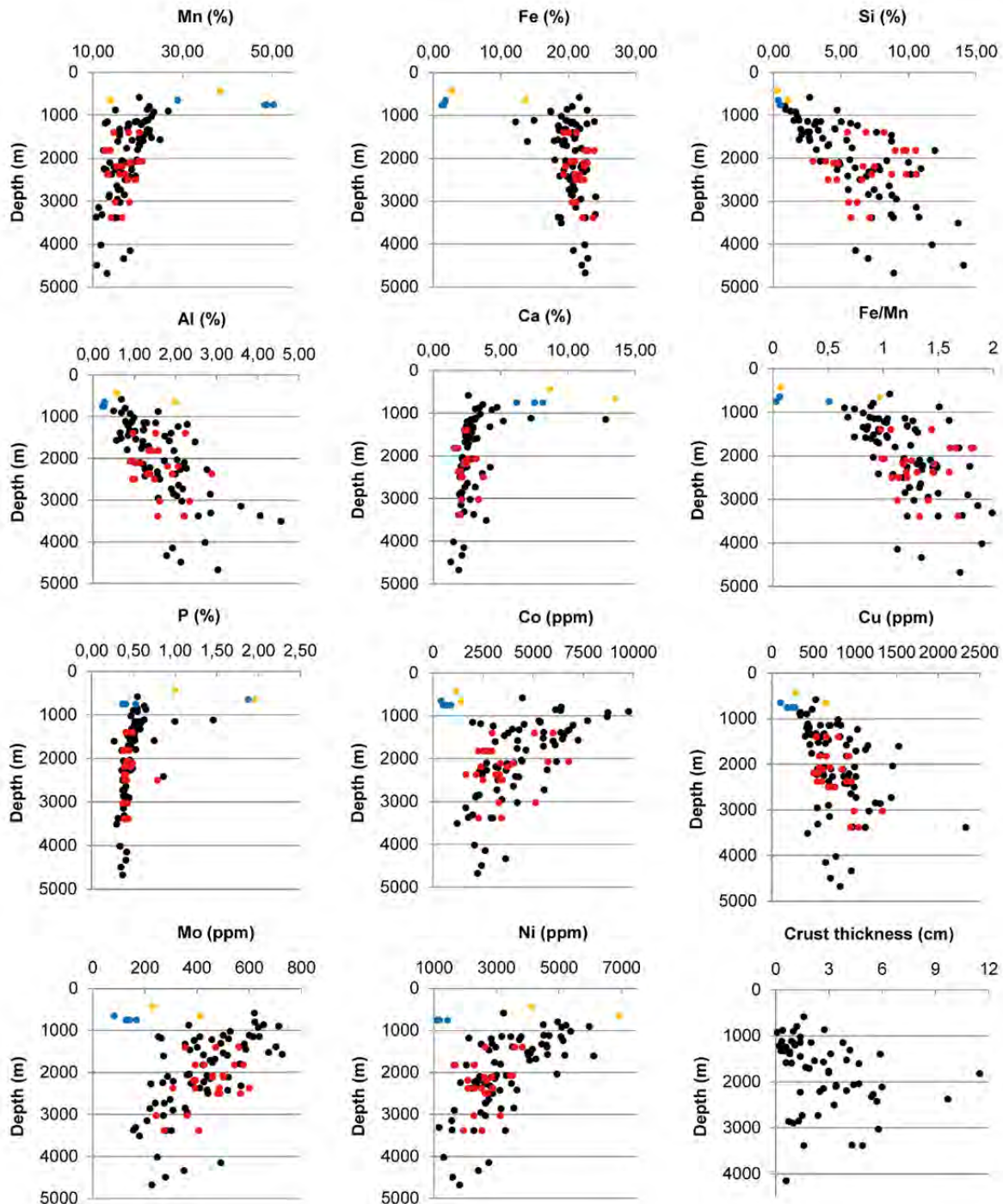
Figure 37. (A) Spectres de terres rares normalisés aux PAAS; (B) Diagramme génétique Ce/Ce* sur Y/Ho.

5.4 Impact de la profondeur sur les concentrations

Les variations des concentrations en métaux dans les encroûtements Fe-Mn hydrogénés suivant la profondeur de dragage ont été démontrées dans plusieurs études [Aplin and Cronan, 1985; Halbach et al., 2017; Hein et al., 1997; Josso et al., 2021; Muiños et al., 2013; Verlaan and Cronan, 2021]. Cela est particulièrement vrai pour le Co et Ni, deux métaux de grande importance économique, dont les concentrations diminuent fortement avec l'augmentation de la profondeur (ces deux métaux étant généralement associés à la phase MnO₂).

Cette observation est retrouvée dans les encroûtements de Nouvelle-Calédonie, où les profils pour le Co et le Ni montrent des valeurs maximums autour de 1 000 m de (Co : 1%, Ni : 0,6%), puis diminuent avec la profondeur (Figure 38). Les variations des concentrations en métaux dans les encroûtements Fe-Mn suivant la profondeur de dragage ont été démontrées dans plusieurs études [Aplin and Cronan, 1985; Halbach et al., 2017; Hein et al., 1997; Josso et al., 2021; Muiños et al., 2013; Verlaan and Cronan, 2021]. Cela est particulièrement vrai pour le Co et Ni, deux métaux de grande importance économique, dont les concentrations diminuent fortement avec l'augmentation de la profondeur (ces deux métaux étant généralement associés à la phase MnO₂). Cette observation est retrouvée dans les encroûtements de Nouvelle-Calédonie, où les profils pour le Co et le Ni montrent des valeurs maximums autour de 1 000 m de (Co : 1%, Ni : 0,6%), puis diminuent avec la profondeur (Figure 38). Ces variations sont à mettre en relation avec le phénomène de limite du minimum d'oxygène, zone source principale de Mn, et généralement compris entre 800 m et 1 500 m. Bien que corrélé avec le Co et le Ni, le Mn décroît de manière moins marquée avec la profondeur. Les valeurs de Mn sont maximums autour de 1 000 m, comprises entre 20% et 30%, et diminuent légèrement jusqu'à atteindre des valeurs situées autour de 15%. A noter que les éléments classiquement associés à MnO₂ : Mo, Pb, Zn, V et Sr, montrent aussi des profils décroissants en fonction de la profondeur. Contrairement aux Co, Ni, et Mn, les valeurs de Fe sont plus ou moins constantes avec la profondeur et centrées autour de 20%, impliquant un ratio Fe/Mn décroissant. Le Cu montre des concentrations croissantes avec la profondeur, 500 ppm à 1 000 m, puis 1 250 ppm à 3 000 m, marquant l'opposition par rapport à Fe, élément avec lequel il est généralement

associé. Les éléments majeurs constituant la phase détritique (Si, Al, et K) ont une bonne corrélation avec la profondeur. En effet, les valeurs passent respectivement de 2%, 0,7% et 0,25% à 1 000 m de profondeur, jusqu'à 9%, 2,25% et 0,55% à 3 000 m. Les comportements proches du Cu et de la phase détritique laissent penser qu'une corrélation doit exister entre les deux. Les éléments classiquement associés à la phase détritique Na et Ti montrent également une croissance de leurs concentrations avec la



profondeur, alors que V, Cr et Mg sont anti-corrélés avec la profondeur.

Figure 38. Variation des concentrations en quelques métaux avec la profondeur de dragage (les points noirs sont les échantillons bulks, les points rouges les sous-échantillons, les points bleus DW778D, DW778D2 et DW4998D, les points jaunes sont DW2482 et DW4998E).

5.5 Corrélations statistiques des éléments chimiques

5.5.1 Matrice de corrélation

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour analyser statistiquement les variations en éléments chimiques majeurs et mineurs des échantillons d'encroûtements hydrogénés. Une matrice de corrélation de Pearson a été calculée en utilisant les éléments chimiques des échantillons bulk et sous échantillons hydrogénés ($n=89$), afin d'évaluer la force des relations linéaires inter-éléments. Les échantillons bulk qui ont été sous-échantillonnés n'ont pas été considérés pour éviter les duplicatas. Tous les coefficients de corrélation en gras sont significatifs à 99% ou plus. En plus de 27 éléments chimiques, l'analyse comprend comme variable la vitesse de croissance (voir partie 5.6) et le rapport Fe/Mn (Table 5).

En se basant sur les coefficients de corrélation inter-éléments, ainsi que sur les phases minérales identifiées au XRD et SEM, il est possible de distinguer plusieurs grandes phases minéralogiques où se distribuent les éléments chimiques : une phase représentant les oxydes de Mn (δ -MnO₂) contient les éléments Mn, Mo, Sr, Ti, Pb, Co, La, Ni, V, As, Y, Nd, Nb et Zn; un groupe d'élément contenant Fe et Zr est considéré comme les oxyhydroxydes de Fe; une phase biogénique résiduelle regroupe Ba, Zn et Ce; ainsi qu'une phase aluminosilicatée comprenant Si, Al, Na, K, Cu et Zr fortement anti-corrélée à δ -MnO₂ et FeOOH. Il n'a pas été possible de distinguer clairement une phase de fluoroapatite de la phase résiduelle biogénique, car seuls 2 échantillons (CP5069 et DN5080B) contiennent de la fluoroapatite. La faible corrélation entre Ni, P et Ca pourrait être expliquée par la présence de 10 Å manganates et/ou 7 Å manganates associée à la fluoroapatite dans CP5069.

5.5.2 Analyse Factorielle

Une analyse factorielle a été menée sur les 89 échantillons d'encroûtement hydrogénés bulk et sous-échantillons afin de compléter les hypothèses établies à partir de la matrice de corrélation. Les objectifs de l'analyse factorielle sont de condenser un nombre important de variables autour de facteurs synthétisant au mieux les données et de révéler la structure des relations entre les variables (ce qui devient difficile avec la matrice de corrélation quand le nombre de variables est grand). Ces nouvelles variables, appelées facteurs principaux, sont indiquées en ordre décroissant de significativité, permettant de n'en retenir qu'un certain nombre. L'avantage de l'analyse factorielle est qu'elle prend en compte uniquement la covariance entre variables, les facteurs obtenus reflètent donc des phénomènes réels (contrairement à d'autre méthode comme l'ACP). Pour cette étude, l'analyse factorielle va être utile pour réduire le nombre important de variables (concentrations chimiques) et de tenter de dégager des grands axes en lien avec des phases minérales porteuses.

Quatre facteurs permettent d'expliquer 75% de la variance totale du jeu de données (Figure 39). Le facteur 1 représente 45,2% de la variance et est interprété comme étant δ -MnO₂, le facteur 2 compte pour 12,8% et représente les oxyhydroxydes de Fe, le facteur 3 correspond à une phase constituée de Fe (+As) et compte pour 10,3% de la variance, et le facteur 4 interprété comme étant Ti comptant pour 5,9%. Pour

chaque facteur, les éléments avec les scores les plus élevés sont : δ -MnO₂: Sr, Mn, Pb, Mo, Co, Ti, V, As, La, Ni, Zn, Y, P, Nb; oxyhydroxydes de Fe: Zr, Ce, Fe, Nd; Fe (+As): corrélations négatives avec Cu and Ti; Ti phase: corrélation négative avec Ba.

Table 5. Matrice de corrélation de Pearson pour les éléments et sous-échantillons hydrogénétiques (n=89)^a



	Mn	Fe	Si	Al	Mg	Na	Ca	K	Ti	P	As	Ba	Ce	Co	Cu	La
Mn	1	-0,364	-0,916	-0,831	0,090	-0,507	0,335	-0,643	0,258	0,458	0,610	0,355	0,344	0,832	-0,177	0,702
Fe	-0,364	1	0,233	-0,013	-0,552	0,007	-0,519	-0,079	-0,135	-0,246	0,048	0,015	0,121	-0,370	-0,271	0,057
Si	-0,916	0,233	1	0,801	-0,127	0,485	-0,494	0,675	-0,210	-0,540	-0,699	-0,268	-0,269	-0,797	0,264	-0,661
Al	-0,831	-0,013	0,801	1	0,127	0,578	-0,174	0,833	-0,100	-0,441	-0,713	-0,433	-0,487	-0,680	0,345	-0,778
Mg	0,090	-0,552	-0,127	0,127	1	-0,077	0,420	0,061	-0,148	0,109	0,083	-0,149	-0,240	0,197	0,075	-0,267
Na	-0,507	0,007	0,485	0,578	-0,077	1	-0,228	0,523	0,013	-0,350	-0,636	-0,387	-0,409	-0,566	0,338	-0,379
Ca	0,335	-0,519	-0,494	-0,174	0,420	-0,228	1	-0,291	-0,075	0,691	0,469	-0,030	-0,109	0,377	-0,221	0,055
K	-0,643	-0,079	0,675	0,833	0,061	0,523	-0,291	1	0,070	-0,434	-0,768	-0,186	-0,307	-0,583	0,554	-0,620
Ti	0,258	-0,135	-0,210	-0,100	-0,148	0,013	-0,075	0,070	1	-0,211	-0,307	0,324	0,373	0,347	0,255	0,440
P	0,458	-0,246	-0,540	-0,441	0,109	-0,350	0,691	-0,434	-0,211	1	0,630	0,269	0,100	0,342	-0,243	0,175
As	0,610	0,048	-0,699	-0,713	0,083	-0,636	0,469	-0,768	-0,307	0,630	1	0,189	0,250	0,602	-0,633	0,457
Ba	0,355	0,015	-0,268	-0,433	-0,149	-0,387	-0,030	-0,186	0,324	0,269	0,189	1	0,754	0,163	0,113	0,484
Ce	0,344	0,121	-0,269	-0,487	-0,240	-0,409	-0,109	-0,307	0,373	0,100	0,250	0,754	1	0,341	-0,012	0,619
Co	0,832	-0,370	-0,797	-0,680	0,197	-0,566	0,377	-0,583	0,347	0,342	0,602	0,163	0,341	1	-0,229	0,582
Cu	-0,177	-0,271	0,264	0,345	0,075	0,338	-0,221	0,554	0,255	-0,243	-0,633	0,113	-0,012	-0,229	1	-0,332
La	0,702	0,057	-0,661	-0,778	-0,267	-0,379	0,055	-0,620	0,440	0,175	0,457	0,484	0,619	0,582	-0,332	1
Mo	0,829	-0,110	-0,732	-0,855	-0,053	-0,552	0,154	-0,701	0,020	0,364	0,688	0,509	0,551	0,619	-0,366	0,774
Nb	0,480	-0,165	-0,485	-0,453	-0,011	-0,370	0,166	-0,324	0,697	0,108	0,187	0,329	0,398	0,680	0,042	0,508
Nd	0,403	0,159	-0,320	-0,526	-0,236	-0,260	-0,109	-0,447	0,280	0,023	0,280	0,401	0,611	0,293	-0,263	0,837
Ni	0,805	-0,640	-0,716	-0,549	0,486	-0,433	0,396	-0,399	0,091	0,395	0,462	0,206	0,173	0,754	0,073	0,302
Pb	0,820	-0,255	-0,804	-0,759	0,177	-0,624	0,366	-0,680	0,132	0,401	0,736	0,322	0,307	0,815	-0,359	0,596
Sr	0,891	-0,102	-0,894	-0,872	-0,080	-0,500	0,314	-0,754	0,186	0,435	0,736	0,404	0,393	0,750	-0,420	0,793
Tl	0,853	-0,529	-0,788	-0,625	0,238	-0,531	0,440	-0,457	0,332	0,445	0,506	0,417	0,403	0,819	-0,015	0,535
V	0,657	0,041	-0,681	-0,757	0,059	-0,608	0,247	-0,721	-0,205	0,419	0,875	0,399	0,467	0,579	-0,460	0,563
Y	0,533	0,030	-0,605	-0,562	-0,058	-0,308	0,195	-0,518	0,083	0,343	0,515	-0,057	-0,033	0,484	-0,561	0,542
Zn	0,514	-0,274	-0,472	-0,505	0,209	-0,387	0,175	-0,280	0,110	0,404	0,325	0,675	0,434	0,364	0,117	0,344
Zr	-0,426	0,455	0,461	0,259	-0,429	0,352	-0,589	0,350	0,339	-0,451	-0,636	0,103	0,055	-0,501	0,316	-0,019
Fe/Mn	-0,935	0,553	0,842	0,735	-0,182	0,357	-0,370	0,500	-0,298	-0,436	-0,439	-0,336	-0,274	-0,758	-0,027	-0,591
Growth rate^b	-0,616	0,330	0,570	0,519	-0,194	0,554	-0,297	0,489	-0,339	-0,233	-0,422	-0,116	-0,215	-0,794	0,134	-0,368

	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Sr	Tl	V	Y	Zn	Zr	Fe/Mn	Growth rate
Mn	0,829	0,480	0,403	0,805	0,820	0,891	0,853	0,657	0,533	0,514	-0,426	-0,935	-0,616
Fe	-0,110	-0,165	0,159	-0,640	-0,255	-0,102	-0,529	0,041	0,030	-0,274	0,455	0,553	0,330
Si	-0,732	-0,485	-0,320	-0,716	-0,804	-0,894	-0,788	-0,681	-0,605	-0,472	0,461	0,842	0,570
Al	-0,855	-0,453	-0,526	-0,549	-0,759	-0,872	-0,625	-0,757	-0,562	-0,505	0,259	0,735	0,519
Mg	-0,053	-0,011	-0,236	0,486	0,177	-0,080	0,238	0,059	-0,058	0,209	-0,429	-0,182	-0,194
Na	-0,552	-0,370	-0,260	-0,433	-0,624	-0,500	-0,531	-0,608	-0,308	-0,387	0,352	0,357	0,554
Ca	0,154	0,166	-0,109	0,396	0,366	0,314	0,440	0,247	0,195	0,175	-0,589	-0,370	-0,297
K	-0,701	-0,324	-0,447	-0,399	-0,680	-0,754	-0,457	-0,721	-0,518	-0,280	0,350	0,500	0,489
Ti	0,020	0,697	0,280	0,091	0,132	0,186	0,332	-0,205	0,083	0,110	0,339	-0,298	-0,339
P	0,364	0,108	0,023	0,395	0,401	0,435	0,445	0,419	0,343	0,404	-0,451	-0,436	-0,233
As	0,688	0,187	0,280	0,462	0,736	0,736	0,506	0,875	0,515	0,325	-0,636	-0,439	-0,422
Ba	0,509	0,329	0,401	0,206	0,322	0,404	0,417	0,399	-0,057	0,675	0,103	-0,336	-0,116
Ce	0,551	0,398	0,611	0,173	0,307	0,393	0,403	0,467	-0,033	0,434	0,055	-0,274	-0,215
Co	0,619	0,680	0,293	0,754	0,815	0,750	0,819	0,579	0,484	0,364	-0,501	-0,758	-0,794
Cu	-0,366	0,042	-0,263	0,073	-0,359	-0,420	-0,015	-0,460	-0,561	0,117	0,316	-0,027	0,134
La	0,774	0,508	0,837	0,302	0,596	0,793	0,535	0,563	0,542	0,344	-0,019	-0,591	-0,368
Mo	1	0,247	0,594	0,568	0,763	0,871	0,674	0,841	0,446	0,520	-0,399	-0,702	-0,399
Nb	0,247	1	0,243	0,366	0,554	0,469	0,554	0,197	0,295	0,356	0,045	-0,489	-0,595
Nd	0,594	0,243	1	0,070	0,293	0,455	0,248	0,388	0,298	0,146	0,125	-0,295	-0,185
Ni	0,568	0,366	0,070	1	0,684	0,584	0,844	0,530	0,242	0,581	-0,581	-0,859	-0,586
Pb	0,763	0,554	0,293	0,684	1	0,866	0,775	0,793	0,492	0,515	-0,578	-0,710	-0,609
Sr	0,871	0,469	0,455	0,584	0,866	1	0,709	0,789	0,624	0,488	-0,394	-0,770	-0,511
Tl	0,674	0,554	0,248	0,844	0,775	0,709	1	0,587	0,252	0,572	-0,556	-0,840	-0,651
V	0,841	0,197	0,388	0,530	0,793	0,789	0,587	1	0,371	0,487	-0,581	-0,506	-0,351
Y	0,446	0,295	0,298	0,242	0,492	0,624	0,252	0,371	1	0,098	-0,133	-0,430	-0,302
Zn	0,520	0,356	0,146	0,581	0,515	0,488	0,572	0,487	0,098	1	-0,192	-0,554	-0,207
Zr	-0,399	0,045	0,125	-0,581	-0,578	-0,394	-0,556	-0,581	-0,133	-0,192	1	0,401	0,356
Fe/Mn	-0,702	-0,489	-0,295	-0,859	-0,710	-0,770	-0,840	-0,506	-0,430	-0,554	0,401	1	0,579
Growth rate^b	-0,399	-0,595	-0,185	-0,586	-0,609	-0,511	-0,651	-0,351	-0,302	-0,207	0,356	0,579	1



^a Les valeurs en gras représentent les corrélations significatives à 99% ou plus; ^b Growth rate : Vitesse de croissance en mm/Ma.

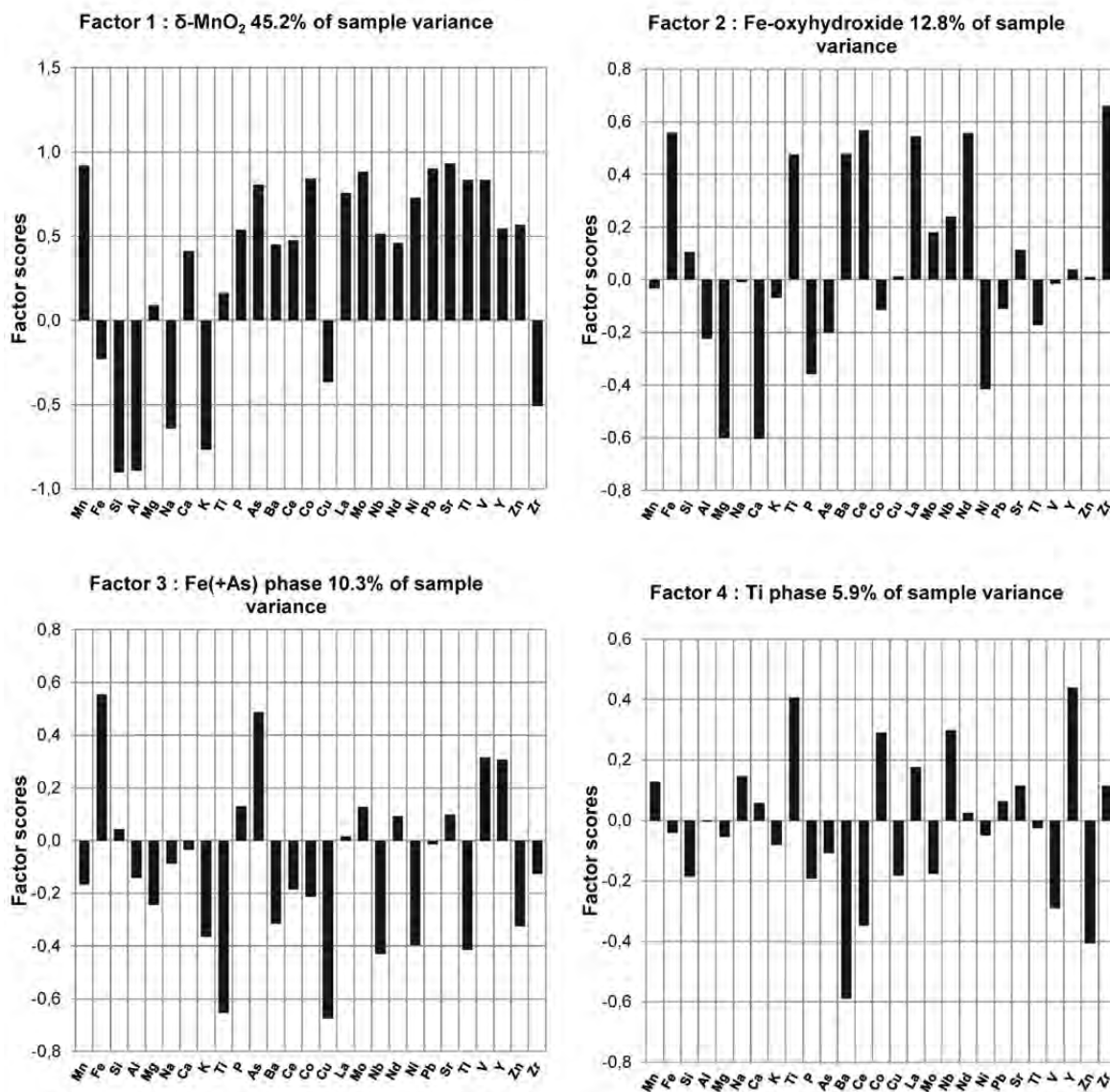


Figure 39. Histogrammes représentant les scores factoriels des éléments chimiques pour les 4 facteurs identifiés à partir de l'analyse factorielle.

Les associations minérales obtenues avec la matrice de corrélation et avec l'analyse factorielle présentent plusieurs différences majeures. En effet cette analyse permet de montrer qu'une phase dominante δ-MnO₂ regroupe les principaux éléments manganophiles (Mn, Ba, Co, Mo, Ni et Zn), plusieurs éléments issus des oxyhydroxydes de Fe (Pb, As, Nb et Y), ainsi que des éléments généralement partitionnés entre les deux groupes (Ti, La, Nd, Sr et V). Cette phase est aussi caractérisée par une forte anti-corrélation avec les éléments de la phase détritique aluminosilicaté Si, Al, Mg, Na, K, Cu et Zr. La phase des oxyhydroxydes de Fe à comme éléments principaux Zr, Ce et Nd, et fortement anti-corrélée avec les éléments biogéniques Ca, Mg et Ni. L'analyse factorielle n'a pas mis en avant de phase pour la fluoroapatite ou la composante biogénique résiduelle. Le dernier facteur est difficilement interprétable car seulement anti-corrélé de manière significative avec Ba. Une légère anti-corrélation avec Ba, Ce et Zn est à noter, indiquant possiblement une opposition avec une phase biogénique non reconnue. Le seul élément corrélé positivement pour cette phase est donc Ti.

5.5.3 Classification ascendante hiérarchique des échantillons (CAH)

Afin de compléter les analyses statistiques précédentes et les affinités élémentaires envers chaque phase minérale, il peut être intéressant d'utiliser une méthode de classification automatique des échantillons à partir des variables. Dans le domaine de l'analyse de données et des statistiques exploratoires, il existe plusieurs méthodes permettant de regrouper des observations sous forme de "*Cluster*" partageant des caractéristiques communes. Les deux principales familles sont les méthodes dites "Ascendantes" ou "Descendantes". Les méthodes ascendantes créent un ensemble en regroupant deux sous-ensembles existant, alors que les méthodes descendantes divisent un ensemble existant en plusieurs sous-ensembles. Dans le cas de cette étude, c'est la méthode appelée "Classification Ascendante Hiérarchique" (ou CAH) qui a été choisie pour le regroupement des échantillons.

Les objectifs de la CAH sont d'identifier des ensembles d'observations ayant des caractéristiques analogues. Cette classification s'intéresse à des tableaux de données/observations, définis par des variables quantitatives. Dans notre cas, les données/observations sont les échantillons d'encroûtement, et les variables sont les analyses chimiques (majeurs/mineurs), ainsi que les informations de localisations (latitude, longitude et profondeur).

Les échantillons sont classés suivant une "Classification Hiérarchique". Cette hiérarchie est basée sur un graphique raciné (appelée Dendrogramme) dont les feuilles sont les sous-ensembles partageant des caractéristiques proches et dont la racine est l'ensemble tout entier des données/observations. Suivant cette classification, chaque ensemble n'a qu'un ancêtre, sauf la racine qui n'en a pas. Les sous-ensembles sont placés en bas du dendrogramme, alors que la racine se situe en haut. Plus on se déplace dans la partie basse du graphique, plus le nombre de sous-ensembles augmente. La hiérarchie entre les données en entrée est établie grâce à une mesure de distance entre les observations, plus cette distance est petite plus les données ont des caractéristiques similaires. La distance la plus courte entre toutes les observations permet d'établir le premier sous-ensemble, l'opération est ensuite répétée en considérant le sous-ensemble comme une observation à part entière. C'est la répétition jusqu'à obtenir un ensemble unique contenant toutes les données qui permet de finaliser le dendrogramme. On peut ensuite choisir une partition en tronquant le dendrogramme à un seuil donné, en fonction des contraintes et des connaissances de l'utilisateur.

La CAH a été calculée avec le logiciel *XIStat* à partir de l'ensemble des échantillons de minéralisations ($n=104$). Les données ont été centrées et réduites pour éviter que l'échelle des variables n'influe sur les résultats. Le dendrogramme est présenté en Figure 40, le choix du nombre d'ensembles significatifs a été proposé automatiquement par *XIStat*, mais reste à accepter ou à réfuter par l'utilisateur en fonction de sa connaissance du jeu de données. La troncature automatique du dendrogramme distingue 3 ensembles (Figure 40) dont les individus peuvent être considérés comme significativement proches (en bleu, rouge et vert sur la Figure 40). Un premier ensemble en bleu est constitué de 6 échantillons, et montre une forte dissimilarité avec les autres ensembles (pas de nœuds communs avant le dernier ensemble). C'est 6 échantillons sont ceux identifiés dans les parties précédentes du rapport comme étant d'origine hydrothermale et/ou diagénétique. L'ensemble en rouge comporte 24 échantillons uniquement analysés en *bulk*. L'ensemble indiqué en vert contient les 74 échantillons restants, dont tous les sous-échantillons. Afin d'en apprendre plus sur les variables rapprochant les individus de ces ensembles, il est intéressant de regarder leurs barycentres. Le barycentre est un point géométrique moyen construit à partir d'un ensemble de points de l'espace. En statistiques, la moyenne pondérée d'un ensemble correspond au barycentre des

valeurs des individus. Dans notre cas, l'étude des barycentres permet d'observer les valeurs moyennes des variables pour chaque ensemble déterminé par CAH, et ainsi d'en comprendre les relations.

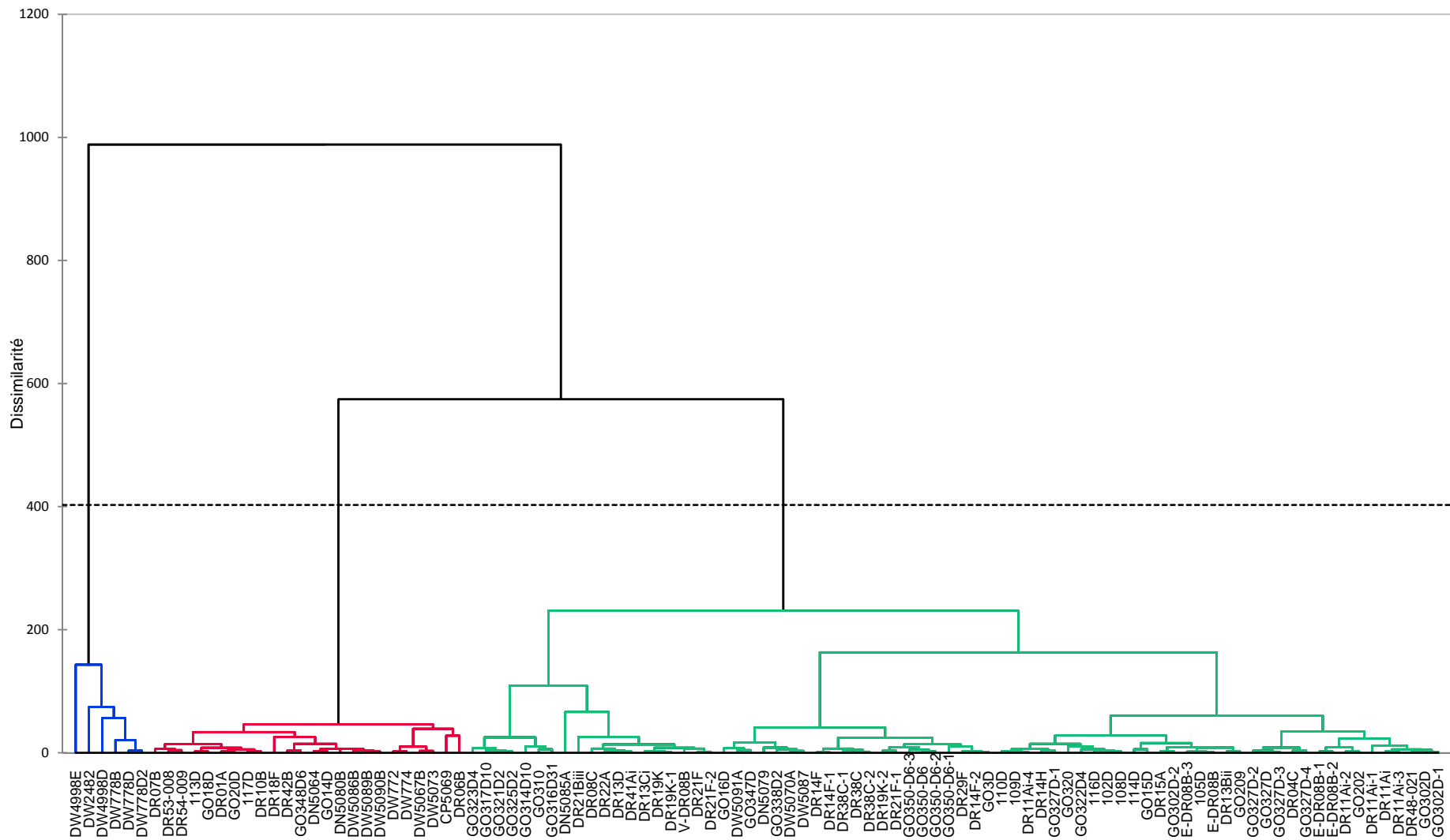


Figure 40. Dendrogramme calculé pour l'ensemble des échantillons de minéralisations Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie (n=104).

Table 6. Barycentres des variables pour les groupes identifiés (en gras les valeurs fortes)

Classe	Vert	Rouge	Bleu
Latitude	-21,558	-23,946	-24,277
Longitude	166,151	167,474	165,919
Profondeur	2419	1209	666
Mn (%)	15,987	21,645	38,167
Fe	21,02	20,06	3,74
Si	7,34	2,48	0,54
Al	1,87	0,91	0,60
Mg	1,23	1,44	1,64
Na	1,62	1,35	0,42
Ca	2,41	3,24	10,31
K	0,46	0,28	0,19
Ti	0,91	0,88	0,09
P	0,43	0,59	1,03
As (ppm)	247	364	102
Ba	1478	1566	5581
Ce	690	778	154
Co	3412	6581	838
Cu	837	585	295
La	230	265	89
Mo	381	578	193
Nb	58	66	10
Nd	149	155	30
Ni	2715	4286	2586
Pb	1290	2328	280
Sr	1375	1811	1509
Tl	78	166	79
V	685	953	393
Y	158	189	62
Zn	638	749	284
Zr	567	436	68
Fe/Mn	1,36	0,95	0,28
Gra	2,80	1,12	48,96

L'ensemble bleu montre bien des caractéristiques propres aux encroûtements hydrothermaux et/ou diagénétiques, avec comme variables fortes Mn, Mg, Ca, P, Ba et la vitesse de croissance (Gra, voir partie 5.6), et comme variables faibles les éléments traces Co, Mo, Zn, Ni, Pb. Les individus de l'ensemble rouge quant à eux sont concentrés en As, Ce, Co, La, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Sr, Tl, V, Y et Zn et faibles en Si, Al, K, Mg, Na, Ca et Zr. L'ensemble vert est enrichi en Fe, Si, Al, Na, K, Ti, Cu, Zr et globalement appauvri en éléments traces par rapport à l'ensemble rouge (à noter que Gra est plus fort pour cet ensemble).

En termes de répartition à l'échelle de la ZEE, on peut voir qu'une majorité des échantillons du groupe vert sont situés dans la partie nord de la ZEE, le reste étant plus au sud dans la continuité de la Ride des Loyauté (Figure 41). Cette observation est expliquée par la profondeur de dragage plus importante pour ces échantillons, et/ou par une concentration en éléments traces plus faibles que pour les autres échantillons. A noter que l'épaisseur moyenne pour ce groupe est de 32 mm. Les échantillons avec un caractère hydrogéné marqué (éléments traces élevés) sont principalement regroupés au sud de la Grande-Terre et sur les Chesterfields, sur la Ride de Fairway et en bordure Sud du Bassin d'Entrecasteaux, à des profondeurs moindres que le groupe vert. Les échantillons du groupe bleu regroupent les encroûtements

hydrothermaux et/ou diagénétiques et sont retrouvés sur la Ride des Loyauté (mont K), et sur les édifices volcaniques de la Ride de Lord Howe.

Ces résultats vont dans le sens d'une dualité au sein des encroûtements hydrogénés, avec un groupe d'encroûtement (rouge) situé à proximité ou sous l'OMZ (~1 200 m), dont les caractéristiques hydrogénétiques pures sont exacerbées (fortes concentrations en éléments traces, composante détritique faible, épaisseur faible), et un autre groupe d'encroûtements (vert) localisés à plus grande profondeur (> 2 000 m) où la composante détritique aluminosilicaté et le fractionnement Fe/Mn sont plus forts, mais avec un appauvrissement en éléments traces.

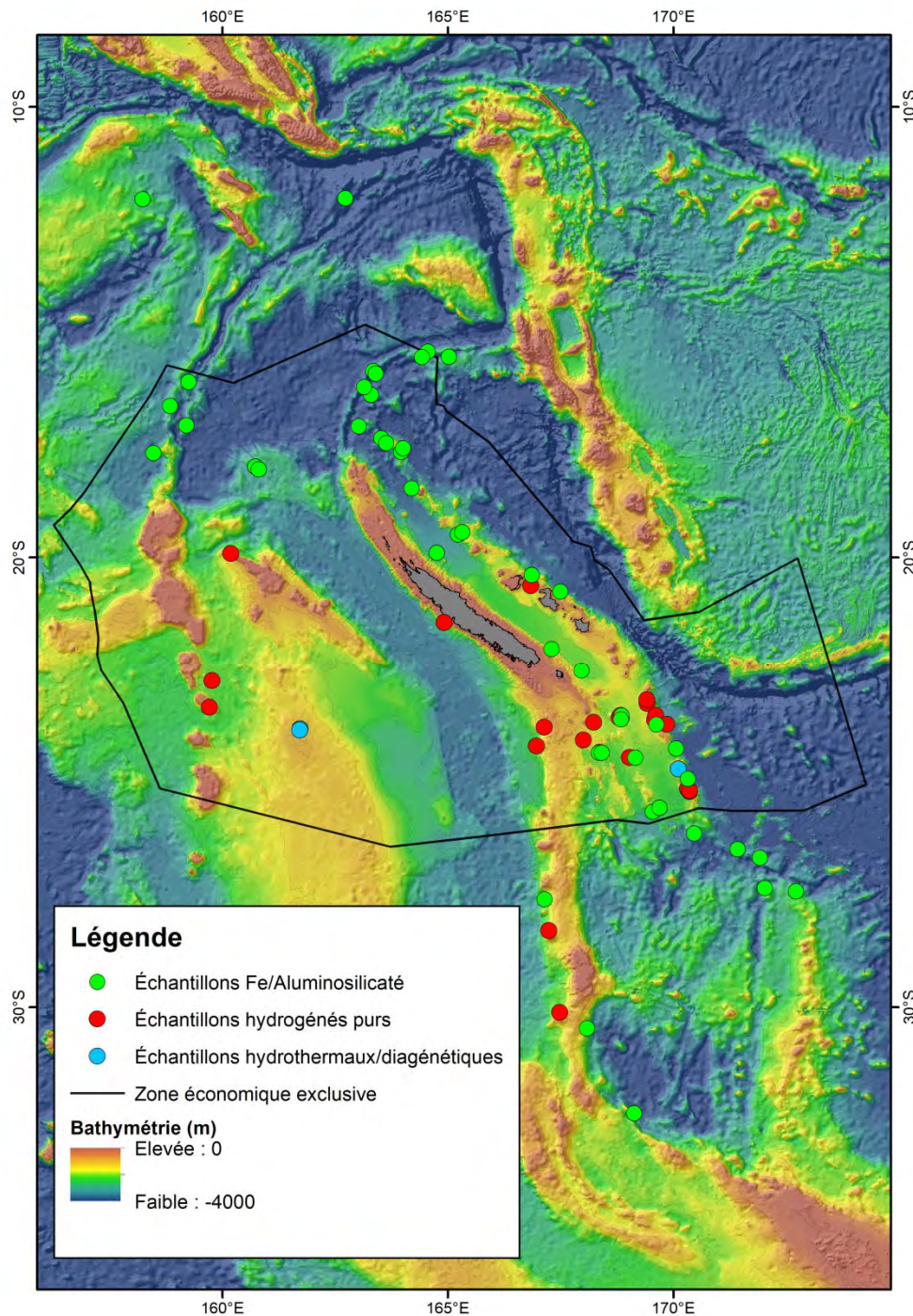


Figure 41. Répartition des échantillons suivant les groupes de la CAH

5.6. Vitesse de croissance et âge de début de précipitation

Les vitesses de croissance des encroûtements ont été calculées en utilisant le géochronomètre empirique basé sur la concentration en Co des encroûtements (d'après [Manheim and Lane-Bostwick, 1988]). L'équation est définie comme : $GR=0.68/(Co^n)^{1,67}$, où GR est la vitesse de croissance en mm/Ma, et $Co^n=Co \times (50/Fe+Mn)$ avec les teneurs en wt.%. Cette méthode considère que l'apport en Co dans l'océan est constant au cours du temps et que les oxydes et oxyhydroxydes de Fe et Mn en sont les principaux capteurs. En considérant ces hypothèses, il est possible de calculer une relation proportionnelle entre ces concentrations (Co, Mn et Fe) et la vitesse de croissance. A partir de l'épaisseur moyenne de l'encroûtement, il sera ensuite possible de remonter à un âge minimum de début de précipitation. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les possibles hiatus et phénomènes de remobilisation post-dépôt comme la phosphatisation, dissolution ou l'érosion qui sont connus pour affecter les concentrations en Co [Hein et al., 1993; Josso et al., 2021; Koschinsky et al., 1997].

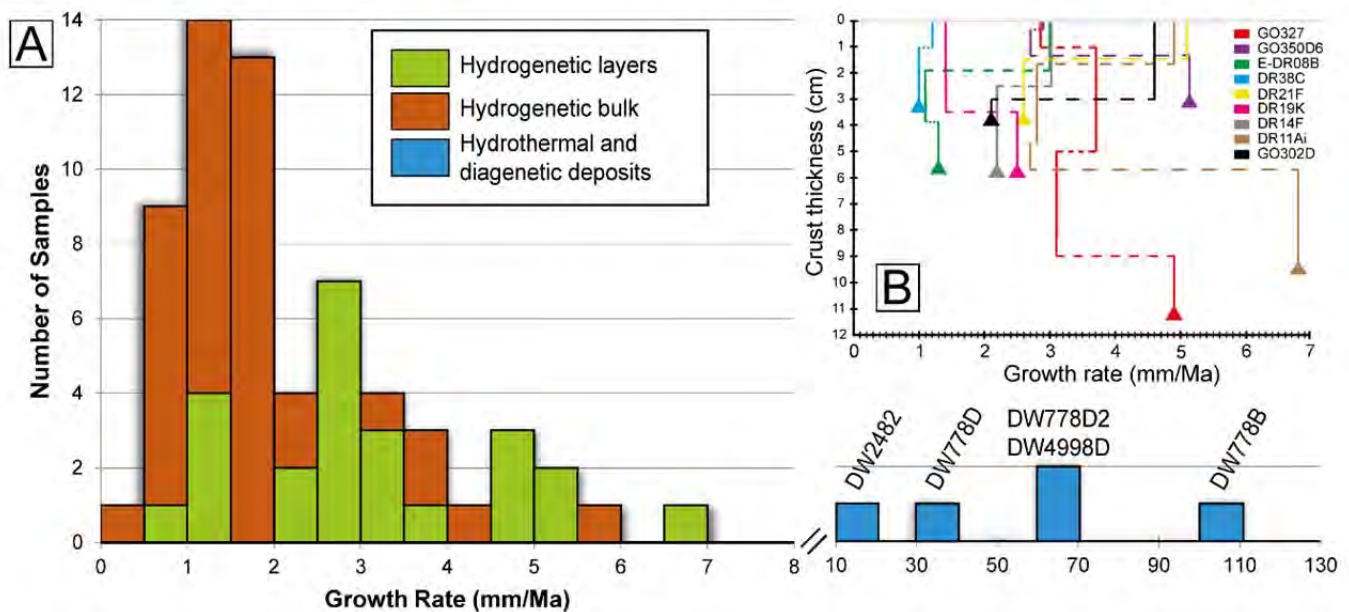


Figure 42. (A) Histogramme des vitesses de croissance pour les différents types d'échantillons; (B) Graphique des vitesses de croissance en fonction de l'épaisseur d'encroûtement pour les sous-échantillons.

Les vitesses de croissance des encroûtements de Nouvelle-Calédonie sont comprises entre 0,45 et 102 mm/Ma (Figure 42). Les échantillons analysés en bulk ont une vitesse de croissance moyenne de

2,2 mm/Ma, alors que pour les sous-échantillons des encroûtements épais cette valeur est de 3,1 mm/Ma. Les variations stratigraphiques au sein d'un même échantillon montrent une augmentation de la vitesse de croissance dans leurs parties la plus récente (sauf DR19K). Les encroûtements les plus épais, avec 3 ou 4 sous échantillons, montrent une vitesse de croissance élevée dans les couches les plus basales (DR11Ai-1: 6,8 mm/Ma et GO327D-1: 4,9 mm/Ma), suivie par une période de décroissance et un accroissement final des vitesses dans les parties les plus externes. Les minéralisations hydrothermales et/ou diagénétiques ont des vitesses de croissance beaucoup plus élevées, ici respectivement 18,3, 38, 64 64,7 et 102 mm/Ma pour DW2482, DW778D, DW778D2 et DW778B, ce qui est cohérent avec leur origine hydrothermale ou diagénétique. En considérant les épaisseurs moyennes de ces échantillons, les âges minimums de début de précipitation sont compris entre 0,79 et 34,31 mm/Ma (Figure 43).

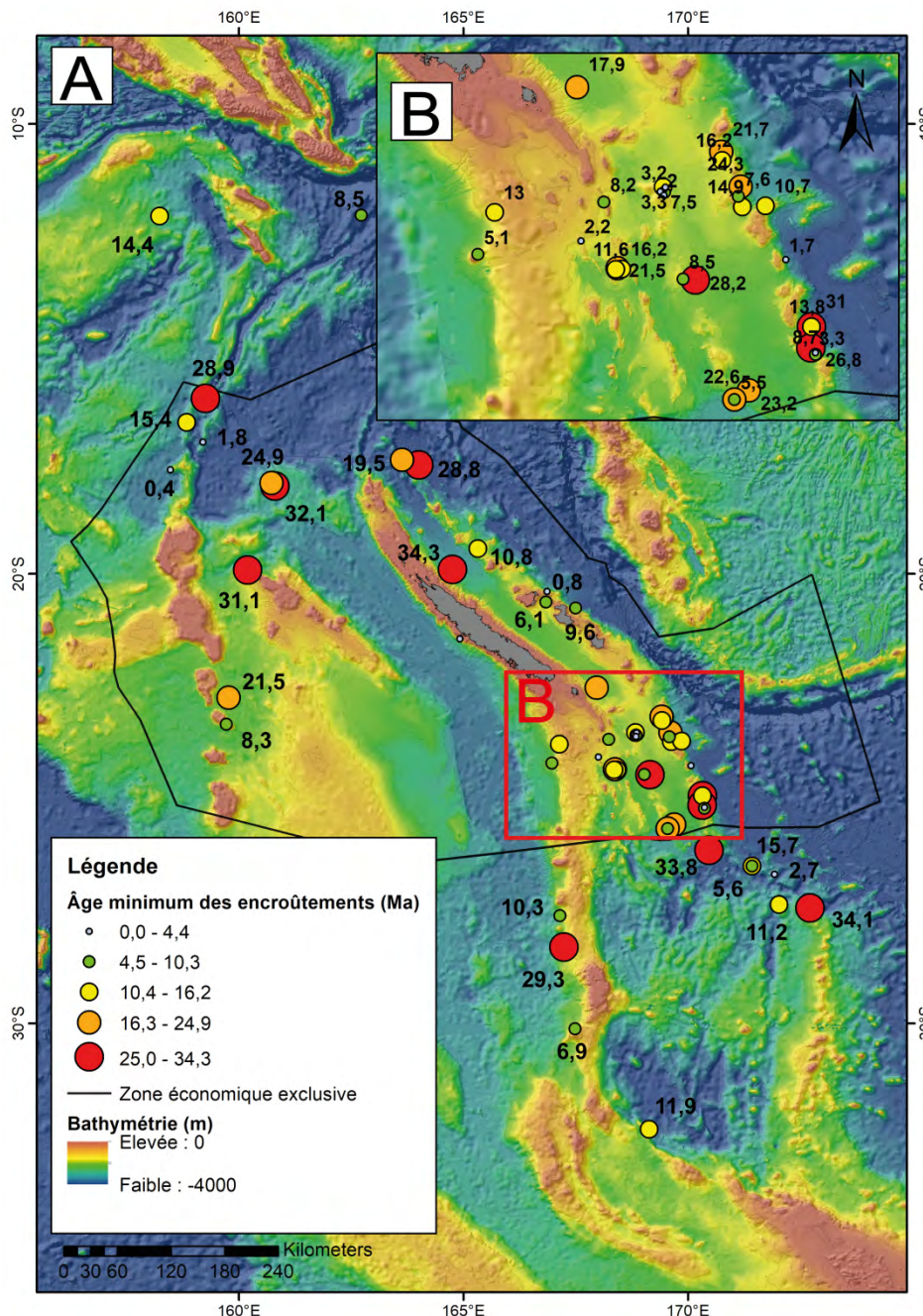
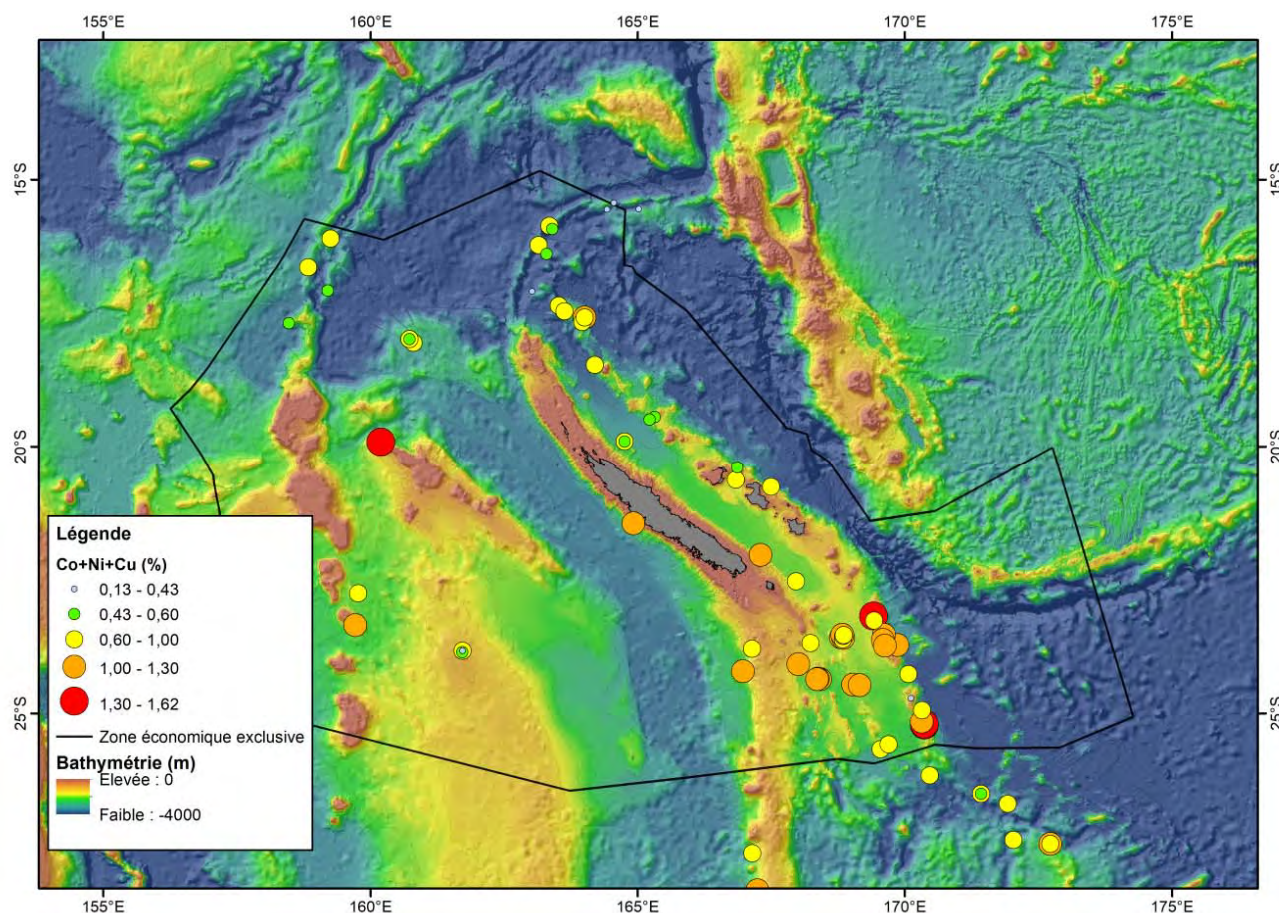


Figure 43. (A) Age des encroûtements en Ma à l'échelle du Sud-Ouest Pacifique; (B) Age des encroûtements en Ma au Sud de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

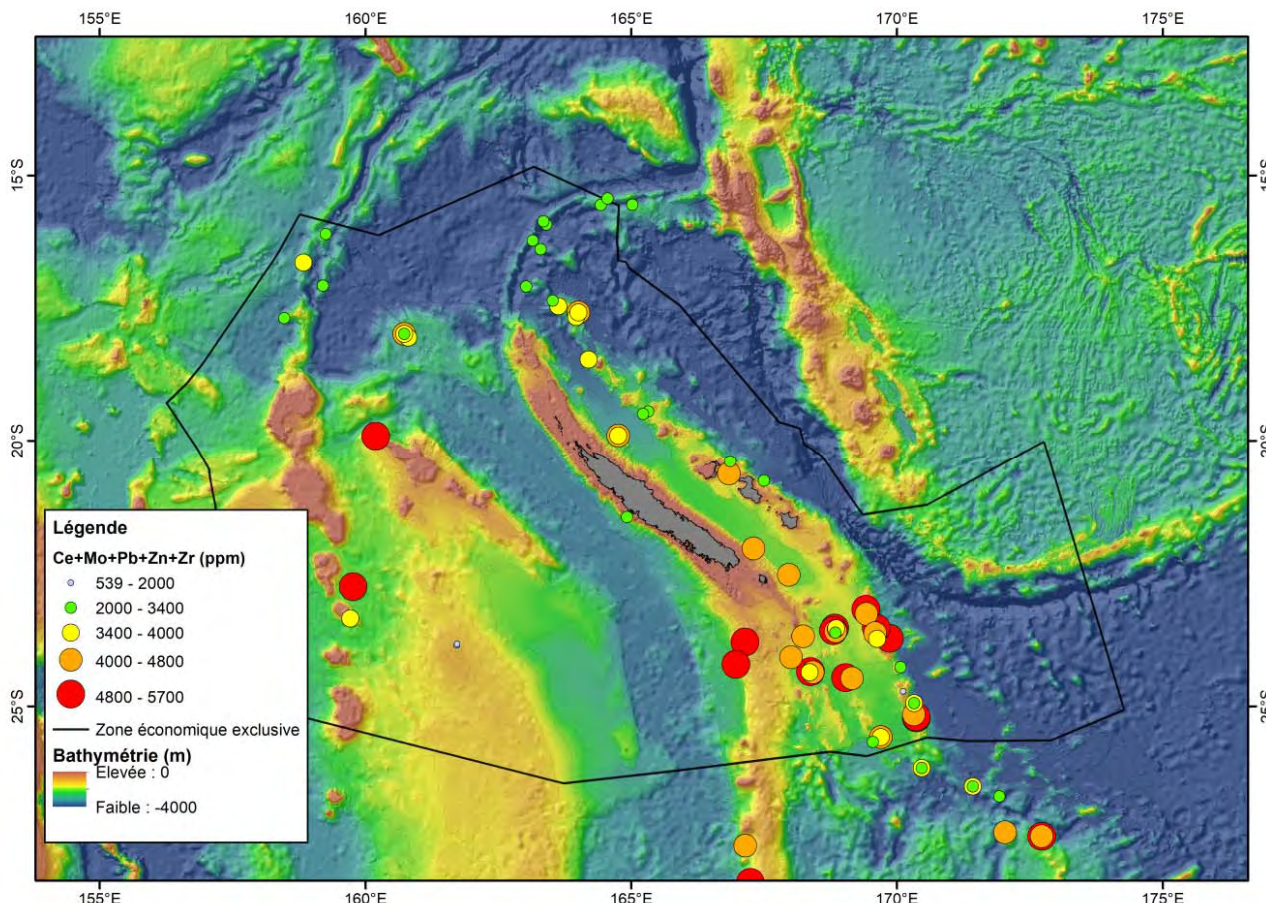
Les encroûtements Fe-Mn les plus anciens sont plutôt bien répartis dans la ZEE, au Nord en Bordure du bassin D'Entrecasteaux, sur la Ride de Fairway et au Sud dans la continuité de la Ride de Norfolk et de la Ride des Loyauté. Les édifices géologiques anciens comprennent globalement les encroûtements les plus épais, cependant on peut observer une forte variation des âges au sein d'un même édifice, et même pour des dragues relativement proches. Ce constat montre que l'environnement de dépôt est particulièrement important pour la croissance d'un encroûtement, qu'il peut être très variable même localement, et qu'il aura une forte influence sur la quantité de métaux captés.

5.7. Répartition des éléments économiques au sein de la ZEE

L'échantillonnage au sein de la ZEE permet d'obtenir un large panel d'encroûtements sur des substrats variés et localisés sur des édifices géologiques multiples et variés (rides, monts sous-marins, etc.). La densité d'échantillonnage dans certaines zones est relativement forte, notamment au Sud de la Grande-Terre sur les rides des Loyauté et de Norfolk, alors que pour d'autres la densité est beaucoup plus faible,



comme par exemple la majorité de la partie Ouest de la ZEE. Cette différence est expliquée par un nombre de campagnes marines plus important dans ces zones, mais également par des environnements moins



favorables à la présence d'encroûtements. Ce biais d'échantillonnage à l'échelle de la ZEE est fort, mais n'empêche pas d'observer les différences de concentrations entre les échantillons, et d'essayer d'en déduire l'origine.

Figure 44. Répartition des éléments Co+Ni+Cu (%) à l'échelle de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

Figure 45. Répartition des éléments Ce+Mo+Pb+Zn+Zr (ppm) à l'échelle de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

Les concentrations de plusieurs éléments covariant avec les phases principales Mn et Fe ont été cartées à l'échelle de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (les éléments économiquement intéressant Co, Ni et Cu sur la Figure 44, et les éléments potentiellement valorisables Ce, Mo, Pb, Zn et Zr sur la Figure 45). Les concentrations les plus fortes en Mn sont regroupées dans la partie Sud de la ZEE sur les rides de Norfolk, Loyauté et des Pins, et sur les bordures des bancs Nova et Argo sur les Chesterfield. Les valeurs comprises entre 21,6% Mn et 26,9% Mn sont retrouvées à des profondeurs allant de 796 m à 1 569 m (moyenne de 1 180 m). Les valeurs les plus faibles sont comprises entre 10,8% Mn et 14,2% Mn, et sont répartis plutôt sur la partie Nord de la ZEE (bordures des îles Loyauté et du Bassin d'Entrecasteaux), mais également sur la partie Sud de la Ride des Loyauté, et sont trouvées à des profondeurs allant de 1 150 m à 3 375 m (moyenne de 2 226 m). Pour Fe, les valeurs sont disséminées sur l'ensemble de la ZEE avec des

valeurs comprises entre 12% Fe et 24% Fe et des profondeurs moyennes de 2 040 m pour les valeurs fortes, et 1 614 m pour les valeurs faibles. Les concentrations cumulées de Co, Ni et Cu, sont particulièrement enrichies au Sud de la ZEE sur les rides de Norfolk, Loyauté, et des Pins, mais également sur la partie Ouest de la Ride de Fairway (maximum de valeur à 1,62%), sur la bordure Ouest de la Grande-Terre, et en bordure du Banc Argo. Un groupement important de valeurs comprises entre 1% et 1,3% est à noter au Sud de la Grande-Terre, avec une relative proximité des échantillons. La partie Nord de la ZEE ne présente aucune valeur supérieure à 1% Co, Ni et Cu cumulés. Les éléments traces potentiellement valorisables sont également fortement concentrés dans la zone au Sud de la Grande-Terre (valeurs comprises entre 4 850 ppm et 5 660 ppm), et présentent des concentrations moyennes à faibles dans le reste de la ZEE (Figure 45).

La répartition observée des éléments au sein de la ZEE confirme les hypothèses et analyses faites dans les parties précédentes. La formation de particules colloïdales de δ -MnO₂ et d'oxyhydroxydes de Fe dans l'eau de mer, chargées respectivement négativement et positivement, est à l'origine de l'adsorption et l'accumulation des ions de charges opposées [Halbach et al., 2017; Hein et al., 2000]. Le Co, Ni, et également les éléments traces Ce, Pb, Mo, Zn et Zr, sont sensibles aux particules de MnO₂ chargées négativement (car présents sous forme d'ions chargés positivement), il existe donc une relation entre la quantité de Mn et ces éléments. Cette relation est particulièrement visible au sein de la ZEE, avec des valeurs fortes en Mn corrélées à des valeurs fortes en Co+Ni+Cu, et en Ce+Mo+Pb+Zn+Zr. Les zones avec des valeurs fortes en Fe sont généralement plus faibles en ces éléments (mais peuvent présenter des anomalies positives en d'autres éléments comme Ti, Cu ou Cr).

Au-delà des concentrations en Mn, c'est surtout la profondeur de précipitation qui est primordiale dans la concentration des éléments. Les métaux Co, Ni, Zn, Pb, et Mo, montrent un enrichissement progressif avec la profondeur jusqu'à ± 1 000 m, puis vont décroître avec la profondeur et la baisse du rapport Mn/Fe (voir partie 5.4). Cette observation est cohérente avec le profil du Co dans l'eau de mer (type fractionné), mais est contradictoire pour les autres éléments qui présentent généralement des profils nutritifs augmentant avec la profondeur (Ni, Zn et Mo). Cette décroissance des concentrations avec la profondeur implique que d'autres paramètres influençant l'incorporation des métaux doivent intervenir. D'autres paramètres non corrélés à la minéralogie comme la cinétique de précipitation, la vitesse de croissance, le type d'agents de complexation, et le degré d'oxydation ambiant, pourraient être proposés pour expliquer cette décroissance avec la profondeur.

Un phénomène proche est également mis en avant pour les REE qui ont une affinité avec Mn (pour les LREE), et avec Fe (pour les HREE). Les deux constituants principaux des encroûtements hydrogénés Mn et Fe déterminent au final les teneurs en métaux et éléments associés, et sont eux-mêmes dépendant de la bathymétrie et de la position de l'OMZ dans la zone d'étude. Ces observations permettent de définir des gammes bathymétriques préférentielles maximisant l'enrichissement des encroûtements en métaux et éléments économiques. Compte tenu de la concentration en Mn, Co, Ni, et des autres éléments valorisables le long du profil bathymétrique, ainsi que la position moyenne de l'OMZ au sein de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, une gamme bathymétrique comprises entre 800 m et 2 000 m, avec un maximum autour de 1 000 m semble présenter le plus fort potentiel en éléments économiquement intéressants.

6. Discussion

6.1. Comparaison avec les minéralisations d'autres océans

6.1.1 Encroûtements hydrogénés

Les encroûtements hydrogénés sont ubiquistes à l'ensemble des océans et des contextes géodynamiques, reflétant un large éventail de composition chimique et de morphologie [Conrad *et al.*, 2017; Halbach *et al.*, 2017; Hein *et al.*, 1987; Hein *et al.*, 2000; Hein *et al.*, 2005; Hein *et al.*, 2016; Hein *et al.*, 2017; Koschinsky and Hein, 2017; Lusty *et al.*, 2018; Mikhailik *et al.*, 2018; Zawadzki *et al.*, 2018]. La Figure 46 compare les compositions chimiques moyennes des encroûtements hydrogénés et nodules polymétalliques issus de plusieurs océans (modifié d'après [Conrad *et al.*, 2017; Hein and Koschinsky, 2014; Hein *et al.*, 2000]) avec les encroûtements hydrogénés de Nouvelle-Calédonie, permettant d'observer l'enrichissement relatif de chaque océan ou partie d'océan.

Les encroûtements de Nouvelle-Calédonie, par rapport à ceux dragués dans les autres océans et sur la marge de Californie, présentent un enrichissement modéré à fort en Pb, Sr, V et Zn. Malgré tout, des valeurs supérieures en ces éléments sont retrouvées dans les océans Nord-Pacifique (Pb et Sr), Atlantique (V) et Sud-Pacifique (Zn). Les éléments K, Ba, Rb, Y, Ce et Nd ont les concentrations les plus faibles pour les encroûtements de Nouvelle-Calédonie parmi tous les autres océans. Les autres éléments sont dans des concentrations proches des gammes de valeurs indiquées dans la Figure 46, ne montrant pas d'enrichissement ou d'appauvrissement particulier. Le rapport Fe/Mn pour la Nouvelle-Calédonie est proche des rapports de l'Océan Atlantique et des encroûtements de la marge de Californie, mais présente des tendances opposées aux océans Nord-Pacifique et Sud-Pacifique. Le rapport Fe/Mn dans les encroûtements Fe-Mn augmente généralement avec la proximité des marges continentales, des rides océaniques et des sites hydrothermaux. Cette observation est retrouvée notamment pour les océans Atlantique et Indien qui ont des rapports élevés [Hein *et al.*, 2000; Hein *et al.*, 2016].

Dans le contexte géologique de la Nouvelle-Calédonie, l'enrichissement significatif des éléments détritiques et/ou hydrothermaux est possiblement expliqué par la proximité aux marges continentales Australiennes, la forte érosion de la Grande-Terre depuis l'Eocène [Collot *et al.*, 2017], ainsi que par la présence de plusieurs évènements volcaniques (arc, volcans intraplaques et points chauds) d'âge Néogène au sein de la ZEE de Nouvelle-Calédonie [Mortimer and Scott, 2020]. Les encroûtements de la marge continentale de Californie et de l'Océan Nord-Pacifique montrent des rapports Si/Al plus élevés, expliqués par un fort apport détritique siliceux pour le premier, et par une quantité d'éléments alumineux plus faible pour le deuxième. En termes de compositions, les encroûtements hydrogénés de Nouvelle-Calédonie sont plus proches des océans "ouverts" comme les océans Atlantique et Indien, que les encroûtements de la marge continentale de Californie, mais ont des rapports Fe/Mn plus forts et des concentrations en métaux traces

plus faibles que les différentes zones de l'Océan Pacifique, probablement en lien avec la proximité de rides et arcs actifs [Hein *et al.*, 2000].

Comparés aux nodules polymétalliques de la Zone de Clarion-Clipperton (CCZ), du Bassin du Pérou et de l'Océan Indien, les éléments chimiques Fe, Ca, Ti, P, As, Co, Cr, Pb, Sr, V, Y, Zr, La, Ce et une majorité de REE sont plus enrichis dans les encroûtements Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie. Cette observation confirme que les encroûtements Fe-Mn sont à dominance d'origine hydrogénétique, contrairement aux nodules où les processus diagénétiques sont la cause de concentrations fortes en Cu, Ni, Zn, Al, K et Cd (on observe sur la Figure 48C des concentrations très fortes en Cu et Ni par rapport aux encroûtements Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie [Hein *et al.*, 2000]).

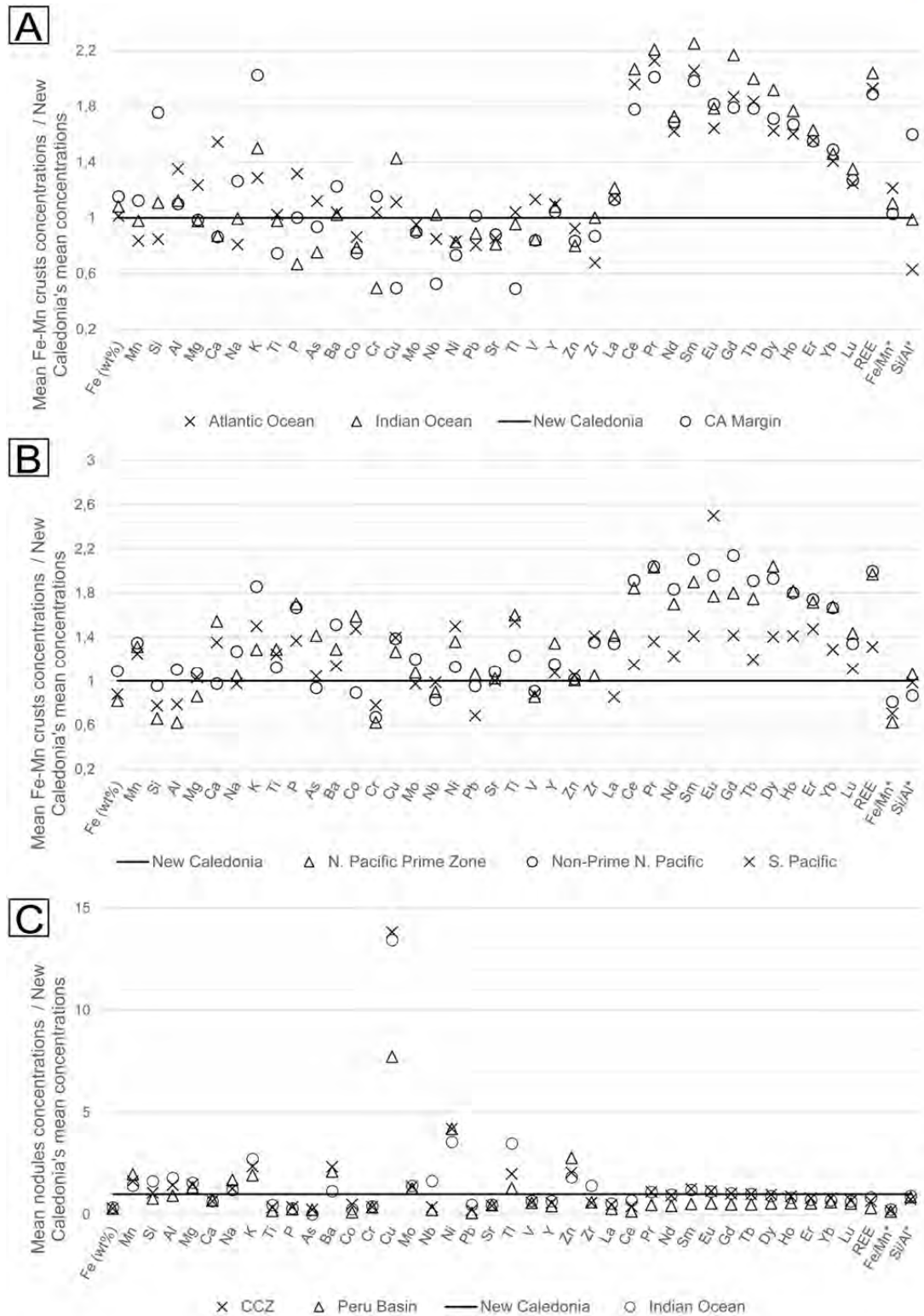


Figure 46. Diagrammes d'enrichissement pour plusieurs éléments chimiques entre (A) plusieurs zones du Pacifique, (B) les océans Atlantique, Indien et la marge de Californie, et (C) plusieurs zones de nodules polymétalliques comparées aux concentrations des encroûtements de Nouvelle-Calédonie [Conrad et al., 2017; Hein and Koschinsky, 2014; Hein et al., 2000; Hein et al., 2013]. Les valeurs supérieures à 1 indiquent un enrichissement des autres océans par rapport à la Nouvelle-Calédonie, alors que les valeurs inférieures à 1 indiquent un appauvrissement. Les rapports Fe/Mn* et Si/Al* sont calculés à partir des moyennes de chaque élément.

6.2.1 Minéralisations hydrothermales/diagénétiques

La Table 7 regroupe plusieurs types de minéralisations hydrothermales/diagénétiques provenant de différents contextes géodynamiques (ride océanique : [Fitzgerald and Gillis, 2006; Pelleter et al., 2017] et arc volcanique : [Hein et al., 2008]), afin de servir de point de comparaison avec les minéralisations hydrothermales/diagénétiques de Nouvelle-Calédonie.

Les minéralisations hydrothermales *stratabound* (*stratifiées*) et les sédiments métallifères ont de fortes concentrations en Mn (entre 33,7% et 50,38%) associées à un rapport Fe/Mn faible (entre 0,01 et 0,13), alors que les minéralisations de Wallis et Futuna présentent une gamme plus large de valeurs (rapport Fe/Mn entre 0,01 à 1,24). La phase aluminosilicaté peut être très faible ($Si+Al < 1\%$ pour les dépôts de Nouvelle-Calédonie), ou relativement forte comme pour les sédiments métallifères de l'arc Izu-Bonin-Marianne ($Si+Al > 10\%$). Le contenu en métaux traces est généralement faible ($Co+Ni+Cu < 0,3\%$ pour les minéralisations *stratabound* et les sédiments métallifères), mais peut présenter de fortes anomalies, notamment pour les minéralisations de Wallis et Futuna où les enrichissements en Ni, Cu et Co peuvent être significatifs [Pelleter et al., 2017].

Les minéralisations de Nouvelle-Calédonie peuvent être distinguées dans un premier temps des sédiments métallifères, car ne présentant pas les mêmes morphologies (les sédiments métallifères sont des grès imprégnés de Mn [Hein et al., 2008]). Le caractère appauvri du contenu en métaux et le fort fractionnement entre Mn et Fe dans les échantillons issus de la drague DW778 se rapproche des minéralisations hydrothermales *stratabound* provenant du mont sous-marin Baby Bare [Fitzgerald and Gillis, 2006; Lalou et al., 1983]. Ce dépôt est principalement composé de 10 Å manganates \pm pyrolusite et possède des alternances de couches stratiformes noires-bleutés à gris-noires métallisées ressemblant fortement aux échantillons de DW778 (Figure 32). Les minéralisations hydrothermales *stratabound* sont communes dans tous les contextes géodynamiques actifs et se forment par l'imprégnation de fluides manganésifères dans le substrat à proximité du fond marin [Hein et al., 2008; Hein et al., 1997].

Les échantillons DW4998D, DW4998E et DW2482 ont des compositions chimiques différentes des échantillons de la drague DW778, ainsi qu'un enrichissement significatif en Ni pour DW4998E et DW2482. Le rapport Fe/Mn de D4998E est proche des minéralisations de Wallis et Futuna, alors que DW2482 se rapproche plutôt des minéralisations hydrothermales *stratabound*. Les concentrations en Si et Al de DW4998E et DW2482 sont inférieures à celles de Wallis et Futuna, indiquant que ces minéralisations sont dominées par les éléments Fe-Si-Mn malgré un apport détritique plutôt faible [Pelleter et al., 2017]. La concentration globale en $Co+Ni+Cu$ est plutôt faible pour ces échantillons (respectivement 0,9% et 0,56% pour DW4998E et DW2482) comparé à celles de Wallis et Futuna (1,7%, 1,15% et 1,87%), mais reste cependant plus forte que les autres types de minéralisations compilées dans la Table 7.

Table 7. Compilation des données géochimiques de plusieurs types de minéralisations hydrothermales : Le mont sous-marin Baby Bare (Nord-Est Pacifique), l'arc volcanique de Izu-Bonin-Marianne (Ouest Pacifique) et le système d'arrière-arc de Wallis et Futuna (Sud Pacifique), comparées avec les minéralisations hydrothermales/diagénétiques de Nouvelle-Calédonie.

	Minéralisations hydrothermales/diagénétiques de Nouvelle-Calédonie							Minéralisations hydrothermales <i>stratabound</i> du mont sous-marin Baby Rare ^a		Minéralisations hydrothermales de l'arc IBM ^b			Minéralisations hydrothermales de Wallis et Futuna ^c		
	DW778B	DW778D	DW778D2	DW4998D	DW4998E	DW2482	N	Moyenne	N	Moyenne	N	Moyenne	Sédiments Métallifères	Utu Sega (n=5)	Anakele (n=10)
(H ₂ O ^{-D}) (%)	0,42	0,36	0,82	0,6	2,61	1,59	4	-	21	7,28	12	5,57	-	-	-
LOI ^E	17,34	17,76	17,36	21,46	21,35	18,91	4	21,20	13	24,5	3	20,1	-	-	-
Mn	50,38	48,37	48,82	28,96	14,03	38,44	4	45,50	21	47,5	12	33,7	45,22	16,5	25,52
Fe	1,27	1,59	1,28	1,82	13,67	2,8	4	3,10	21	0,89	12	4,23	0,6	20,4	14,62
Si	0,49	0,53	0,51	0,35	1,07	0,29	4	3,30	21	1,17	12	7,72	2	10,07	7
Al	0,25	0,27	0,23	0,28	1,99	0,57	4	0,41	21	0,55	12	2,45	0,96	0,57	0,78
Mg	0,99	0,92	0,8	1,25	3,58	2,31	4	1,60	21	1,93	12	2,02	1,86	1,31	1,42
Na	0,42	0,32	0,21	0,3	0,42	0,84	4	0,70	21	2,57	12	2,62	3,21	2,35	2,81
Ca	6,21	7,54	8,14	17,79	13,52	8,67	4	1,00	21	1,74	12	2,86	3,95	1,13	1,47
K	0,2	0,13	0,11	0,13	0,2	0,37	4	0,34	21	1,03	12	1,22	0,5	0,69	0,73
Ti	0,05	0,08	0,06	0,05	0,17	0,1	4	0,06	21	0,04	12	0,15	0,09	0,05	0,1
P	0,53	0,41	0,37	1,88	1,97	1	4	0,04	21	0,07	12	0,07	0,03	0,4	0,38
As (ppm)	71	72	59	63	260	89	-	-	21	68	11	48	10	129	121
Ba	8460	4946	3339	4151	869	11719	4	4731	21	1508	11	1236	320	586	478
Ce	148	112	81	86	221	275	4	7	-	-	-	-	-	-	-
Co	514	898	655	405	1409	1148	4	99	21	73	11	123	9675	2757	3478
Cr	10	10	10	10	35	12	4	13	21	2	11	5	-	-	-
Cu	283	242	187	108	655	295	4	365	21	280	11	144	4323	5254	642
La	88	105	96	74	80	88	4	7	-	-	-	-	-	-	-
Mo	168	141	128	82	410	228	4	-	21	651	11	476	532	425	798
Nb	5	10	7	7	18	15	4	2	-	-	-	-	-	-	-
Nd	30	30	30	30	30	30	4	6	-	-	-	-	-	-	-
Ni	1095	1432	1178	736	6936	4138	4	358	21	349	11	185	3050	3590	14594

Pb	219	359	257	171	322	349	-	-	21	70	11	36	53	28	26
Pt	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	5	<0,5	4	<0,5	-	-	-
Rb	<5	<5	<5	<5	7	< 5	4	19	-	-	-	-	-	-	-
Sr	1858	1440	1261	1119	719	2656	4	720	21	564	11	508	356	301	352
Tl	77	75	61	43	78	141	4	-	-	-	-	-	-	-	-
V	271	263	214	289	796	525	4	221	21	232	11	108	414	351	288
Y	62	65	61	68	74	41	4	9	21	18	11	11	14	25	23
Zn	182	201	111	161	459	589	4	158	21	3058	11	138	185	274	209
Zr	73	73	61	39	91	73	4	12	-	-	-	-	-	-	-
Co+Cu+Ni (%)	0,19	0,26	0,2	0,12	0,9	0,56	4	0,08	21	0,07	11	0,05	1,7	1,16	1,87
Si/Al	1,96	1,96	2,22	1,25	0,54	0,51	4	8,13	21	2,13	11	3,15	2,08	17,67	8,97
Fe/Mn	0,03	0,03	0,03	0,06	0,97	0,07	4	0,07	21	0,02	11	0,13	0,01	1,24	0,58

Table 7. (suite)

^a [Fitzgerald and Gillis, 2006]; ^b [Hein et al., 2008]; ^c [Pelletier et al., 2017]; ^D Humidité mesurée à 80°C; ^E Perte au feu à 950°C.

6.2 Comparaison des modèles prédictifs avec les vidéos ROV

6.2.1 Carte de prédictivité d'encroûtement

A partir des données de cette étude et des études menées sur les encroûtements Fe-Mn d'autres océans du globe, il est possible de définir des paramètres de base dans l'étude de la présence ou non d'encroûtement sur les fonds marins. Ces paramètres ont été utilisés pour définir une carte de prédictivité d'encroûtement sur la zone Sud-Est de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, zone où les données bathymétriques et l'échantillonnage sont le plus fournis (Figure 47), elle se base sur :

- La bathymétrie (Figure 47A) : l'épaisseur des encroûtements, ainsi que leurs compositions chimiques, varient en fonction de la profondeur de précipitation. Si les encroûtements peuvent être retrouvés à des profondeurs allant de 400 m à 7 000 m, ils sont généralement les plus riches entre 800 m et 2 500 m. Dans le cadre de cette étude, les encroûtements les plus riches en Ni+Co sont rencontrés entre 1 100 m et 2 500 m, et ceux dont l'épaisseur est supérieure à 2 cm entre 1 100 m et 3 400 m ;
- La réflectivité (Figure 47B) : cette mesure, exprimée en décibels (dB), combine les effets de forme du fond (microtopographie, rugosité, etc.) et de dureté liée à la granulométrie et à la nature des fonds. Elle permet de rendre compte, dans une certaine mesure, de la présence ou non d'un fond marin présentant une couverture sédimentaire. Des fortes valeurs de réflectivité indiquent un fond marin induré, donc potentiellement propice à la présence d'encroûtement. Une valeur seuil a été définie à partir des valeurs de réflectivité mesurées aux points de dragages ayant remontées des encroûtements ;
- La présence d'échantillons dragués sans encroûtements : une drague à roches dans la zone d'étude n'ayant pas remontée d'encroûtement a été considérée comme un signe de non-favorabilité d'encroûtement.

Afin de rendre compte au mieux de la variation et de la combinaison de ces paramètres sur le potentiel en encroûtement, une méthode de "scoring" a été utilisée. A partir d'une grille définie à l'échelle de la zone d'étude (tailles des cellules $\pm 2 \times 2$ km pour Sud-Est de la ZEE et $\pm 87 \times 87$ m pour le mont D), les valeurs de profondeur et de réflectivité (la moyenne des valeurs) sont extraites et attribuées à chaque cellule. Un "score" est ensuite calculé reflétant le potentiel d'encroûtement en fonction des paramètres, on sait que :

- (1) la gamme bathymétrique préférentielle est comprise entre 1 100 m et 3 400 m de profondeur; (2) entre 800 m et 1 100 m, il est également possible de trouver des encroûtements; (3) cependant, les profondeurs inférieures à 800 m et supérieures à 3 400 m ne sont pas propices aux encroûtements. La gamme (1) aura un score de 2, la gamme (2) un score de 1 et la gamme (3) un score de 0 ;
- Si les valeurs de réflectivité sont supérieures ou égales au seuil, ici 69 dB pour la zone Sud-Est de la ZEE et -23 dB pour le mont D, la probabilité de trouver des encroûtements sur le fond marin augmente. Pour des valeurs supérieures aux seuils on donnera un score de 1, sinon un score de 0 ;
- Si une drague à roches n'ayant pas remonté d'encroûtement est présente dans la surface de la cellule, on attribuera un score négatif de -1 (indiquant des conditions défavorables), sinon 0.

En additionnant ces différents scores, on obtient un "score final" défini entre 0 et 3, reflétant le potentiel de la zone à avoir des encroûtements. Un score de 3 indique un fort potentiel en encroûtement, alors qu'un score de 0 indiquera lui une faible chance de trouver des encroûtements (Figure 50C).

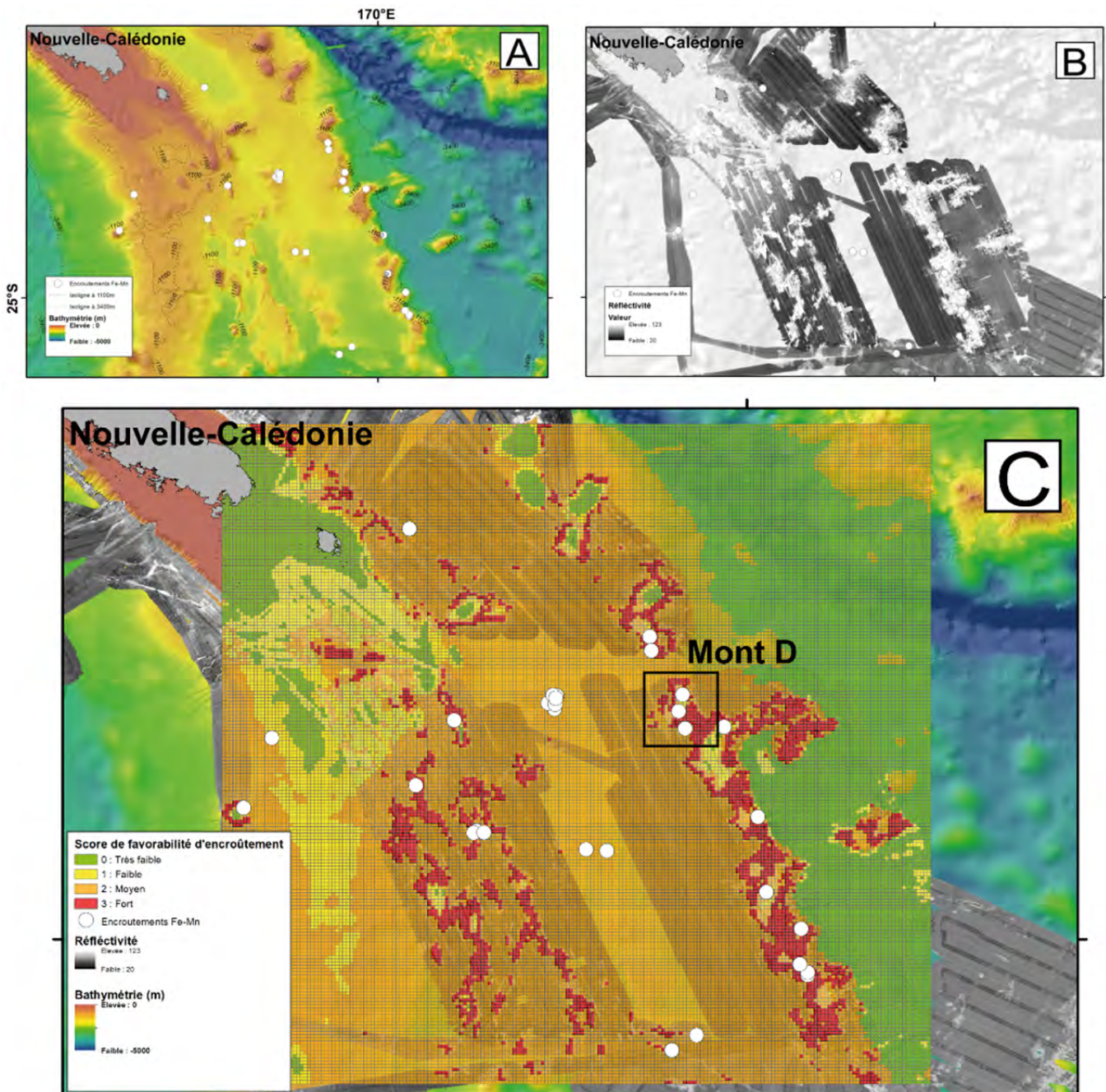
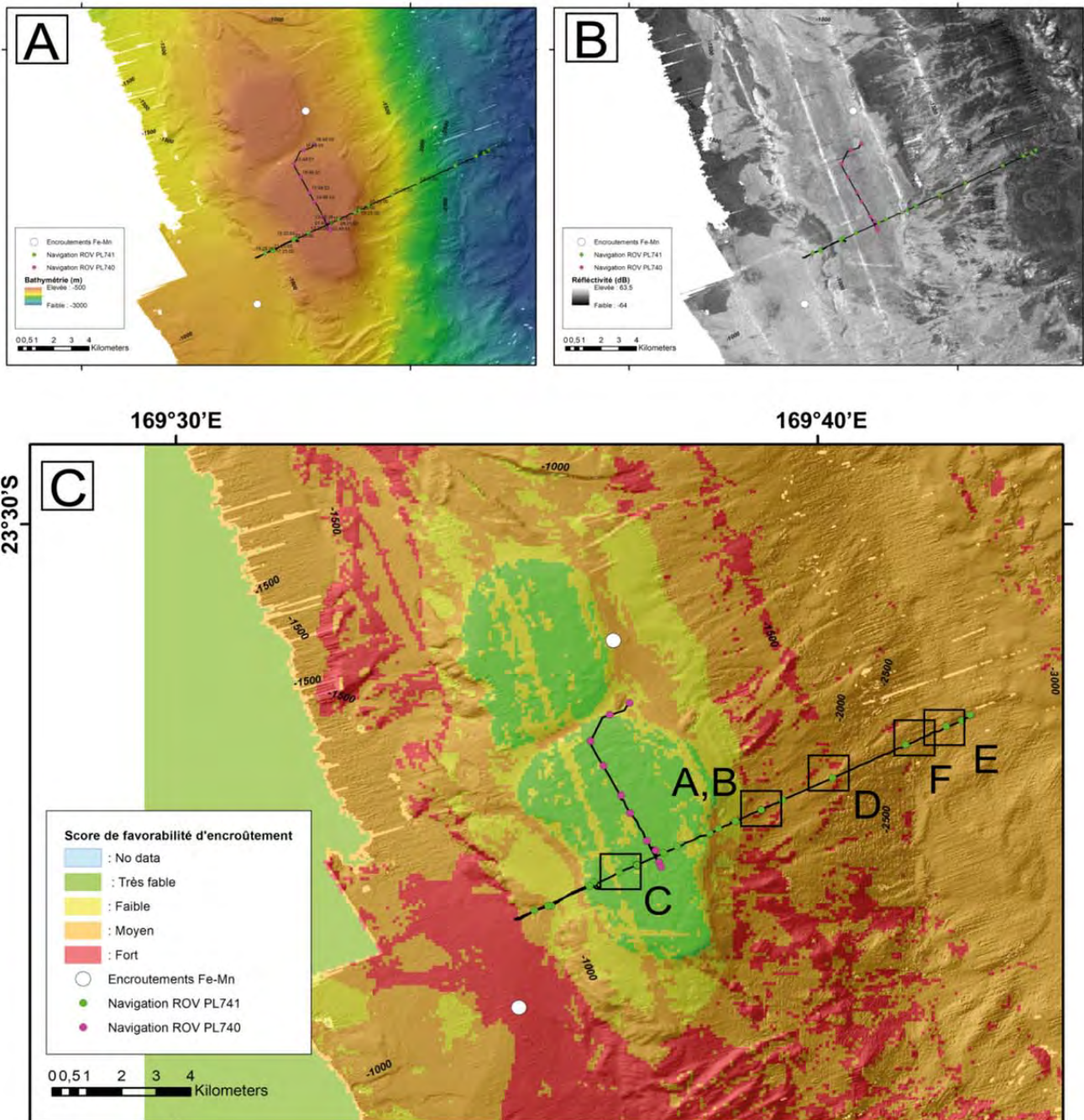


Figure 47. (A-B) Données de bathymétrie et de réflectivité au Sud-Est de la ZEE de Nouvelle-Calédonie ; **(C)** Carte de prédictivité d'encroûtement Fe-Mn à l'échelle du Sud-Est de la ZEE.

6.2.2 Comparaison avec les vidéos de fond ROV du mont D

Les plongées ROV PL740 et PL741 (campagne KANADEEP II) traversent de part et d'autre le mont D, recoupant des gammes bathymétriques et des environnements variés (Figure 48). La carte de prédictivité montre des scores très faibles à faibles sur la partie sommitale (réflectivité moyenne et bathymétrie peu propice), alors que les pentes et flancs sont classés de moyen à fort (forte réflectivité et gammes bathymétriques propices).



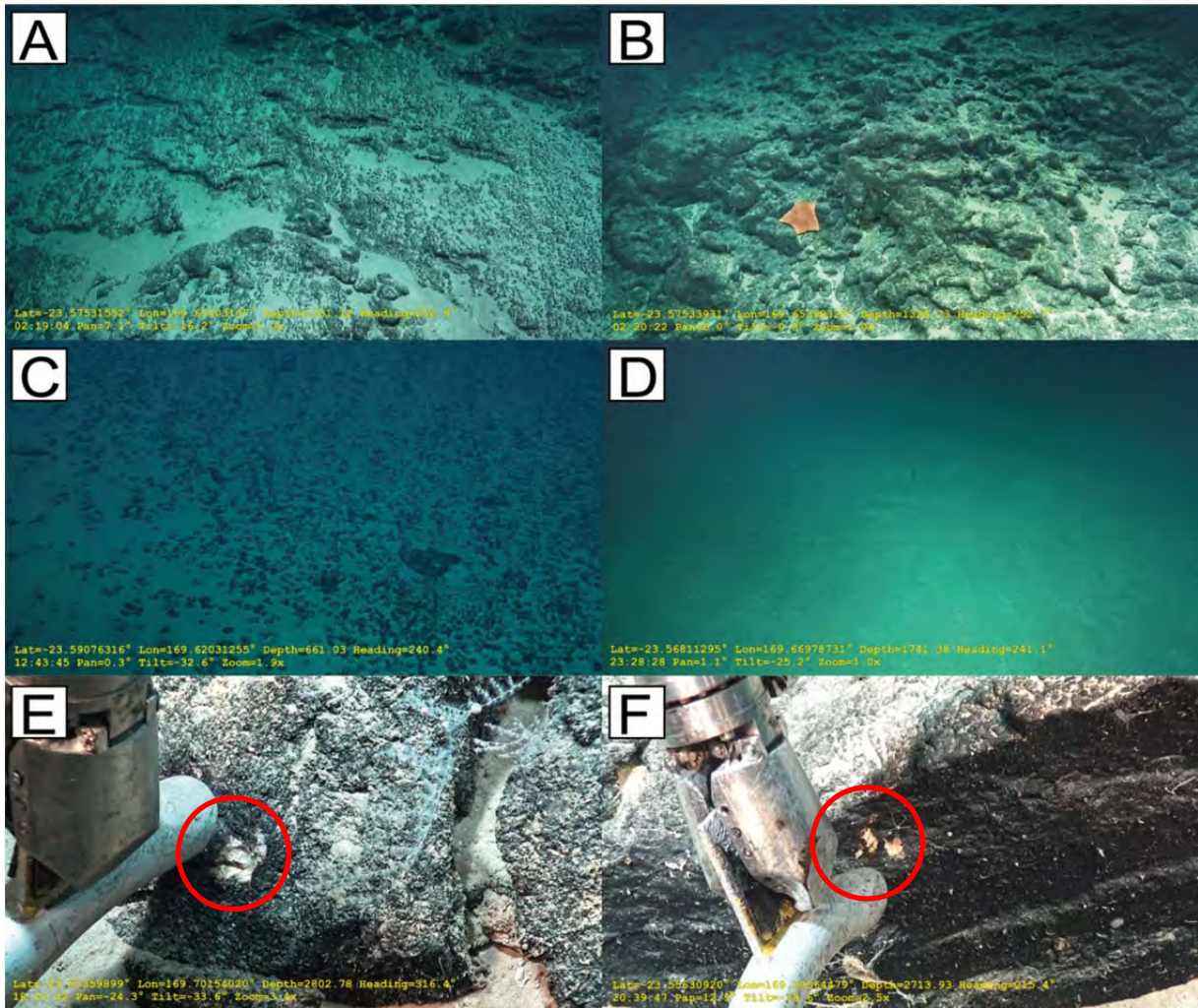


Figure 48. (A-B) Données de bathymétrie et de réflectivité du mont D; (C) Carte de prédictivité d'encroûtement Fe-Mn, les lettres font référence aux photos ROV de la Figure 49.

Figure 49. (A-F) Photos du fond marin du mont D issues de la campagne KANADEEP II. (A-B) Zones fortement encroûtées avec un score de 3; (C) Morphologie particulière de dépôt retrouvée sur la partie sommitale du mont présentant des blocs roulés décimétriques à métriques recouvert d'une couche d'encroûtement; (D) Fond marin meuble sans encroûtement dans une zone avec un score moyen; (E-F) Affleurement visuellement encroûtés présentant une simple pellicule millimétrique sur un substrat friable.

Le transect de la plongée PL741 recoupe quelques polygones avec un score de favorabilité d'encroûtement fort, situés sur les pentes Est du mont D à des profondeurs proches de 1 300 m. Les images issues de cette zone montrent un environnement induré recouvert d'une fine pellicule de sédiment (Figure 49A,B). Les encroûtements prennent ici la forme de lobes arrondis, reflétant la microtopographie du substrat et les courants de fond. La partie sommitale du mont est caractérisée par des scores faibles à très faibles. Les vidéos montrent globalement un environnement avec une composante sédimentaire forte et un fond marin meuble sans encroûtements. Certaines zones comme sur la Figure 49C présentent des amoncellements de blocs arrondis décimétriques à métriques encroûtés. La Figure 49D illustre le fait que la bathymétrie seule n'est pas suffisante pour distinguer des zones encroûtées. Ici une zone située à une

profondeur propice de 1 700 m dans une zone de pente, mais inférieure au seuil de réflectivité, est en réalité dominée par les apports sédimentaires. Également, un affleurement apparaissant comme encrouté sur les vidéos ROV ne pourra être réellement validé que par une méthode d'échantillonnage locale. Les Figures 49E,F mettent en exergue le décalage entre la morphologie de fond observée, indiquant une zone minéralisée sur un substrat dur, alors qu'en réalité il ne s'agit que d'une pellicule millimétrique sur une roche altérée peu propice. Simplement à partir de la bathymétrie, de la réflectivité et des vidéos ROV, il est quasi-impossible de distinguer ces affleurements d'une zone réellement encroutée. Un jeu de données adapté et haute résolution est nécessaire pour conduire ce type d'approche.

6.3. Nature des minéralisations hydrothermales/diagénétiques

La précipitation d'oxydes et oxyhydroxydes de Fe et Mn est un phénomène courant à l'ensemble des bassins océaniques et des contextes géodynamiques. Elle est régie par 3 phénomènes principaux : (1) La précipitation hydrogénétique des métaux directement à partir de l'eau de mer, (2) la précipitation à partir des fluides présents dans les pores des sédiments impliquant des phénomènes diagénétiques, (3) et la précipitation à partir de fluides hydrothermaux [Hein et al., 2008; Hein et al., 1997; Pelleter et al., 2017]. Ces grands types de précipitation des oxydes et oxyhydroxydes de Fe et Mn, ainsi que leurs possibles complications dans la formation d'un dépôt, expliquent le large éventail de compositions et de morphologies observées.

La précipitation directe à partir de fluides hydrothermaux forme des minéralisations *stratabound* dans les zones distales des événements hydrothermaux et cimente les sédiments dans les zones proximales [Hein et al., 2008]. Les minéralisations *stratabound* sont retrouvées dans plusieurs environnements géodynamiques : bassins d'arrière-arc [Kuhn et al., 2003; Pelleter et al., 2017], arcs volcaniques [Cronan et al., 1982; Goto et al., 2015; Hein et al., 2008; Usui et al., 1986], volcans de points chauds [Glasby et al., 1997; Hein et al., 1992; Hodkinson et al., 1994], et marges continentales [González et al., 2016]. Elles présentent généralement un fort fractionnement entre Fe et Mn, oscillant entre un pôle pur Mn et Fe, et un appauvrissement global en métaux traces. Les minéralisations hydrothermales de cette étude proviennent de 3 dragues faites sur 2 sites différents. DW2882, DW4998D et DW4998E ont été dragués sur le sommet et le flanc d'un édifice volcanique d'âge Miocène Inférieur situé au centre de la Ride de Lord Howe, appartenant à un ensemble de pointements volcaniques intraplaques alignés suivant une direction N-NW [Exon et al., 2004; Van de Beuque et al., 1998]. DW778D, DW778D2 et DW778B ont été remontés du sommet du mont K de la Ride des Loyauté. Les textures macro- et microscopiques sont cohérentes avec les minéralisations hydrothermales d'autres océans. On observe au niveau macroscopique une succession de couches dominées par Mn et par Fe (\pm Si et Ca) dans les échantillons DW4998E et DW4998D, ainsi qu'une variation minéralogique à l'échelle du millimètre (passage de textures massives à poreuses et fibreuses) et à l'échelle du micromètre (alternance d'oxyhydroxydes amorphes et cristallisés). Les alternances multi-échelles retrouvées dans DW778D traduisent les périodes de *waxing* et *wanning* des pulses hydrothermaux, avec des compositions et des propriétés physico-chimiques variées [Eckhardt et al., 1997; Fitzgerald and Gillis, 2006; Hein et al., 2008]. Le remplacement des oxyhydroxydes de Mn par de la pyrolusite, des oxyhydroxydes riches en Ba, ainsi que des carbonates et de la fluoroapatite dans cette échantillon (DW778D) est probablement en lien avec un événement diagénétique tardif.

Les minéralisations hydrothermales ont en général une faible concentration en éléments traces, cependant certains dépôts peuvent présenter des anomalies positives en métaux, notamment en Zn, Mo, Cu, Co et Ni

[Cronan *et al.*, 1982; Kuhn *et al.*, 2003; Pelleter *et al.*, 2017]. Un enrichissement en Ni a été trouvé dans plusieurs minéralisations et contextes, par exemple l'arc volcanique de Yap [Hein *et al.*, 1997], au niveau d'une zone de rift proche de Hawaii [Hein *et al.*, 1996], ou à proximité du bassin d'arrière-arc de Wallis et Futuna [Pelleter *et al.*, 2017]. Cet enrichissement spécifique en Ni peut être expliqué par plusieurs paramètres comme : la quantité et le type de roche lessivée par les fluides hydrothermaux, le dépôt de sulfures massifs en profondeur, le degré de fractionnement en Fe et Mn, l'interaction avec l'eau de mer ou encore la proximité de l'événement hydrothermal [Hein *et al.*, 1996; Hein *et al.*, 2008]. Au regard des fortes variations de concentrations en Ni, Ba, Zn et Cu, il est plausible que ces paramètres aient influencé la précipitation des échantillons DW4998D, DW4998E et DW2482. Les analyses MEB et EDS indiquent que l'anomalie en Ni dans l'échantillon DW4998E est liée aux oxyhydroxydes de Mn amorphes et aux 7 Å manganates et/ou 10 Å manganates. La todorokite (10 Å manganates) se formant dans des conditions sub-oxiques (par exemple dans les nodules polymétalliques) est généralement riche en Mg provenant de la dissolution des carbonates riches en Mg, avec des substitutions significatives de Mn^{2+} au profit de Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} et Mg^{2+} , entraînant des concentrations fortes en Ni (jusqu'à 5%), Zn et Cu (jusqu'à 4%), mais appauvris en Co (Co^{2+} ne pouvant se substituer dans la structure de la todorokite [Burns and Burns, 1979; Koschinsky *et al.*, 1997]). La todorokite hydrothermale est caractérisée par des concentrations plus faibles en Mg, Ni et Cu du fait de la vitesse de croissance plus forte des minéralisations hydrothermales [Burns and Burns, 1979; Koschinsky *et al.*, 1997]. Cette observation pourrait expliquer les valeurs modérément fortes en Ni, Cu et un appauvrissement en Co, malgré une concentration en Mg plutôt élevée (3,6%) dans les échantillons DW4998E et DW2482. L'origine de cet enrichissement en Ni pourrait aussi être expliqué par un apport détritique riche en Ni, ou par le lessivage d'un substrat ultramafique, cependant une anomalie en Cr devrait être également constatée [Hein *et al.*, 2008]. Le lessivage de sédiments biogéniques riches en Ni pourrait expliquer les concentrations observées en Ca, Ba et Sr dans l'échantillon DW2482, cependant les images MEB confirment que le Ca est principalement associé à la présence d'un remplissage diagénétique tardif en calcite et fluoroapatite.

Conclusion

L'existence de minéralisations profondes en Nouvelle-Calédonie est connue depuis les années 1970-1980 grâce aux campagnes océanographiques menées par l'ORSTOM. La présence d'encroûtements ferromanganésifères a notamment été démontrée lors des campagnes GEORSTOM I, II, III et EVA sur la Ride des Loyauté, sur la zone charnière de Nouvelle-Calédonie et sur la Ride de Norfolk.

Le travail entrepris dans cette étude des encroûtements ferromanganésifères de Nouvelle-Calédonie vient donc compléter et approfondir les premiers travaux de l'ORSTOM grâce à l'échantillonnage de l'ensemble des campagnes océanographiques menées en Nouvelle-Calédonie depuis 1970.

104 échantillons présentant des minéralisations profondes draguées au sein, ou à proximité, de la ZEE de Nouvelle-Calédonie ont été identifiés et montrent que :

- Les échantillons présentent différents types de minéralisations profondes : un groupe d'encroûtements ferromanganésifères avec des compositions, textures et minéralogies similaires à d'autres encroûtements hydrogénés du globe ($n=98$), ainsi qu'un groupe de minéralisations hydrothermales/diagénétiques situées sur la Ride des Loyauté et sur la Ride de Lord Howe ($n=6$);

- Les encroûtements hydrogénés indiquent une vitesse de croissance comprise entre 2,2 et 3,1 mm/Ma et formant des épaisseurs maximums de 115 mm ce qui impliquerait pour certains un début de croissance vers 34 Ma.
- Les encroûtements hydrogénés de Nouvelle-Calédonie ont des compositions chimiques proches des encroûtements des autres océans. La concentration combinée en métaux traces avec le plus grand potentiel économique Co+Ni+Cu% est de 0,81%. Cette valeur est plus forte que celles des océans Indien et Atlantique, mais reste plus faible que celles du Sud-Pacifique et de la PCZ. Plusieurs monts sous-marins situés dans la partie Sud-Est de la ZEE de Nouvelle-Calédonie présentent notamment des clusters de valeurs de Co+Ni+Cu% supérieures à 1%, faisant de cette zone un site propice à des investigations supplémentaires;
- L'utilisation de carte de prédictivité d'encroûtement à l'échelle du Sud-Est de la ZEE a permis de montrer que de nombreux sous-marins ont en effet une physiographie adaptée au développement d'encroûtement Fe-Mn;
- A l'échelle du mont sous-marin D, la comparaison entre les cartes de prédictivité et les vidéos ROV de la campagne en mer KANADEEP 2 a montré que la variabilité locale est très forte et que la prédiction d'encroûtement à haute résolution n'est pas fiable en se basant uniquement sur les données de bathymétrie et de réflectivité;
- Les minéralisations hydrothermales et/ou diagénétiques ont des compositions chimiques et minéralogiques beaucoup plus variées que les encroûtements hydrogénés (10 / 7 Å manganates ± pyrolusite), et ont également l'originalité de présenter une forte anomalie positive en Ni pour deux de ces échantillons (> 0,7%);
- Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour évaluer le potentiel des encroûtements hydrogénés au sein de la ZEE de Nouvelle-Calédonie, ainsi que de contraindre précisément les mécanismes de formation des minéralisations hydrothermales/diagénétiques.

Perspectives

Les résultats portés par cette étude ont permis de mieux comprendre le type, la répartition, la composition et l'intérêt des minéralisations marines profondes de Nouvelle-Calédonie. Compte tenu des nombreuses applications de recherche sur les minéralisations marines profondes, plusieurs pistes sont proposées afin de mieux caractériser le potentiel en ressources minérales :

- Réaliser les analyses chimiques des éléments traces/ultras traces et terres rares d'une vingtaine d'échantillons non analysés en 2020-2021 en raison des aléas COVID. Ces résultats permettront d'une part de préciser la nature et la composition des encroûtements (les terres rares étant un bon marqueur des processus de précipitation impliqués), mais également de préciser le potentiel ressource minérale (l'évaluation actuelle étant uniquement basées sur 17 échantillons) ;
- Prélever et réaliser les analyses chimiques complètes des ~10 échantillons encroûtés de la campagne SPANBIOS menée en 2021 afin de les intégrer aux résultats de l'étude. Certains de ces échantillons ont la particularité de présenter des minéralisations originales, probablement en lien avec un épisode hydrothermale ;
- Proposer des modèles de prédictivité d'encroûtements multi-échelles (à l'échelle de la ZEE et plus localement) afin de produire des cartes de probabilité de présence d'encroûtements. Plusieurs

approches seront à comparer (*data driven, expert guided*), faisant intervenir des concepts de *data mining* et de *machine learning* ;

- Sur la base de ces résultats, identifier des zones à explorer et proposer une stratégie d'exploration qui comprenne un plan d'acquisition de données.
- Les encroûtements ferromanganésifères sont de très bons marqueurs des variations de compositions chimiques des océans et des courants. Dans plusieurs endroits du monde, la datation isotopique des encroûtements a permis de préciser et de révéler certains processus de grande échelle (cycles de Milankovitch [92], dynamique des courants dans le canal du Mozambique [93], etc.). Ces méthodes pourraient être appliquées en Nouvelle-Calédonie pour étudier les variations de la dynamique océanique du Sud-Ouest Pacifique.

Références

Aplin, A. C., and D. S. Cronan (1985), Ferromanganese oxide deposits from the Central Pacific Ocean, II. Nodules and associated sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(2), 437-451.

Barrat, J. A., F. Keller, J. Amossé, R. N. Taylor, R. W. Nesbitt, and T. Hirata (1996), Determination of rare earth elements in sixteen silicate reference samples by ICP-MS after Tm addition and ion exchange separation *Geostandards Newsletter*, 20(1), 133-139.

Baturin, G. N., and V. T. Dubinchuk (2011), Mineralogy and chemistry of ferromanganese crusts from the Atlantic Ocean, *Geochemistry International*, 49(6), 578-593.

Burns, R. G., and V. M. Burns (1979), Marine Minerals, in *Chapter 1. MANGANESE OXIDES*, edited by G. B. Roger, pp. 1-46, De Gruyter.

Charles, C., J. A. Barrat, and E. Pelleter (2021), Trace element determinations in Fe-Mn oxides by high resolution ICP-MS after Tm addition, *Talanta*, 233, 122446.

Cluzel, D., J. C. Aitchison, and C. Picard (2001), Tectonic accretion and underplating of mafic terranes in the Late Eocene intraoceanic fore-arc of New Caledonia (Southwest Pacific): geodynamic implications, *Tectonophysics*, 340, 1-2, 23-60.

Cluzel, D., P. Maurizot, J. Collot, and B. Sevin (2012), An outline of the Geology of New Caledonia; from Permian-Mesozoic Southeast Gondwanaland active margin to Cenozoic obduction and supergene evolution, *Episodes*, 35, 72-86.

Cluzel, D., C. J. Adams, S. Meffre, H. Campbell, and P. Maurizot (2010), Discovery of Early Cretaceous Rocks in New Caledonia: New Geochemical and U-Pb Zircon Age Constraints on the Transition from Subduction to Marginal Breakup in the Southwest Pacific, *The Journal of Geology*, 118(4), 381-397.

Collot, J. (2009), Geodynamic evolution of the New Caledonia Western Offshore domain and its extensions towards New Zealand, Université de Bretagne occidentale - Brest.

Collot, J., L. Geli, Y. Lafoy, R. Vially, D. Cluzel, F. Klingelhoefer, and H. Nouze (2008), Tectonic history of northern New Caledonia Basin from deep offshore seismic reflection: Relation to late Eocene obduction in New Caledonia, southwest Pacific, *Tectonics*, 27(TC6006), 1-20.

Collot, J., M. Patriat, R. Sutherland, S. Williams, D. Cluzel, M. Seton, B. Pelletier, W. R. Roest, S. Etienne, A. Bordenave, and P. Maurizot (2020), Chapter 2 Geodynamics of the SW Pacific: a brief review and relations with New Caledonian geology, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 13-26.

Collot, J., M. Patriat, S. Etienne, P. Rouillard, F. Soetaert, C. Juan, B. Marcaillou, G. Palazzin, C. Clerc, P. Maurizot, F. Pattier, E. Tournadour, B. Sevin, and A. Privat (2017), Deepwater fold-and-thrust belt along New Caledonia's western margin: relation to post-obduction vertical motions, *Tectonics*, 36, 2108-2122.

Conrad, T., J. R. Hein, A. Paytan, and D. A. Clague (2017), Formation of Fe-Mn crusts within a continental margin environment, *Ore Geology Reviews*, 87, 25-40.

Cronan, D. S., G. P. Glasby, S. A. Moorby, J. Thomson, K. E. Knedler, and J. C. McDougall (1982), A submarine hydrothermal manganese deposit from the south-west Pacific island arc, *Nature*, 298(5873), 456-458.

Daniel, J., F. Dugas, J. Dupont, C. Jouannic, J. Launay, M. Monzier, and J. Récy (1976), La zone charnière Nouvelle-Calédonie - ride de Norfolk (S.W. Pacifique) : résultats de dragages et interprétation, *Cahiers ORSTOM.Série Géologie*, 8(1), 95-105.

Dubois, J., J. Launay, and J. Recy (1974), Uplift movements in New Caledonia-Loyalty Islands area and their plate tectonics interpretation, *Tectonophysics*, 24(1-2), 133-150.

Dyment, J., S. Lallier, N. Lamare, O. Le Bris, P.-M. Rouxel, C. Sarradin, M. Coumert, and J. Tourolle (2014), Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Eckhardt, J. D., G. P. Glasby, H. Puchelt, and Z. Berner (1997), Hydrothermal manganese crusts from Enarete and Palinuro seamounts in the Tyrrenian Sea, *Marine Georesources & Geotechnology*, 15(2), 175-208.

Enrico, B., K. Tom, and R. Harold (1972), Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits, paper presented at Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor, Natl. Sci. Found. Washington.

Etienne, S., P. Roy, E. Tournadour, W. Roest, S. Jorry, J. Collot, M. Patriat, M. Largeau, J. Roger, C. Clerc, B. Dechnick, K. Sanborn, F. Lepareur, J. Horowitz, J. Webster, and A. Gaillot (2021), Large-scale margin collapses along a partly drowned, isolated carbonate platform (Lansdowne Bank, SW Pacific Ocean), *Marine Geology*, 436, 106477.

- Exon, N. F., P. G. Quilty, Y. Lafoy, A. J. Crawford, and J. M. Auzende (2004), Miocene volcanic seamounts on northern Lord Howe Rise: Lithology, age and origin, *Australian Journal of Earth Sciences*, 51(2), 291-300.
- Fitzgerald, C. E., and K. M. Gillis (2006), Hydrothermal manganese oxide deposits from Baby Bare seamount in the Northeast Pacific Ocean, *Marine Geology*, 225(1-4), 145-156.
- Gaina, C., D. Müller, J.-Y. Royer, J. Stock, J. Hardebeck, and P. Symonds (1998), The tectonic history of the Tasman Sea: A puzzle with 13 pieces, *Journal of Geophysical Research*, 103, 12413-12433.
- Glasby, G. P., D. Stüben, G. Jeschke, P. Stoffers, and C. D. Garbe-Schönberg (1997), A model for the formation of hydrothermal manganese crusts from the Pitcairn Island hotspot, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(21), 4583-4597.
- González, F. J., L. Somoza, J. R. Hein, T. Medialdea, R. León, V. Urgorri, J. Reyes, and J. A. Martín-Rubí (2016), Phosphorites, Co-rich Mn nodules, and Fe-Mn crusts from Galicia Bank, NE Atlantic: Reflections of Cenozoic tectonics and paleoceanography, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2), 346-374.
- Goto, K. T., G. Shimoda, A. D. Anbar, G. W. Gordon, Y. Harigane, R. Senda, and K. Suzuki (2015), Molybdenum isotopes in hydrothermal manganese crust from the Ryukyu arc system: Implications for the source of molybdenum, *Marine Geology*, 369, 91-99.
- Hackney, R., R. Sutherland, and J. Collot (2012), Rifting and subduction initiation history of the New Caledonia Trough, southwest Pacific, constrained by process-oriented gravity models, *Geophysical Journal International*, 189, 1293-1305.
- Halbach, P. E., and D. Puteanus (1984), The influence of the carbonate dissolution rate on the growth and composition of Co-rich ferromanganese crusts from Central Pacific seamount areas, *Earth and Planetary Science Letters*, 68, 73-87.
- Halbach, P. E., A. Jahn, and G. Cherkashov (2017), Marine Co-Rich Ferromanganese Crust Deposits: Description and Formation, Occurrences and Distribution, Estimated World-wide Resources, in *Deep-Sea Mining*, edited, pp. 65-141, Springer International Publishing.
- Hannington, M., J. Jamieson, T. Monecke, S. Petersen, and S. Beaulieu (2011), The abundance of seafloor massive sulfide deposits, *Geology*, 39(12), 1155-1158.
- Hannington, M. D., C. E. J. De Ronde, S. Petersen, J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, and J. P. Richards (2005), Sea-Floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems, in *One Hundredth Anniversary Volume*, edited, p. 0, Society of Economic Geologists.
- Hein, J., and A. Koschinsky (2014), Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules, *Geochemistry of Mineral Deposits: Treatise of Geochemistry, 2nd Edition*, 13, 273-291.

Hein, J., L. Morgenson, D. Clague, and R. Koski (1987), Cobalt-rich ferromanganese crusts from the Exclusive Economic Zone of the United States and nodules from the oceanic Pacific, in *Geology and Resource Potential of the Continental Margin of Western North America and Adjacent Ocean Basins - Beaufort Sea to Baja California*, edited, pp. 753-771, Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources.

Hein, J., A. Koschinsky, M. Bau, F. Manheim, J.-K. Kang, and L. Roberts (2000), Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts in the Pacific, in *Handbook of marine mineral deposits*, edited, pp. 239-279, 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., A. Koschinsky, and B. R. McIntyre (2005), Mercury- and silver-rich ferromanganese oxides, southern California Borderland: Deposit model and environmental implications, *Economic Geology*, 100(6), 1151-1168.

Hein, J. R., A. Koschinsky, and T. Kuhn (2020), Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials, *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3), 158-169.

Hein, J. R., A. E. Gibbs, D. A. Clague, and M. Torresan (1996), Hydrothermal mineralization along submarine rift zones, Hawaii, *Marine Georesources & Geotechnology*, 14(2), 177-203.

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., M. S. Schulz, R. E. Dunham, R. J. Stern, and S. H. Bloomer (2008), Diffuse flow hydrothermal manganese mineralization along the active Mariana and southern Izu-Bonin arc system, western Pacific, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8).

Hein, J. R., H.-W. Yeh, S. H. Gunn, W. V. Sliter, L. M. Benninger, and C.-H. Wang (1993), Two Major Cenozoic Episodes of Phosphogenesis Recorded in Equatorial Pacific Seamount Deposits, *Paleoceanography*, 8(2), 293-311.

Hein, J. R., T. Conrad, K. Mizell, V. K. Banakar, F. A. Frey, and W. W. Sager (2016), Controls on ferromanganese crust composition and reconnaissance resource potential, Ninetyeast Ridge, Indian Ocean, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 110, 1-19.

Hein, J. R., A. Koschinsky, P. Halbach, F. T. Manheim, M. Bau, J. K. Kang, and N. Lubick (1997), Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific, *Geological Society Special Publication*, 119, 123-138.

Hein, J. R., N. Konstantinova, M. Mikesell, K. Mizell, J. N. Fitzsimmons, P. J. Lam, L. T. Jensen, Y. Xiang, A. Gartman, G. Cherkashov, D. R. Hutchinson, and C. P. Till (2017), Arctic Deep Water Ferromanganese-Oxide Deposits Reflect the Unique Characteristics of the Arctic Ocean, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11), 3771-3800.

Hein, J. R., J.-h. Ahn, J.-C. Wong, J.-K. Kang, V. K. Smith, S. H. Yoon, W. M. D'angelo, S.-O. Yoo, A. E. Gibbs, H.-J. Kim, P. J. Quintero, M.-Y. Jung, A. S. Davis, B.-K. Park, J. R. Gillison, M. S. Marlow, M. S. Schulz, D. F. Siems, J. E. Taggart, N. Rait, L. G. Pickthorn, M. J. Malcolm, M. G. Kavulak, H.-W. Yeh, D. M. Mann, M. A. Noble, G. O. Riddle, B. H. Roushey, and H. Smith (1992), Geology, geophysics, geochemistry, and deep-sea mineral deposits, Federated States of Micronesia; KORDI-USGS R.V. Farnella Cruise F11-90-CP.

Hodkinson, R. A., P. Stoffers, J. Scholten, D. S. Cronan, G. Jeschke, and T. D. S. Rogers (1994), Geochemistry of hydrothermal manganese deposits from the Pitcairn Island hotspot, southeastern Pacific, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(22), 5011-5029.

Jochum, K. P., U. Nohl, K. Herwig, E. Lammel, B. Stoll, and A. W. Hofmann (2005), GeoReM: A New Geochemical Database for Reference Materials and Isotopic Standards, *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(3), 333-338.

Josso, P., P. Lusty, S. Chenery, and B. Murton (2021), Controls on metal enrichment in ferromanganese crusts: Temporal changes in oceanic metal flux or phosphatisation?, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 308, 60-74.

Josso, P., E. Pelleret, O. Pourret, Y. Fouquet, J. Etoubleau, S. Cheron, and C. Bollinger (2017), A new discrimination scheme for oceanic ferromanganese deposits using high field strength and rare earth elements, *Ore Geology Reviews*, 87, 3-15.

Kim, J., K. Hyeong, C. M. Yoo, J.-W. Moon, K.-H. Kim, Y.-T. Ko, and I. Lee (2005), Textural and geochemical characteristics of Fe-Mn crusts from four seamounts near the Marshall Islands, western Pacific, *Geosciences Journal*, 9(4), 331-338.

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 J. R. Hein (2017), Marine Ferromanganese Encrustations: Archives of Changing Oceans, *Elements*, 13(3), 177-182.

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., J. Hein, K. Schmidt, B. Alexander, and M. Bau (2010), Rare and Valuable Metals for High-Tech Applications Found in Marine Ferromanganese Nodules and Crusts: Relationships To Genetic Endmembers.

Koschinsky, A., J. R. Hein, D. Kraemer, A. L. Foster, T. Kuhn, and P. Halbach (2020), Platinum enrichment and phase associations in marine ferromanganese crusts and nodules based on a multi-method approach, *Chemical Geology*, 539, 119426.

Kuhn, T., A. Wegorzewski, C. Rühlemann, and A. Vink (2017), Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules, edited, pp. 23-63.

- Kuhn, T., B. C. Bostick, A. Koschinsky, P. Halbach, and S. Fendorf (2003), Enrichment of Mo in hydrothermal Mn precipitates: possible Mo sources, formation process and phase associations, *Chemical Geology*, 199(1-2), 29-43.
- Lalou, C., E. Brichet, C. Jehanno, and H. Perez-Leclaire (1983), Hydrothermal manganese oxide deposits from Galapagos mounds, DSDP Leg 70, hole 509B and "Alvin" dives 729 and 721, *Earth and Planetary Science Letters*, 63(1), 63-75.
- Lusty, P. A. J., J. R. Hein, and P. Josso (2018), Formation and Occurrence of Ferromanganese Crusts: Earth's Storehouse for Critical Metals, *Elements*, 14(5), 313-318.
- 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.
- Maurizot, P., J. Collot, D. Cluzel, and M. Patriat (2020a), Chapter 6 The Loyalty Islands and Ridge, New Caledonia, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 131-145.
- Maurizot, P., A. Bordenave, D. Cluzel, J. Collot, and S. Etienne (2020b), Chapter 4 Late Cretaceous to Eocene cover of New Caledonia: from rifting to convergence, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 53-91.
- Maurizot, P., D. Cluzel, S. Meffre, H. J. Campbell, J. Collot, and B. Sevin (2020c), Chapter 3 Pre-Late Cretaceous basement terranes of the Gondwana active margin of New Caledonia, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 27-52.
- Maurizot, P., D. Cluzel, M. Patriat, J. Collot, M. Iseppi, S. Lesimple, A. Secchiari, D. Bosch, A. Montanini, P. Macera, and H. L. Davies (2020d), Chapter 5 The Eocene Subduction–Obduction Complex of New Caledonia, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 93-130.
- Mikhailik, P. E., A. I. Khanchuk, E. V. Mikhailik, M. V. Ivanov, V. A. Rashidov, N. V. Zarubina, M. G. Blokhin, N. N. Barinov, and S. P. Pletnev (2018), Abnormally high mercury contents in hydrogenic ferromanganese crusts from Seth Guyot (Northwestern Pacific), *Russian Geology and Geophysics*, 59(3), 217-225.
- Mizell, K., and J. R. Hein (2018), Ferromanganese Crusts and Nodules: Rocks That Grow, in *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, edited by W. M. White, pp. 477-483, Springer International Publishing, Cham.
- Monzier, M., and J. Vallot (1983), Rapport préliminaire concernant les dragages réalisés lors de la campagne GEOSTORM 3 Sud (1975), edited, p. 77 p. multigr., ORSTOM, Nouméa.
- Monzier, M., J. Boulin, J.-Y. Collot, J. Daniel, S. LALLEMAND, and B. Pelletier, E (1989), First results of SUBPSO I dives in the collision zone "Loyalty islands ridge/New Hebrides island arc" (South West Pacific), *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences, Paris, Série II*, 309, 2069-2076.

- Mortimer, N., and J. Scott (2020), Volcanoes of Zealandia and the Southwest Pacific, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 63, 1-7.
- Mortimer, N., F. Hauff, and A. T. Calvert (2008), Continuation of the New England Orogen, Australia, beneath the Queensland Plateau and Lord Howe Rise, *Australian Journal of Earth Sciences*, 55(2), 195-209.
- Mortimer, N., H. Campbell, A. Tulloch, P. King, V. Stagpoole, R. Wood, M. Rattenbury, R. Sutherland, C. Adams, J. Collot, and M. Seton (2017), Zealandia: Earth's Hidden Continent, *GSA Today*, 27.
- Muiños, 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.
- Patriat, M., J. Collot, S. Etienne, S. Poli, C. Clerc, N. Mortimer, F. Pattier, C. Juan, and W. R. Roest (2018), New Caledonia Obducted Peridotite Nappe: Offshore Extent and Implications for Obduction and Postobduction Processes, *Tectonics*, 37(4), 1077-1096, doi: doi:10.1002/2017TC004722.
- Pelleter, E., Y. Fouquet, J. Etoubleau, S. Cheron, S. Labanieh, P. Josso, C. Bollinger, and J. Langlade (2017), Ni-Cu-Co-rich hydrothermal manganese mineralization in the Wallis and Futuna back-arc environment (SW Pacific), *Ore Geology Reviews*, 87, 126-146.
- Petersen, S., A. Krättschell, N. Augustin, J. Jamieson, J. R. Hein, and M. D. Hannington (2016), News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources, *Marine Policy*, 70, 175-187.
- Pichocki, C., and M. Hoffert (1987), Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts sampled in French Polynesia, *Marine Geology*, 77, 109-119.
- Rouillard, P., J. Collot, R. Sutherland, F. Bache, M. Patriat, S. Etienne, and P. Maurizot (2017), Seismic stratigraphy and paleogeographic evolution of Fairway Basin, Northern Zealandia, Southwest Pacific: from Cretaceous Gondwana breakup to Cenozoic Tonga–Kermadec subduction, *Basin Research*, 29(S1), 189-212.
- Schlitzer, R. (2021), Ocean Data View.
- Sdrolias, M., R. D. Muller, C. Gaina, R. R. Hillis, and R. D. Müller (2003), Tectonic evolution of the southwest Pacific using constraints from backarc basins, in *Evolution and Dynamics of the Australian Plate*, edited, p. 0, Geological Society of America.
- Sevin, B., P. Maurizot, D. Cluzel, E. Tournadour, S. Etienne, N. Folcher, J. Jeanpert, J. Collot, M. Iseppi, S. Meffre, and M. Patriat (2020), Chapter 7 Post-obduction evolution of New Caledonia, *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 147-188.

Sutherland, R., J. Collot, F. Bache, S. Henrys, D. Barker, G. H. Browne, M. Lawrence, H. Morgans, C. Hollis, C. Clowes, N. Mortimer, P. Rouillard, M. Gurnis, S. Etienne, and W. Stratford (2017), Widespread compression associated with Eocene Tonga-Kermadec subduction initiation, *Geology*, 45, G38617.38611.

Sutherland, R., G. Dickens, P. Blum, C. Agnini, L. Alegret, A. Gayané, J. Bhattacharya, B. Aurelien, L. Chang, J. Collot, M. Cramwinckel, E. Dallanave, M. Drake, S. Etienne, M. Giorgioni, M. Gurnis, D. Harper, H.-H. Huang, A. Keller, and X. Zhou (2020), Continental-scale geographic change across Zealandia during Paleogene subduction initiation, *Geology*, 48.

Tournadour, E., S. J. Jorry, S. Etienne, J. Collot, M. Patriat, M. K. BouDagher-Fadel, F. Fournier, B. Pelletier, P. Le Roy, G. Jouet, and P. Maurizot (2021), Neogene to Quaternary evolution of carbonate and mixed carbonate-siliciclastic systems along New Caledonia's eastern margin (SW Pacific), *Marine Geology*, 438, 106524.

Usui, A., M. Yuasa, S. Yokota, M. Nohara, A. Nishimura, and F. Murakami (1986), Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogasawara (Bonin) Arc, off the Japan Islands, *Marine Geology*, 73(3), 311-322.

Van de Beuque, S., J. M. Auzende, Y. Lafoy, and F. Missègue (1998), Tectonique et volcanisme tertiaire sur la ride de Lord Howe (Sud-Ouest Pacifique) = Tertiary tectonic and volcanism on the Lord Howe Rise (South West Pacific), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.Série 2a : Sciences de la Terre et des Planètes*, 326, 663-669.

Verlaan, P. A., and D. S. Cronan (2021), Origin and variability of resource-grade marine ferromanganese nodules and crusts in the Pacific Ocean: A review of biogeochemical and physical controls, *Geochemistry*, 125741.

Wegorzewski, A. V., and T. Kuhn (2014), The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean, *Marine Geology*, 357, 123-138.

White, M., A. Manocchio, J. Lowe, M. Johnston, and T. Sant (2011), Resource Drilling of the Solwara 1 Seafloor Massive Sulfide (SMS) Deposit.

Zawadzki, D., Ł. Maciąg, R. A. Kotliński, G. A. Kozub-Budzyń, A. Piestrzyński, and R. Wróbel (2018), Geochemistry of cobalt-rich ferromanganese crusts from the Perth Abyssal Plain (E Indian Ocean), *Ore Geology Reviews*, 101, 520-531.

Annexe 1. Composition chimique (XRF) des 104 échantillons de minéralisations Fe-Mn de Nouvelle-Calédonie normalisée à 0% H₂O⁻.

Échantillons	102D	105D	108D	109D	110D	113D	114D	116D	117D	CP5069	DN5064	DN5079	DN5080B	DN5085A	DR01A	DR04C	DR11Ai	DR06B	DR07B
H ₂ O ^{-a}	-	-	-	-	3,23	3,64	8,04	9,17	6,05	3,41	6,02	5,96	2,43	5,95	8,32	7,13	5,54	7,36	6,1
LOI ^b	-	-	-	-	15,88	21,77	19,94	15,14	19,68	19,96	20,3	17,47	21,88	17,9	20,65	16,04	14,34	19,39	20,79
Mn (%)	15,42	16,04	15,52	12,57	13,82	18,00	12,79	14,77	20,05	21,95	23,16	19,85	21,29	15,62	22,38	16,49	14,24	15,13	25,04
Fe	20,69	21,06	21,87	22,46	19,71	22,77	20,44	21,85	22,27	14,94	18,98	18,00	17,93	13,95	19,66	22,34	20,75	22,82	18,48
Fe/Mn	1,34	1,31	1,41	1,79	1,43	1,27	1,60	1,48	1,11	0,68	0,82	0,91	0,84	0,89	0,88	1,35	1,46	1,51	0,74
Si	8,59	8,75	9,10	10,94	10,00	3,12	5,73	7,78	3,18	1,53	1,79	5,67	2,70	8,75	1,90	7,08	10,18	4,73	1,91
Al	2,08	1,74	1,58	2,27	2,22	0,84	2,29	2,21	0,83	0,95	0,99	2,04	1,21	2,48	0,79	1,56	2,00	1,58	0,57
Si/Al	4,13	5,02	5,75	4,82	4,50	3,71	2,50	3,52	3,83	1,61	1,81	2,78	2,23	3,53	2,41	4,54	5,09	2,99	3,35
Mg	1,13	1,08	1,05	1,08	1,06	1,31	1,49	1,25	1,25	1,68	1,59	1,51	1,43	3,92	1,53	1,09	1,05	2,06	1,27
Na	1,46	1,47	1,41	1,44	1,83	1,53	1,83	1,85	1,52	1,18	1,24	1,57	1,29	1,69	1,29	1,48	1,64	1,31	1,42
Ca	2,54	2,43	2,05	2,06	2,19	2,53	5,21	2,27	2,55	7,27	3,49	2,18	3,27	3,03	3,15	2,15	1,86	3,41	2,78
K	0,45	0,37	0,36	0,45	0,38	0,22	0,25	0,44	0,28	0,37	0,26	0,46	0,30	0,73	0,26	0,46	0,54	0,29	0,26
Ti	0,89	0,81	0,83	0,68	0,84	0,67	0,72	0,91	0,95	0,68	1,16	0,93	1,02	0,84	0,82	0,82	0,86	0,38	0,92
P	0,41	0,43	0,41	0,42	0,42	0,58	0,59	0,43	0,53	1,46	0,47	0,46	0,75	0,27	0,63	0,42	0,41	0,65	0,46
As (ppm)	239	264	266	256	225	405	321	242	336	459	339	214	251	125	373	258	238	473	318
Ba	1263	1473	1482	1237	1246	1360	972	1583	1602	2332	1766	1643	1772	1528	1368	2022	1649	1004	1558
Ce	491	529	624	428	579	541	422	587	667	804	910	686	903	415	631	1025	825	834	885
Co	4023	3570	3448	2400	2686	4556	2378	3270	4651	5295	8705	4426	6004	3113	7718	2289	2462	6380	7249
Cr	-	-	-	-	43	59	56	54	31	57	56	84	38	220	39	30	31	318	21
Cu	954	685	550	627	714	422	451	931	594	788	800	1455	1156	1529	435	925	689	340	461
La	191	209	223	171	179	253	185	209	286	229	272	207	230	130	275	265	228	168	295
Mo	297	372	362	269	287	521	263	308	565	500	527	371	516	272	600	568	411	368	726
Nb	64	58	58	50	45	69	48	57	64	61	85	73	73	58	67	49	53	31	49
Nd	117	133	142	110	107	142	107	126	164	132	148	145	129	92	170	186	155	123	167
Ni	2749	2761	2502	1851	2460	2828	2116	2336	3133	4683	5375	4932	5182	6106	4515	2796	2202	5221	4629
Pb	1130	1363	1251	1064	1298	2360	1462	1255	1979	1871	2518	1561	2136	1514	2563	1350	1169	1009	2075
Sr	1259	1349	1326	1155	1309	1802	1432	1434	1849	1601	1770	1456	1635	923	1868	1513	1317	1288	1916
Tl	82	78	60	38	42	80	36	54	104	241	229	95	222	128	135	77	62	100	197
V	572	661	636	591	642	984	756	639	885	833	916	695	771	519	906	872	715	1146	884
Y	149	140	164	150	133	223	164	145	229	170	135	165	183	107	210	117	155	162	201
Zn	577	636	592	582	634	716	603	422	765	972	864	901	901	931	756	855	659	591	711
Zr	513	525	581	554	510	500	403	558	562	337	402	644	483	500	446	623	566	290	425
Pt	0,3	0,3	0,3	0,2	0,6	<0,5	0,6	0,6	<0,5	< 0,5	0,9	< 0,5	1,2	0,7	0,9	< 0,5	0,5	0,6	< 0,5

Échantillons	DR08C	DR10B	DR11Ai-1	DR11Ai-2	DR11Ai-3	DR14F	DR11Ai-4	DR13Bii	DR13Ci	DR13D	DR14F-1	DR19K	DR14F-2	DR14H	DR15A	DR21F	DR18F	DR19K-1	DR19K-2
H₂O^a	11,2	12,27	4,04	22,24	4,18	19,66	4,48	5,9	24,09	9,16	20,01	21,51	11,5	8,64	12,73	8,03	6,18	24,52	8,38
LOI^b	17,61	19,02	14,32	16	16,19	18,43	15,68	17,82	18,46	15,66	18,33	17,47	18,15	15,06	17,51	15,09	18,74	17,48	17,04
Mn (%)	12,98	23,12	13,26	17,37	15,97	18,71	13,49	17,59	16,20	15,73	18,53	16,12	18,10	13,62	16,20	15,05	19,50	15,02	18,25
Fe	19,37	20,96	19,25	20,95	20,93	22,49	21,64	21,93	20,12	20,96	22,28	20,60	22,83	24,06	22,02	22,54	20,24	21,19	20,57
Fe/Mn	1,49	0,91	1,45	1,21	1,31	1,20	1,60	1,25	1,24	1,33	1,20	1,28	1,26	1,77	1,36	1,50	1,04	1,41	1,13
Si	7,89	2,66	10,58	7,29	8,76	4,53	9,84	5,83	5,55	7,47	4,46	6,21	4,81	7,84	6,07	7,30	3,51	6,20	5,58
Al	2,77	0,68	2,89	1,38	1,32	1,03	1,92	1,18	1,90	2,18	1,04	2,16	1,14	2,04	1,38	2,22	1,30	2,35	1,62
Si/Al	2,85	3,91	3,66	5,28	6,64	4,40	5,13	4,94	2,92	3,43	4,29	2,88	4,22	3,84	4,40	3,29	2,70	2,64	3,44
Mg	1,06	1,25	1,12	1,10	1,01	1,14	1,03	1,13	1,21	1,12	1,12	1,16	1,12	1,12	1,21	1,10	1,56	1,17	1,13
Na	1,77	1,48	1,67	1,50	1,49	1,48	1,65	1,56	1,65	1,72	1,47	1,62	1,59	1,63	2,10	1,67	1,48	1,62	1,65
Ca	4,23	2,70	2,04	2,02	1,85	2,48	1,87	2,57	3,13	2,34	2,60	2,72	2,37	1,94	2,45	2,02	3,10	3,36	2,11
K	0,71	0,27	0,81	0,36	0,39	0,36	0,49	0,38	0,48	0,61	0,33	0,56	0,39	0,49	0,34	0,59	0,42	0,56	0,48
Ti	1,02	1,04	1,05	0,90	0,87	1,11	0,68	0,89	1,31	0,97	1,19	1,18	0,85	0,73	0,67	1,06	1,31	0,95	1,38
P	0,36	0,51	0,41	0,39	0,41	0,45	0,41	0,48	0,37	0,39	0,44	0,39	0,49	0,45	0,49	0,40	0,56	0,43	0,37
As (ppm)	175	320	200	266	264	279	249	293	188	189	279	201	293	264	292	205	313	209	207
Ba	1165	1651	1967	1845	1711	1956	1251	1516	1254	1500	1988	1261	1582	1334	1249	1481	1430	1072	1538
Ce	629	768	1011	979	841	859	490	614	735	616	906	701	601	663	509	700	979	533	871
Co	3645	5511	1644	3323	3137	3702	2163	4203	5557	3191	4000	4216	3361	2140	2455	2987	10172	3293	5127
Cr	28	27	14	26	37	30	41	33	31	34	30	24	25	35	24	28	53	25	28
Cu	1012	562	896	958	605	858	547	483	1016	1436	844	1172	613	684	545	1128	690	991	1329
La	167	294	236	296	258	297	188	260	230	197	319	244	257	214	232	241	269	233	275
Mo	223	674	392	600	485	520	307	459	240	274	502	271	459	307	426	302	411	243	361
Nb	68	61	52	53	58	70	49	61	84	57	79	71	60	53	42	59	116	69	74
Nd	84	167	146	229	176	200	103	156	114	104	208	139	146	132	145	155	151	132	171
Ni	2365	3998	2520	2884	2298	2840	2091	2938	2663	2647	2866	2649	2615	1656	2301	2279	3457	2280	3120
Pb	1059	2025	942	1285	1407	1720	1159	1478	1024	1113	1798	946	1539	1231	1245	1025	2217	794	1179
Sr	1157	1984	1298	1473	1428	1752	1227	1621	1270	1283	1707	1270	1639	1261	1515	1248	1637	1283	1394
Tl	83	146	64	123	54	112	43	88	95	74	131	99	76	25	31	79	143	77	121
V	441	874	642	867	817	843	696	774	451	616	830	501	796	742	729	613	743	490	574
Y	104	195	159	152	167	162	156	203	159	127	156	156	208	168	175	172	245	166	167
Zn	534	751	792	753	639	777	597	669	553	660	801	543	705	569	591	616	713	517	603
Zr	537	541	564	599	576	622	572	579	651	589	629	626	638	604	569	614	534	643	657
Pt	< 0,5	< 0,5	0,7	< 0,5	< 0,5	0,5	0,5	< 0,5	0,7	< 0,5	0,7	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,7	0,9	< 0,5	< 0,5

^a Humidité mesurée à 80°C; ^b Perte au feu à 950°C.

Échs	DR21Bii i	DR38 C	DR21F- 1	DR21F- 2	DR22 A	DR29 F	DR38C- 1	DR38C- 2	DR41A i	DR42 B	DR48- 021	DR53- 008	DR54- 009	DW4998 D	DW4998 E	DW5067 B	DW5070 A	DW507 3	DW5086 B
H ₂ O ^a	5,58	3,94	2,87	4,37	5,92	8,67	6,33	8,99	19,16	8,75	6,38	9,82	13,9	0,6	2,61	5,48	17,4	8,88	8,19
LOI ^b	16,01	22,07	18,92	16,86	17,2	17,32	19,98	19,75	15,39	18,28	15,44	19,72	18,96	21,46	21,35	22,16	18,94	20,88	19,44
Mn (%)	15,39	19,68	16,62	14,10	17,09	18,65	21,09	20,17	13,72	19,96	16,47	22,21	22,72	28,96	14,03	22,20	20,48	22,65	20,35
Fe	18,85	19,80	22,10	23,67	20,45	22,05	20,95	20,32	20,61	23,89	19,64	21,22	18,66	1,82	13,67	19,82	19,74	20,58	20,99
Fe/Mn	1,22	1,01	1,33	1,68	1,20	1,18	0,99	1,01	1,50	1,20	1,19	0,96	0,82	0,06	0,97	0,89	0,96	0,91	1,03
Si	8,89	3,47	5,75	7,15	7,04	4,94	2,94	3,88	8,78	2,54	8,40	2,67	3,33	0,35	1,07	0,90	4,04	0,86	3,65
Al	2,56	0,92	1,57	2,21	1,95	1,22	0,90	0,97	2,85	0,92	1,73	0,66	1,02	0,28	1,99	0,50	1,35	0,78	1,04
Si/Al	3,47	3,77	3,66	3,24	3,61	4,05	3,27	4,00	3,08	2,76	4,86	4,05	3,26	1,25	0,54	1,80	2,99	1,10	3,51
Mg	1,17	1,13	1,04	1,10	1,16	1,12	1,19	1,15	1,31	1,33	1,12	1,20	1,32	1,25	3,58	1,50	1,25	1,62	1,29
Na	2,05	1,35	1,52	1,64	1,66	1,47	1,39	1,49	1,77	1,25	1,74	1,33	1,55	0,30	0,42	1,04	1,54	1,08	1,45
Ca	1,89	2,91	1,96	1,93	2,15	2,33	2,61	3,20	2,07	3,05	2,14	2,60	2,95	17,79	13,52	4,73	2,60	3,68	2,40
K	0,81	0,32	0,47	0,59	0,53	0,41	0,32	0,37	0,68	0,28	0,47	0,32	0,32	0,13	0,20	0,19	0,37	0,20	0,37
Ti	0,86	1,19	1,10	0,79	0,74	1,10	1,34	1,05	0,82	0,79	1,00	0,85	0,90	0,05	0,17	0,66	1,08	0,86	1,12
P	0,32	0,42	0,39	0,44	0,40	0,46	0,42	0,45	0,38	0,60	0,38	0,51	0,51	1,88	1,97	0,55	0,44	0,63	0,49
As (ppm)	149	262	223	227	216	272	277	277	201	387	228	338	309	63	260	476	250	460	313
Ba	1484	1584	1666	1217	1474	1762	1882	1377	1192	2150	1284	1677	1135	4151	869	1478	1537	1643	1553
Ce	601	964	778	538	498	771	1122	749	492	1080	740	905	607	86	221	709	728	814	712
Co	2894	6172	3436	2273	2310	3805	6776	5745	2185	5371	4455	5531	6732	405	1409	6130	5524	6410	6473
Cr	32	25	27	27	25	25	27	23	43	78	36	24	37	<10	35	60	30	70	43
Cu	2333	630	949	1045	1245	612	702	576	1306	586	999	404	476	108	655	346	1013	487	647
La	148	300	279	226	187	265	332	295	173	271	239	287	257	74	80	268	273	229	257
Mo	281	438	406	274	354	451	499	460	220	639	362	703	581	82	410	655	450	621	500
Nb	48	78	63	52	44	67	91	68	48	60	70	55	58	7	18	58	62	78	76
Nd	81	205	202	151	98	150	215	179	104	159	151	177	152	30	30	165	170	117	119
Ni	3284	3314	2532	1944	3556	2948	3514	3436	3149	3169	3001	3509	4599	736	6936	4497	4057	4958	4083
Pb	956	1877	1231	897	1087	1652	2171	1716	879	2236	1106	2006	1635	171	322	2976	1539	3091	3035
Sr	1154	1666	1414	1231	1351	1649	1750	1702	1097	1956	1321	1864	1727	1119	719	1965	1590	1864	1769
Tl	74	139	86	57	88	93	178	114	76	161	112	148	131	43	78	186	155	205	201
V	629	761	688	594	646	752	852	756	510	1144	631	954	779	289	796	1246	695	1279	944
Y	69	191	193	186	146	208	177	211	133	121	154	205	172	68	74	200	152	172	168
Zn	662	657	645	563	715	720	726	644	670	853	547	712	618	161	459	654	491	704	729
Zr	505	591	664	642	574	658	570	615	569	428	584	498	498	39	91	291	547	345	342
Pt	0,7	0,9	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,2	< 0,5	0,6	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,6	0,9	0,7

Annexe 1. (suite).

^a Humidité mesurée à 80°C; ^b Perte au feu à 950°C.

Échs	DW508 7	DW5089 B	DW5090 B	DW5091 A	DW77 2	DW77 4	E- DR08B	DW778 B	DW778 D	DW778D 2	DW248 2	E-DR08B- 1	E-DR08B- 2	E-DR08B- 3	GO14 D	GO15 D	GO16 D	GO302 D	GO18 D
H ₂ O ^a	14,69	8,04	14,64	13,39	8,18	9,86	7,99	0,42	0,36	0,82	1,59	5,67	7,86	5,51	22,26	17,65	20,54	4,94	4,68
LOI ^b	20,28	20,55	22,69	18,18	20,13	21,12	16,04	17,34	17,76	17,36	18,91	17,61	17,54	15,57	20,89	22,34	18,19	15,72	20,54
Mn (%)	20,37	22,65	22,21	18,77	26,90	23,69	16,05	50,38	48,37	48,82	38,44	18,03	20,45	14,74	21,58	16,03	18,00	15,78	20,39
Fe	19,20	19,23	19,06	19,43	17,38	17,43	20,66	1,27	1,59	1,28	2,80	19,36	20,10	21,22	20,71	19,63	18,53	20,67	21,64
Fe/Mn	0,94	0,85	0,86	1,04	0,65	0,74	1,29	0,03	0,03	0,03	0,07	1,07	0,98	1,44	0,96	1,22	1,03	1,31	1,06
Si	4,11	2,50	2,04	5,43	1,25	1,65	7,64	0,49	0,53	0,51	0,29	6,86	5,49	8,20	2,11	4,57	6,23	7,74	2,69
Al	1,21	0,97	0,89	1,85	0,69	0,90	1,89	0,25	0,27	0,23	0,57	1,52	0,97	2,25	0,85	1,22	2,07	2,11	0,69
Si/Al	3,40	2,58	2,29	2,94	1,81	1,83	4,04	1,96	1,96	2,22	0,51	4,51	5,66	3,64	2,48	3,75	3,01	3,67	3,90
Mg	1,28	1,41	1,37	1,34	1,59	1,74	1,14	0,99	0,92	0,80	2,31	1,15	1,21	1,13	1,30	1,59	1,57	1,05	1,26
Na	1,54	1,54	1,25	1,62	1,30	1,18	1,68	0,42	0,32	0,21	0,84	1,70	1,86	1,72	1,31	1,62	1,74	1,91	1,57
Ca	2,35	2,71	2,95	2,62	3,13	4,35	2,40	6,21	7,54	8,14	8,67	2,30	2,50	2,42	2,86	4,22	2,62	2,33	2,61
K	0,37	0,27	0,26	0,40	0,28	0,22	0,41	0,20	0,13	0,11	0,37	0,39	0,33	0,45	0,29	0,18	0,48	0,47	0,26
Ti	1,10	0,89	0,88	0,77	0,80	0,75	0,86	0,05	0,08	0,06	0,10	1,03	1,16	0,75	1,03	0,83	0,61	0,98	0,65
P	0,47	0,52	0,58	0,52	0,50	0,55	0,47	0,53	0,41	0,37	1,00	0,41	0,47	0,49	0,51	0,48	0,51	0,41	0,55
As (ppm)	269	313	326	260	412	402	279	71	72	59	89	269	293	277	325	289	255	244	371
Ba	1661	1361	1547	1258	1341	1134	1423	8460	4946	3339	11719	1610	1674	1319	1846	1003	1218	1679	1431
Ce	801	585	759	494	673	576	599	148	112	81	275	868	808	471	949	467	387	701	554
Co	6096	6389	6796	4232	9774	8738	3756	514	898	655	1148	5074	6010	2959	6547	4310	3012	3145	4466
Cr	57	42	44	52	46	41	41	<10	<10	<10	12	41	36	40	52	47	70	34	49
Cu	1126	822	632	898	424	348	598	283	242	187	295	802	657	537	938	532	1034	547	530
La	261	249	257	196	280	303	226	88	105	96	88	281	301	193	288	246	185	251	268
Mo	469	560	581	424	713	635	401	168	141	128	228	472	560	354	587	354	389	390	620
Nb	69	64	67	55	66	68	63	5	10	7	15	76	71	56	77	66	43	59	47
Nd	161	136	154	100	180	194	129	30	30	30	30	183	192	106	181	151	102	163	146
Ni	4262	4620	4455	4016	5972	5086	2976	1095	1432	1178	4138	3585	3817	2642	4147	2518	5133	2445	3225
Pb	1845	2118	2397	1576	3268	3153	1535	219	359	257	349	1859	1834	1411	2395	1552	1143	1243	2330
Sr	1611	1775	1786	1484	2004	2059	1481	1858	1440	1261	2656	1537	1733	1438	1808	1556	1240	1517	1860
Tl	146	176	221	115	213	169	96	77	75	61	141	156	173	63	221	48	125	58	86
V	794	832	945	746	1065	995	753	271	263	214	525	797	845	729	938	640	682	699	957
Y	146	185	172	162	206	233	173	62	65	61	41	155	180	183	134	182	150	170	227
Zn	821	773	788	507	660	612	674	182	201	111	589	698	710	664	831	562	833	651	740

Zr	< 0,5	0,7	1,0	< 0,5	1,3	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,0	521	513	430	486	437	593	452
Pt	< 0,5	0,7	1,0	< 0,5	1,3	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,0	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,8	< 0,5	< 0,5



Annexe 1. (suite).

^a Humidité mesurée à 80°C; ^b Perte au feu à 950°C.

Échs	GO20 2	GO20 9	GO20 D	GO327 D	GO302D- 1	GO302D- 2	GO31 0	GO314D1 0	GO316D3 1	GO350- D6	GO317D1 0	GO32 0	GO321D 2	GO322D 4	GO323D 4	GO325D 2	GO327D- 1	GO327D- 2	GO327D- 3
H ₂ O ^a	22,57	20,21	21,31	15,06	8,89	6,38	16,57	-	-	12,46	11,55	-	-	-	-	-	9,76	4,88	18,71
LOI ^b	17,93	20,7	19,51	13,96	18,63	15,4	14,38	-	-	18,68	16,76	-	-	-	-	-	15,86	14,27	14,36
Mn (%)	18,19	17,77	20,85	12,41	16,61	15,34	10,77	7,73	11,36	17,25	12,06	18,37	13,24	16,97	10,92	11,83	13,11	13,96	12,71
Fe	19,85	21,74	21,16	21,03	19,61	22,35	18,49	18,97	21,13	20,28	23,99	20,75	22,49	22,91	22,03	22,43	23,86	22,44	22,90
Fe/Mn	1,09	1,22	1,01	1,69	1,18	1,46	1,72	2,45	1,86	1,18	1,99	1,13	1,70	1,35	2,02	1,90	1,82	1,61	1,80
Si	6,89	4,53	3,06	11,96	6,64	7,50	10,78	13,67	10,59	6,41	8,72	6,08	8,92	7,02	14,09	11,75	9,03	9,84	10,53
Al	1,26	1,23	0,86	1,97	1,81	2,07	4,06	4,57	3,59	1,62	2,86	1,93	3,03	1,79	2,13	2,72	1,36	1,57	1,58
Si/Al	5,47	3,68	3,56	6,07	3,67	3,62	2,66	2,99	2,95	3,96	3,05	3,15	2,94	3,92	6,61	4,32	6,64	6,27	6,66
Mg	1,08	1,19	1,42	1,13	1,06	1,07	1,52	2,22	1,35	1,13	1,37	1,33	1,43	1,14	1,03	1,04	1,07	1,15	1,06
Na	1,57	1,42	1,47	1,71	1,71	1,85	2,23	1,66	1,75	1,54	1,81	1,73	1,66	1,29	1,28	1,45	1,45	1,54	1,52
Ca	2,03	2,45	2,75	1,54	2,47	2,23	3,00	3,94	2,05	1,97	2,30	2,27	1,90	2,12	1,30	1,50	1,69	1,74	1,53
K	0,39	0,35	0,24	0,44	0,45	0,44	0,74	0,64	1,02	0,53	0,46	0,46	0,58	0,48	0,44	0,55	0,39	0,37	0,38
Ti	0,95	0,76	0,93	0,69	1,06	0,81	0,90	0,82	0,78	1,01	0,98	0,77	0,85	1,00	0,67	0,87	0,62	0,66	0,72
P	0,39	0,53	0,57	0,36	0,39	0,47	0,32	0,30	0,38	0,37	0,39	0,42	0,37	0,41	0,36	0,34	0,45	0,38	0,41
As (ppm)	252	328	366	253	234	272	144	192	211	219	224	249	231	268	252	207	287	281	279
Ba	1564	1462	1216	1513	1745	1574	885	1102	1185	1725	1218	972	1120	1518	1297	1385	1526	1676	1708
Ce	868	514	648	998	824	545	406	342	348	885	477	588	534	686	808	601	803	1007	1093
Co	4283	3965	7001	2573	3711	2391	1765	1211	1642	3236	1980	2604	2228	3637	2437	2073	2268	2777	2521
Cr	25	28	44	71	25	32	48	-	-	25	-	35	-	-	-	-	63	56	58
Cu	915	444	452	898	560	502	973	434	695	990	555	648	824	959	708	773	574	919	658
La	268	245	310	224	282	216	174	154	156	260	178	244	179	230	167	165	211	259	244
Mo	518	491	457	422	394	387	156	179	208	442	164	491	227	350	279	247	393	577	427
Nb	57	57	70	52	66	49	41	33	37	55	47	29	45	57	57	52	49	50	50
Nd	186	146	193	175	201	119	121	110	114	165	135	188	140	161	125	152	125	209	173
Ni	3111	2858	3737	2039	2687	2086	1588	855	1573	2876	1161	2750	1823	2425	1601	1313	1647	2295	1676
Pb	1288	1682	2382	1085	1351	1091	469	637	823	1306	788	761	795	1075	1058	957	1211	1329	1165
Sr	1445	1679	1747	1133	1535	1506	962	819	1061	1375	1109	1286	1002	1364	998	955	1305	1281	1229
Tl	108	80	120	54	76	36	48	8	28	93	13	69	38	52	24	12	8	69	19
V	721	844	892	742	686	767	438	534	519	669	467	666	524	619	592	518	778	880	788

Y	1.5. P. Stasrak - Minéralisations profondes de Nouvelle-Calédonie - Rapport SGNC-2022(02)													153	164	143	153	114	138	169	113	132
Zn	601	706	738	654	641	668	417	426	556	661	475	449	441	566	562	453	659	525	652			
Zr	553	505	502	549	602	564	478	485	513	547	657	416	578	641	583	599	616	588	575			
Pt	0,5	< 0,5	0,8	< 0,5	n.m.	< 0,5	< 0,5	< 0,2	0,3	< 0,5	0,3	< 0,5	-	0,4	0,3	-	< 0,5	< 0,5	< 0,5			

Annexe 1. (suite).

^a Humidité mesurée à 80°C; ^b Perte au feu à 950°C.

Échantillons	GO327D-4	GO338D2	GO347D	GO348D6	GO350-D6-1	GO350-D6-2	GO350-D6-3	GO3D	V-DR08B
H ₂ O ^a	3,84	-	-	9,1	5,07	11,48	9,26	21,3	6,01
LOI ^b	0	-	-	18,28	14	15,5	21,03	18,72	15,8
Mn (%)	13,83	18,70	19,57	21,49	19,64	17,83	19,45	17,15	15,26
Fe	22,95	22,75	18,73	20,68	22,32	21,75	21,04	22,75	22,07
Fe/Mn	1,66	1,22	0,96	0,96	1,14	1,22	1,08	1,33	1,45
Si	9,64	4,74	5,52	3,17	4,70	6,57	4,06	4,88	7,41
Al	1,43	1,27	1,57	1,23	0,96	1,49	1,01	1,14	2,12
Si/Al	6,74	3,74	3,51	2,58	4,90	4,41	4,02	4,28	3,50
Mg	1,11	1,36	1,27	1,35	1,28	1,05	1,07	1,16	1,08
Na	1,41	1,15	1,56	1,42	1,94	1,65	1,42	1,54	1,68
Ca	1,84	2,49	3,65	2,80	3,72	2,07	2,16	2,30	2,27
K	0,37	0,36	0,46	0,35	0,23	0,44	0,37	0,38	0,56
Ti	0,71	1,10	0,94	0,99	0,72	1,13	0,89	0,87	1,04
P	0,44	0,47	0,86	0,52	0,79	0,40	0,42	0,47	0,41
As (ppm)	281	296	236	340	326	236	262	292	229
Ba	1821	1687	1511	2230	1400	1854	1600	1576	1692
Ce	997	652	566	1184	715	1056	774	750	750
Co	2935	5708	4119	5349	2493	3466	3369	4038	2677
Cr	73	-	-	32	29	24	24	68	33
Cu	928	867	878	705	729	761	682	553	734
La	239	240	210	267	257	295	272	245	231
Mo	544	377	438	615	478	488	567	441	381
Nb	51	81	46	66	52	58	47	57	61
Nd	182	136	120	147	208	209	165	150	138
Ni	2283	3477	3654	3789	2719	2639	2725	2485	2631
Pb	1447	1830	1528	2098	1335	1471	1446	1548	1503
Sr	1313	1491	1490	1929	1545	1523	1563	1542	1392
Tl	61	98	103	158	54	86	94	65	90
V	954	698	662	960	770	713	792	761	701
Y	103	186	191	151	155	175	217	191	108
Zn	890	725	631	831	640	675	625	708	733

Zr	P. Staszak - Généralisations profondes de Nouvelle-Calédonie - Rapport SGN 2022(03)	590	594	595	567	540	569	607
Pt		0,6	0,5	< 0,2	-	0,6	< 0,5	< 0,5



Annexe 1. (suite).

^a Humidité mesurée à 80°C; ^b Perte au feu à 950°C.