

Session 1 : Off-shore - Inspection, Maintenance, Réparation
Off-shore - Inspection, Maintenance, Repair

**HYDROTHERMALISME OCEANIQUE - EXPLORATION - METHODOLOGIE ET
INSTRUMENTATION ASSOCIEE**

H. BOUGAULT, J.L. CHARLOU, J.P. DONVAL, Y. FOUQUET, H. PELLE

*IFREMER, Centre de Brest
B.P. 70, 29280 PLOUZANE, (FRANCE)*

RESUME - Processus d'échanges entre l'océan et la lithosphère, l'hydrothermalisme océanique recouvre les domaines de la connaissance fondamentale et des aspects métallogéniques plus finalisés (connaissance de la formation des gisements sulfurés). L'exploration couvre toutes échelles, du site hydrothermal aux systèmes "dorsale médio-océanique". Elle nécessite l'utilisation des moyens modernes de cartographie et d'imagerie. Elle utilise les anomalies physiques et chimiques créées dans l'océan. Un effort particulier doit être consenti pour obtenir des données à l'échelle couverte par l'utilisation des ROV (Remote Operated Vehicle).

**OCEANIC HYDROTHERMALISM - EXPLORATION - METHODOLOGY AND
ASSOCIATED INSTRUMENTATION**

SUMMARY - Responsible for large exchanges between the Ocean and the Lithosphere, the oceanic hydrothermalism covers wide scientific domains, from the ocean chemistry to metallogeny. The exploration covers all scales, from the hydrothermal site to the Mid-oceanic ridge system. Modern bathymetry and imagery are required. Physical and chemical anomalies created in the ocean are used to detect and map its distribution. A specific effort in the field of ROV (Remote Operated Vehicle) is needed to acquire data at the corresponding working scale.

L'hydrothermalisme océanique

Tout gradient thermique dans un fluide, ou dans un milieu perméable imprégné d'un fluide, génère une cellule de convection de ce fluide. Un système volcanique actif sous-marin remplit les conditions nécessaires à la mise en place de cellules de convection hydrothermale. En effet, ces formations sous-marines constituent un milieu poreux en raison de la présence de failles décimétriques à métriques (liées, par exemple, à un système en extension) et de fissures micrométriques à millimétriques (associées à des effets de contraintes thermiques). A l'axe d'une dorsale, les gradients thermiques sont très élevés et le fluide, l'eau de mer, est disponible à volonté ...

Les dorsales médio-océaniques qui parcourent la surface du globe, sous l'océan, sur plus de 60 000 km (Fig. 1) constituent le système volcanique le plus important de la planète.

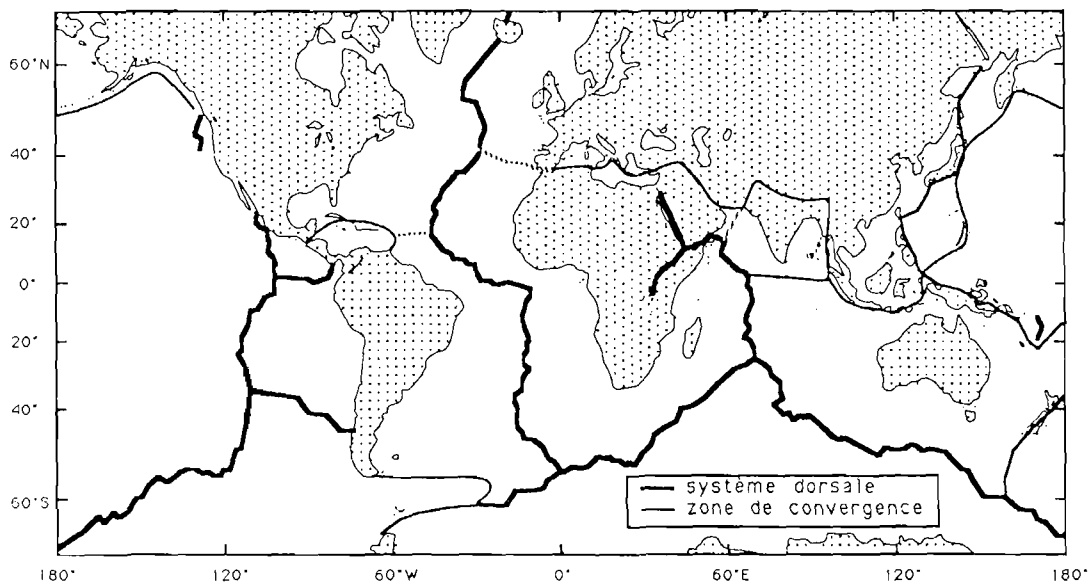


Figure 1. Le système "Dorsale Médio-Océanique". Les dorsales médio-océaniques parcourent le globe sur plus de 60000 km. C'est le système volcanique le plus important de la planète. Par la mise en place de cellules de convection hydrothermale dans la croûte océanique jeune, elles constituent le lieu privilégié d'échanges de matière et d'énergie entre l'océan et la lithosphère.

Les systèmes hydrothermaux qui y prennent place génèrent des échanges importants entre l'océan et la lithosphère. A des températures de plusieurs centaines de degrés sous des pressions de plusieurs centaines de bars, des échanges chimiques ont lieu entre eau de mer et croûte océanique basaltique. On considère que l'ensemble des eaux océaniques circulerait au travers de ces formations à l'axe des dorsales tous les cinq à onze millions d'années.

Au cours de l'entrée de l'eau de mer à l'intérieur du système volcanique, certains éléments précipitent. Au contraire, au cours de l'histoire de la circulation des fluides dans la croûte océanique, certains éléments, ou composés de la formation rocheuse, seront dissous. Ces fluides hydrothermaux peuvent retourner vers l'océan, constituant des sources hydrothermales dont la température peut dépasser 400°C. Au cours de ce processus, certains éléments, ou composés, sont apportés à l'océan, alors que d'autres précipitent immédiatement. C'est ainsi que se forment les dépôts sulfurés de cuivre, zinc ... Certains gisements formés dans ces conditions, il y a plusieurs centaines de millions d'années, sont aujourd'hui -après une histoire géologique complexe- exploités à terre.

Les sites hydrothermaux actifs sont le lieu de développement d'une activité biologique intense, uniquement basée sur la chimiosynthèse. Ce système biologique trouve son énergie au niveau de l'oxydation bactérienne du soufre contenu dans ces fluides.

Echanges Océan-Lithosphère, compréhension de la formation de gisements miniers, biologie associée aux gisements hydrothermaux ... ; tous ces aspects demandent à mieux connaître les mécanismes physiques et chimiques qui régissent l'Hydrothermalisme Océanique".

Quelles méthodes, quels outils, quelle instrumentation utiliser ... d'abord pour localiser et pour identifier les zones hydrothermallement actives ?...

Différents contextes géodynamiques et structure des dorsales médio-océaniques

L'étude des systèmes d'échanges Océan-Lithosphère s'adresse à plusieurs disciplines ; géologie, physique, chimie, biologie ... Mais quelle que soit l'approche faite par ces disciplines, c'est avant tout un problème d'échelles ... depuis l'échelle globale planétaire -le système dorsale parcourant le globe sur plus de 60 000 km- à l'échelle d'un système bactérien fonctionnant sur un site hydrothermal.

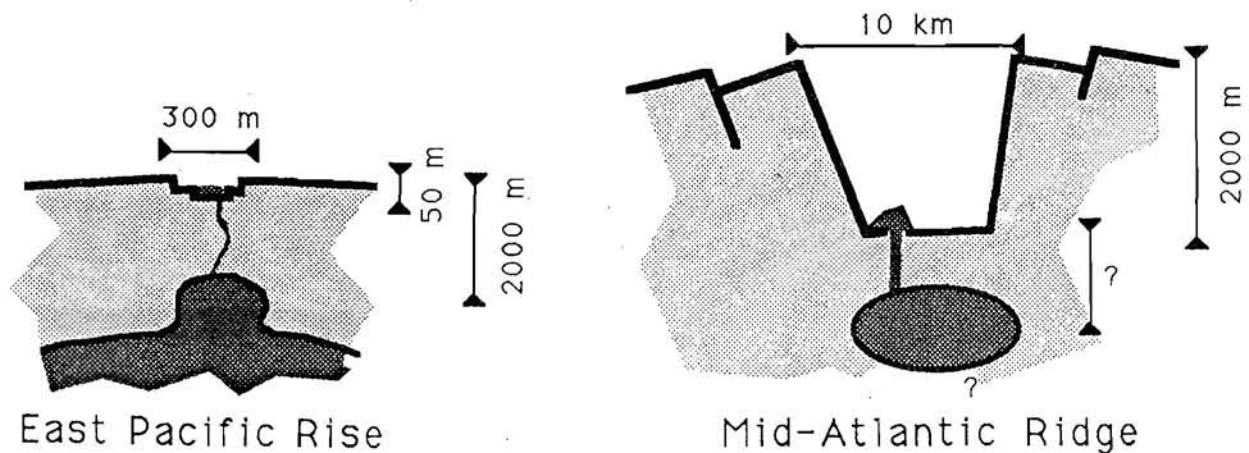


Figure 2. Exemples de structures axiales très différentes. La largeur de construction de la dorsale Est Pacifique (EPR) (taux d'expansion : 6 à 18 cm/an) est très étroite (300 m), tandis qu'elle est de l'ordre de la dizaine de kilomètres pour la dorsale médio-atlantique (MAR). La dépression axiale (graben) de l'EPR n'est que de quelques dizaines de mètres, tandis que celle de la MAR est de 2000 mètres. Ces caractéristiques traduisent des modes de fonctionnement très différents, à prendre en compte pour l'étude de l'hydrothermalisme.

Les dorsales médio-océaniques ne sont pas toutes équivalentes. Elles sont caractérisées par des taux d'expansion, qui varient de 1 cm/an à 18 cm/an. D'un point de vue morphologique, certaines sont caractérisées par une vallée axiale de plus de 2 000 mètres alors que d'autres ne présentent qu'une dépression axiale de quelques dizaines de mètres (Fig. 2). L'axe d'une dorsale peut être décalée de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres par des "Overlapping Spreading Centers" (OSC) ou des "zones de fracture". Ces discontinuités sont évidemment à prendre en compte vis à vis de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique. Certains types d'expansion océanique situés en arrière des arcs insulaires (Japon, Tonga-Kermadec,...) présentent des propriétés spécifiques, notamment vis-à-vis des propriétés chimiques des laves qui forment la croûte océanique. Toutes ces observations constituent autant de paramètres à prendre en compte pour choisir des contextes "géodynamiques" aussi typés et différents que possible et y étudier les manifestations hydrothermales.

Autrement dit, le premier filtre à utiliser vis-à-vis de ce problème des échelles de travail pour l'étude de l'hydrothermalisme océanique est la connaissance acquise des différents types de contexte volcanique océanique connus à ce jour.

Les dorsales médio-océaniques constituent -et de très loin- le système volcanique le plus important de la planète : il convient, pour être exhaustif, d'ajouter le contexte "Volcanisme Intraplaque". Il s'agit d'un volcanisme ponctuel, "intraplaque lithosphérique", faisant partie ou non d'un système volcanique organisé (ex. chaîne des volcans d'Hawaii) mais dont les propriétés sont très différentes de celles du volcanisme des dorsales médio-océaniques.

Contexte Structural : Bathymétrie, Imagerie

Un type de volcanisme océanique étant choisi suivant un critère ou une combinaison des critères cités, toute approche d'étude de l'hydrothermalisme passe par une connaissance des structures géologiques aussi précise que possible. Un système bathymétrique monofaisceau ne permettait, il a guère 15 ans, d'obtenir qu'un profil bathymétrique linéaire suivant la route du navire. En 1976, la disponibilité d'un système multifaisceau (type "Seabeam") a permis de dresser des cartes à partir de profils couvrant en largeur les deux tiers de la profondeur. Aujourd'hui, un système type "Simrad" mis en place à bord du nouveau navire de recherche "l'Atalante" permet une couverture, suivant profil, qui atteint quatre fois la profondeur. Les acquisitions de données magnétiques et gravimétriques constituent les compléments indispensables à la caractérisation d'un segment de dorsale.

L'efficacité d'une cellule de convection hydrothermale est fonction de la perméabilité de la formation, donc des systèmes de failles ou fissures. La résolution des systèmes de cartographie multifaisceaux ne permet pas de les observer. Par contre, les sonars latéraux, comme le système français SAR (Système Acoustique Remorqué), avec une résolution de l'ordre du mètre, permettent de dresser une image continue d'un système de failles. Cette technique a permis de relever la structure fine de l'axe de la dorsale Est-Pacifique sur une centaine de kilomètres, démontrant que la largeur active de construction de la croûte océanique est remarquablement étroite et constante : 350 mètres \pm 100 mètres.

L'étude de l'hydrothermalisme océanique suppose la meilleure connaissance des structures potentiellement hydrothermales. Les outils et méthodes pour y parvenir (bathymétrie, imagerie, magnétisme, gravimétrie...) existent : néanmoins, l'amélioration de ces méthodes et l'innovation pour mieux connaître ces structures ne sauraient être qu'encouragées.

Détection de l'activité hydrothermale.

Les caractéristiques géologiques d'une structure étant connues (un segment de dorsale médio-océanique d'une centaine de kilomètres par exemple), les traceurs de l'activité hydrothermale sont constitués par les anomalies physiques et chimiques créées dans l'eau de mer par les apports hydrothermaux.

- température
- néphélogéométrie
- concentration en manganèse
- concentration en méthane
- concentrations et rapports isotopiques d'hélium

Il existe d'autres traceurs chimiques potentiels (Fer, radon...).

La figure 3 présente des exemples de profils verticaux de l'un de ces traceurs au droit de la dorsale Est-Pacifique (EPR) et de la dorsale médio-atlantique (MAR). La difficulté d'obtenir une image de la variation d'activité hydrothermale le long de l'axe d'une dorsale (sur 100 km, par exemple), à partir de tels profils verticaux est illustrée par les deux profils de l'EPR (Fig. 3). En effet, ces deux profils très différents ne sont séparés que de 2 milles ... Des profils verticaux réalisés avec un pas convenable (tous les dix

milles, par exemple) sont insuffisants pour localiser un site avec une résolution convenable. Des profils plus serrés le long de l'axe conduiraient à un temps de réalisation prohibitif et à des difficultés de positionnement relatif de ces profils (dérive au cours d'une opération de palanquée verticale).

Une image continue de la variation d'activité hydrothermale est obtenue grâce à l'utilisation des "palanquées dynamiques" (PLD). Cet ensemble est constitué de quatre systèmes fixés à différents niveaux sur un câble traîné à faible vitesse (Fig. 4). Chacun de ces systèmes comprend dix bouteilles de prélèvement d'eau et un conteneur électronique destiné à enregistrer certains paramètres (enregistrements des temps de fonctionnement des bouteilles, de la pression, température ...). Chaque bouteille n'est pas remplie instantanément : constituée d'un cylindre et d'un piston, elle se remplit proportionnellement à la distance parcourue grâce à l'utilisation d'une hélice qui actionne une pompe péristaltique (Fig. 4). Le principe utilisé permet l'acquisition d'un véritable échantillon moyen sur la distance parcourue. L'hélice est réglée pour remplir une bouteille sur un mille. Lorsqu'une bouteille est remplie, un plateau de distribution permet de remplir la bouteille suivante.

La figure 5 présente un résultat obtenu sur la dorsale Est- Pacifique, le long d'une centaine de kilomètres. Les panaches de manganèse et de méthane fournissent des images cohérentes de la variation d'activité le long de l'axe. L'activité est présente tout le long de l'axe. Dans la partie nord (droite de la figure) où l'activité est la plus faible, les signaux de manganèse et de méthane sont quatre à cinq fois supérieurs au bruit de fond de l'eau de mer. Cette activité hydrothermale n'est pas répartie d'une manière aléatoire. La partie la plus active de l'axe est située entre deux discontinuités axiales (overlapping spreading centers à 12°37'N et à 12°54'N).

L'acquisition de ces résultats suppose la réalisation des prélèvements, mais également les mesures -Mn, CH₄- à bord du navire océanographique. Ces mesures, en temps quasi-réel, sont nécessaires pour la conduite de la campagne. Ces mesures, au dixième de partie par milliard près pour le manganèse et au nanolitre/litre près pour le méthane, à bord d'un navire océanographique, constituent en elles-mêmes un sujet qui n'est pas traité dans le cadre de cet article.

Localisation et identification des sites hydrothermaux

Les méthodologies et les outils doivent être adaptés aux différentes échelles de travail. Après avoir localisé un segment hydrothermalement actif (une dizaine de kilomètres), la localisation des sites, l'étude de ces sites et l'étude des transferts hydrothermaux (fluides, précipités sulfurés...) ne sont pour une large part réalisables qu'à partir d'un submersible. Néanmoins, la visibilité à partir d'un submersible n'est que d'une dizaine de mètres. Il convient donc de doter le submersible de moyens d'apprécier l'existence de sites actifs autrement que par la simple observation visuelle au travers d'un hublot. En 1989, lors de la campagne franco-allemande NAUTILAU, le Nautila a été équipé pour la première fois d'un système bathysonde-minirosette (Fig. 6). Les anomalies de température (au 1/1000 de degré) détectées par la bathysonde constituent un guide utilisable au cours de la plongée. Les échantillons d'eau, prélevés à la demande en cours de plongées et analysés au retour du submersible à bord du navire de surface, permettent de préciser les informations de température acquises en temps réel et d'orienter la plongée suivante. La figure 6 montre les anomalies de température enregistrées au cours d'une plongée suivant des profils verticaux (a) et, au voisinage du fond, suivant la route du submersible (b). Certaines de ces anomalies atteignent plusieurs degrés dans l'environnement des sources (à quelques dizaines de mètres). D'autres anomalies importantes correspondent au passage au dessus de failles.

milles, par exemple) sont insuffisants pour localiser un site avec une résolution convenable. Des profils plus serrés le long de l'axe conduiraient à un temps de réalisation prohibitif et à des difficultés de positionnement relatif de ces profils (dérive au cours d'une opération de palanquée verticale).

Une image continue de la variation d'activité hydrothermale est obtenue grâce à l'utilisation des "palanquées dynamiques" (PLD). Cet ensemble est constitué de quatre systèmes fixés à différents niveaux sur un câble traîné à faible vitesse (Fig. 4). Chacun de ces systèmes comprend dix bouteilles de prélèvement d'eau et un conteneur électronique destiné à enregistrer certains paramètres (enregistrements des temps de fonctionnement des bouteilles, de la pression, température ...). Chaque bouteille n'est pas remplie instantanément : constituée d'un cylindre et d'un piston, elle se remplit proportionnellement à la distance parcourue grâce à l'utilisation d'une hélice qui actionne une pompe péristaltique (Fig. 4). Le principe utilisé permet l'acquisition d'un véritable échantillon moyen sur la distance parcourue. L'hélice est réglée pour remplir une bouteille sur un mille. Lorsqu'une bouteille est remplie, un plateau de distribution permet de remplir la bouteille suivante.

La figure 5 présente un résultat obtenu sur la dorsale Est- Pacifique, le long d'une centaine de kilomètres. Les panaches de manganèse et de méthane fournissent des images cohérentes de la variation d'activité le long de l'axe. L'activité est présente tout le long de l'axe. Dans la partie nord (droite de la figure) où l'activité est la plus faible, les signaux de manganèse et de méthane sont quatre à cinq fois supérieurs au bruit de fond de l'eau de mer. Cette activité hydrothermale n'est pas répartie d'une manière aléatoire. La partie la plus active de l'axe est située entre deux discontinuités axiales (overlapping spreading centers à 12°37'N et à 12°54'N).

L'acquisition de ces résultats suppose la réalisation des prélèvements, mais également les mesures -Mn, CH₄- à bord du navire océanographique. Ces mesures, en temps quasi-réel, sont nécessaires pour la conduite de la campagne. Ces mesures, au dixième de partie par milliard près pour le manganèse et au nanolitre/litre près pour le méthane, à bord d'un navire océanographique, constituent en elles-mêmes un sujet qui n'est pas traité dans le cadre de cet article.

Localisation et identification des sites hydrothermaux

Les méthodologies et les outils doivent être adaptés aux différentes échelles de travail. Après avoir localisé un segment hydrothermalement actif (une dizaine de kilomètres), la localisation des sites, l'étude de ces sites et l'étude des transferts hydrothermaux (fluides, précipités sulfurés...) ne sont pour une large part réalisables qu'à partir d'un submersible. Néanmoins, la visibilité à partir d'un submersible n'est que d'une dizaine de mètres. Il convient donc de doter le submersible de moyens d'apprécier l'existence de sites actifs autrement que par la simple observation visuelle au travers d'un hublot. En 1989, lors de la campagne franco-allemande NAUTILAU, le Nautila a été équipé pour la première fois d'un système bathysonde-minirosette (Fig. 6). Les anomalies de température (au 1/1000 de degré) détectées par la bathysonde constituent un guide utilisable au cours de la plongée. Les échantillons d'eau, prélevés à la demande en cours de plongées et analysés au retour du submersible à bord du navire de surface, permettent de préciser les informations de température acquises en temps réel et d'orienter la plongée suivante. La figure 6 montre les anomalies de température enregistrées au cours d'une plongée suivant des profils verticaux (a) et, au voisinage du fond, suivant la route du submersible (b). Certaines de ces anomalies atteignent plusieurs degrés dans l'environnement des sources (à quelques dizaines de mètres). D'autres anomalies importantes correspondent au passage au dessus de failles.

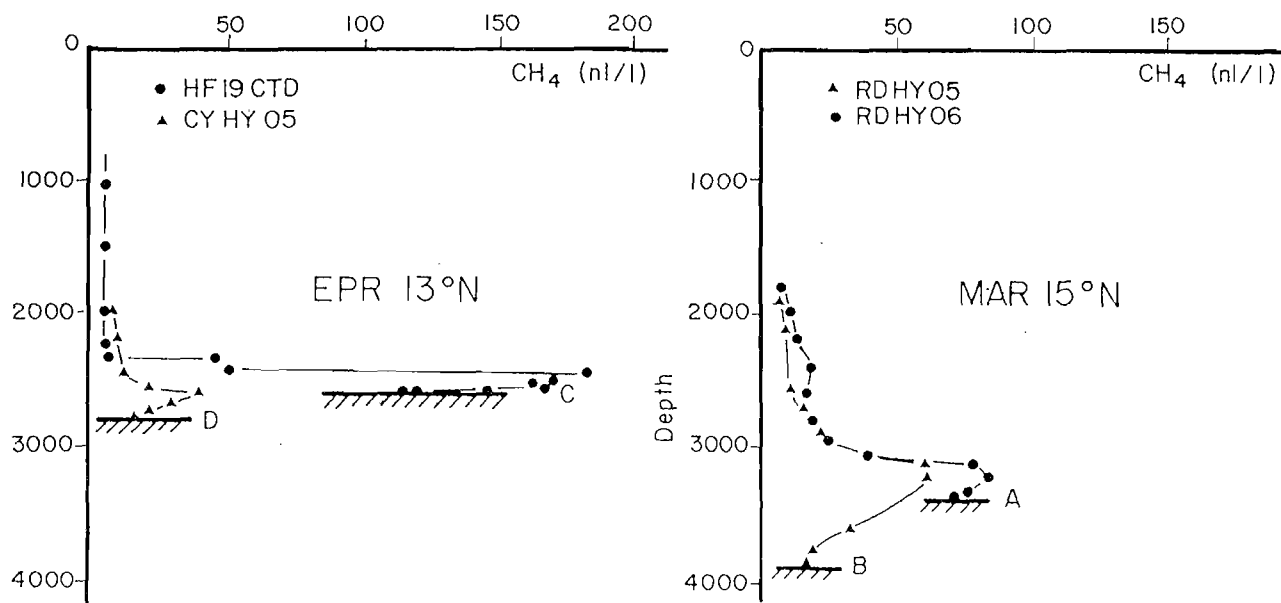


Figure 3. Anomalies chimiques créées dans l'eau de mer par les apports hydrothermaux : Profils verticaux de méthane au droit de l'EPR et de la MAR.

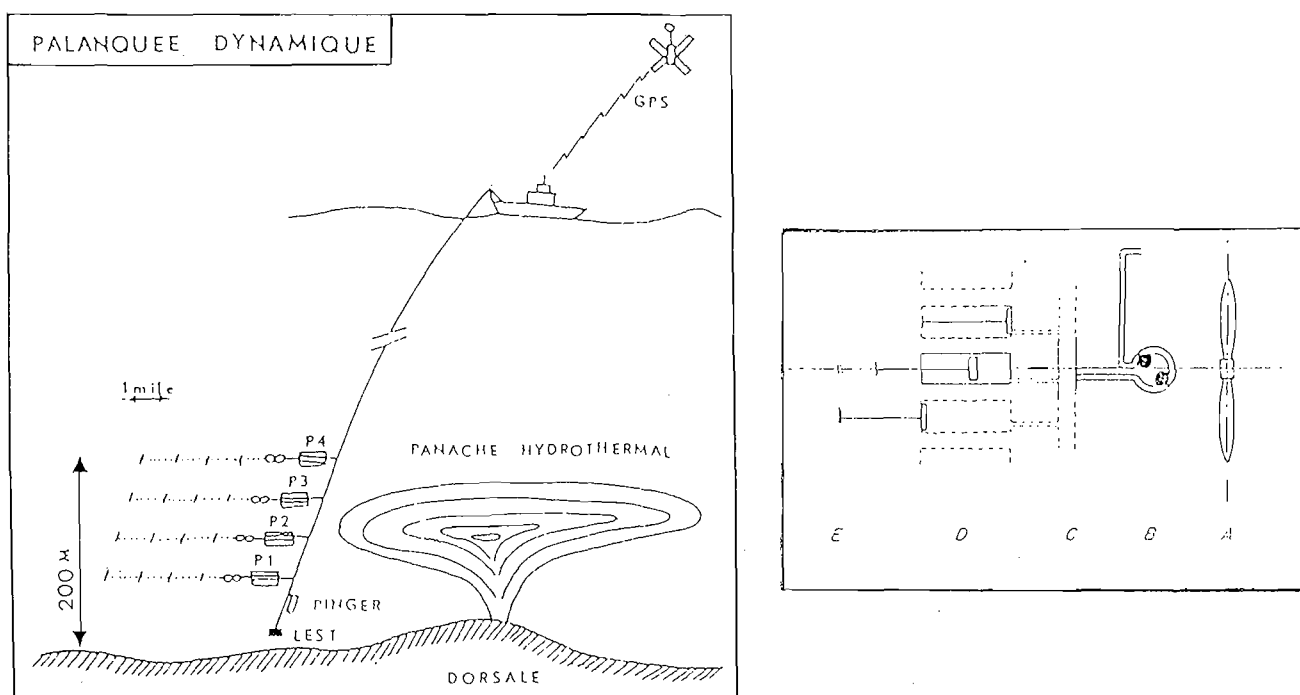


Figure 4. Palanquées dynamiques : quatre systèmes, à des profondeurs différentes au dessus du fond, sont tractés à faible vitesse. Chaque système, à droite, est constitué d'un ensemble comprenant : A une hélice, B une pompe péristaltique, C un plateau de distribution pour remplir les bouteilles l'une après l'autre, D les bouteilles constituées d'un cylindre et d'un piston (E).

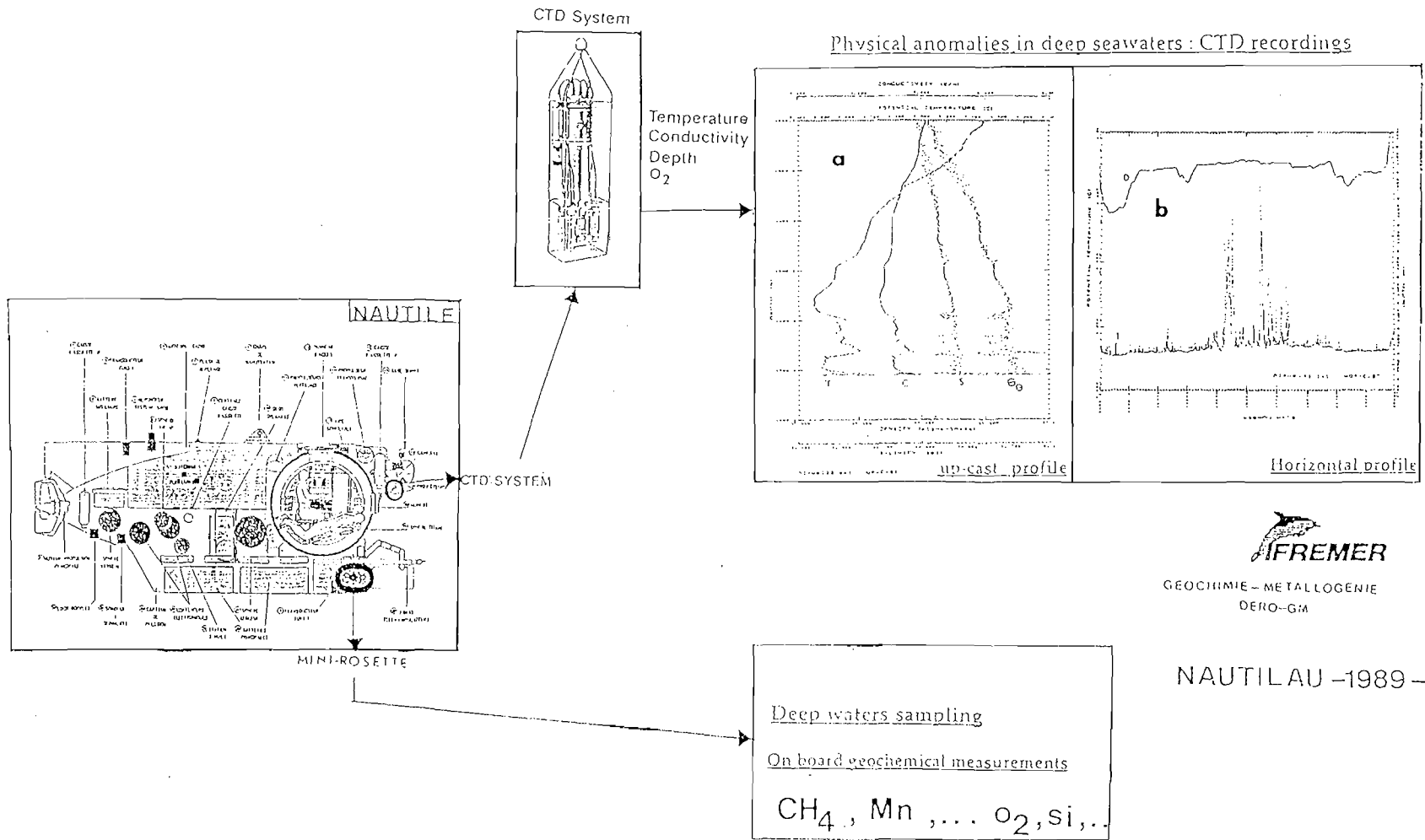


Figure 6. Système bathysonde-minirosette mis en place sur le Nautilus. Ce système permet de rendre le sous-marin moins "aveugle" vis à vis des manifestations hydrothermales : mesures de température disponibles à l'intérieur du submersible en cours de plongée, paramètres chimiques en temps légèrement différé. En a), profils verticaux, en b) anomalies enregistrées au voisinage du fond en cours de plongée.

East Pacific Rise 13°N

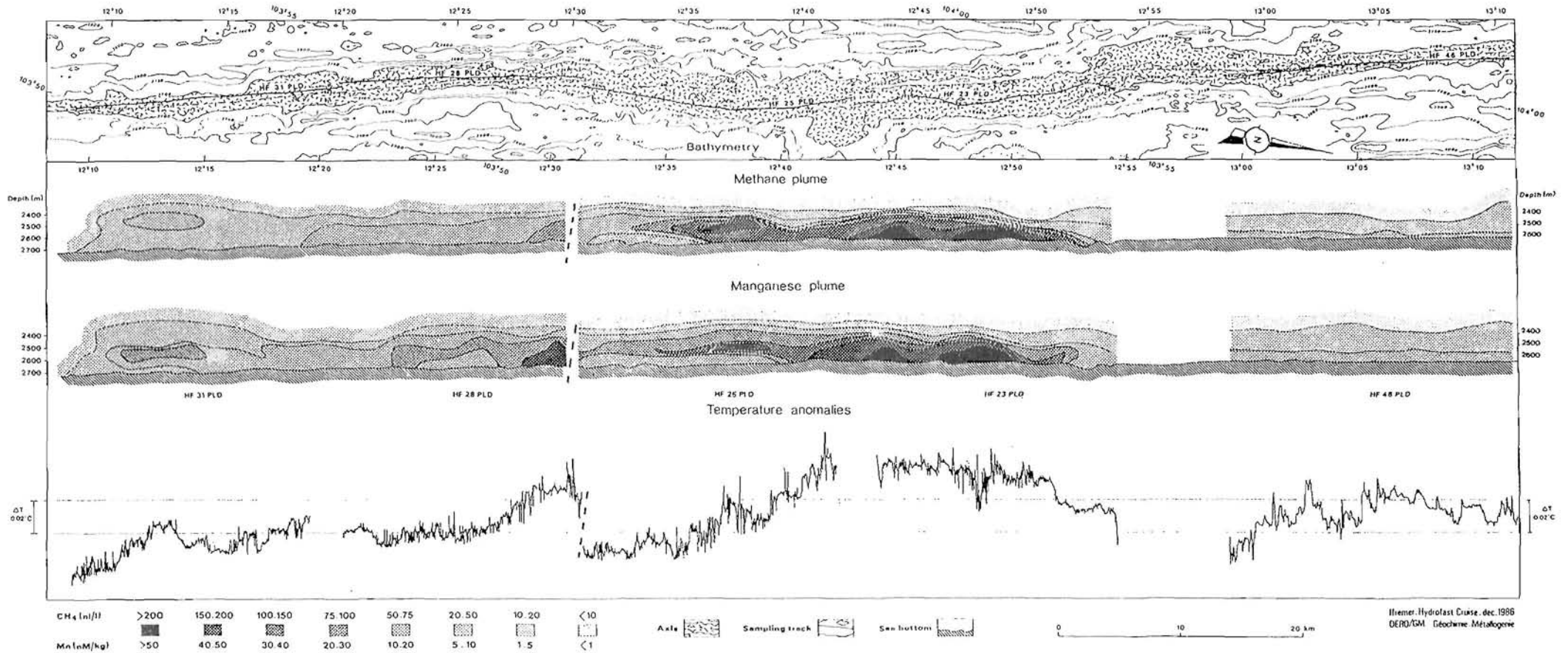


Figure 5. Variation d'activité hydrothermale sur une centaine de kilomètres le long de l'EPR. De haut en bas : l'axe de la dorsale EPR, le panache de méthane, le panache de manganèse et un profil d'anomalie thermique enregistré 50 mètres au dessus du fond. L'activité hydrothermale est partout détectable, mais n'est pas répartie d'une manière aléatoire. La zone la plus active est située entre deux petites discontinuités "Overlapping Spreading Center".

Instrumentation nouvelle nécessaire, le ROV...

Les sites hydrothermaux étant identifiés, une instrumentation spécifique à l'étude de l'hydrothermalisme a été mise en oeuvre. Les premiers outils réalisés furent les bouteilles en graphite et en titane destinées aux prélèvements des fluides hydrothermaux : ces fluides, dont les températures dépassent 300°C, sont acides et chargés d'hydrogène sulfuré. Ces prélèvements, déjà difficiles du fait de la température et des propriétés chimiques des fluides, se trouvent encore compliqués par les variations de volume du fluide : à 300 bars, le fluide voit son volume diminuer d'un tiers en passant de 300°C à 2°C.

En restant au niveau de la stratégie d'exploration, des méthodologies et des équipements adaptés aux différentes échelles de travail, on remarquera qu'il existe une lacune d'information entre l'identification d'une zone hydrothermalement active (échelle : la dizaine de kilomètres) et la recherche de sites actifs à l'aide d'un submersible (échelle : la dizaine de mètres). Cette observation est d'autant plus importante que les contraintes économiques et logistiques liées à l'utilisation d'un submersible sont prises en compte.

Trouver un site hydrothermal ou un amas sulfuré (typiquement de 200 ou 300 mètres de large sur 1 km de long) sur un espace de 10 km de large par 10 à 20 km de long demeure un exercice difficile. Avant l'utilisation du submersible, la connaissance de cet espace doit être "dégrossie" à l'aide d'une instrumentation appropriée : typiquement, il s'agit du domaine d'utilisation des ROV (Remote Operated Vehicle). Le ROV nécessaire pour combler la lacune d'information entre l'échelle du site et celle de la dizaine de kilomètres doit avoir les fonctions suivantes :

- a) observation optique temps réel,
- b) capteurs température - néphélométrie temps réel (bathysonde - néphélomètre),
- c) échantillonnage d'eau sur ordre, fonction des informations a) et b),
- d) échantillonnage ponctuel des solides (roche, amas sulfuré ...)

Les fonctions de ce ROV sont schématisées sur la figure 7. La nécessité de cet équipement peut être résumée par l'incohérence actuelle suivante : "En 1991, "l'Atalante" navigue à 10 m près, mais n'échantillonne le plancher océanique qu'à km près" ...

Perspectives

L'hydrothermalisme océanique est l'un des processus fondamentaux qui prennent place aux interfaces entre les différentes enveloppes de la terre, en l'occurrence l'interface Océan / Lithosphère. Les échanges impliqués entre l'océan et la lithosphère sont comparables en importance aux échanges entre l'océan et l'atmosphère. Ce phénomène est responsable de la formation des gisements sulfurés (Cu, Zn, Pb ... Au ...).

En 1991, un peu plus d'une dizaine d'années après les découvertes spectaculaires des sources hydrothermales sur la dorsale Est-Pacifique, nous n'en sommes encore qu'à l'identification des différentes formes d'hydrothermalisme associées à différents contextes géodynamiques :

- cheminées hydrothermales sur la dorsale Est-Pacifique ;
- hydrothermalisme associé à une dorsale couverte de sédiments (bassin de Guyamas, ride du Juan de Fuca ...)
- circulation hydrothermale directement associée à des diapirs du manteau affleurant à l'axe des dorsales lentes (production de CH₄, H₂ ...)
- propriétés particulières des dépôts hydrothermaux en bassin arrière arc ... (dépôts de BaSO₄, ...).

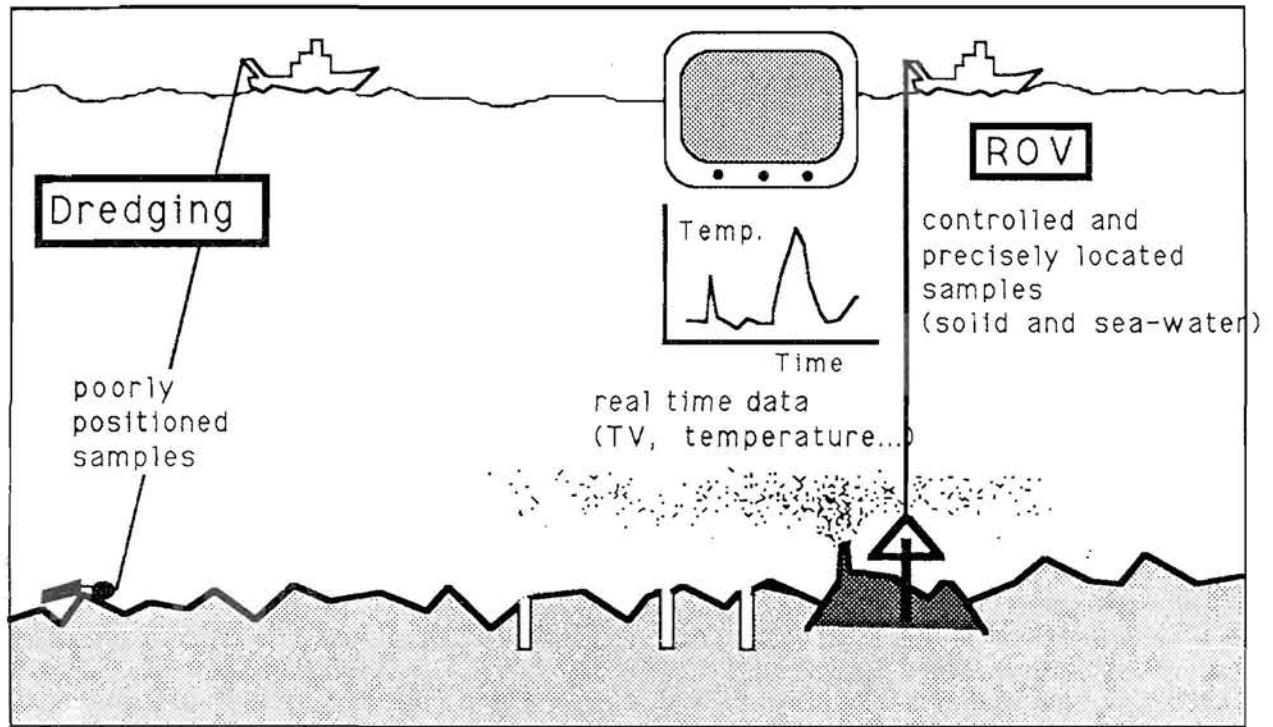


Figure 7. Schéma d'un ROV devant permettre de documenter une zone (quelques kilomètres) avant l'utilisation du submersible. Le dragage, à gauche, ne permet d'obtenir qu'un échantillonnage aléatoire sur un kilomètre environ. Un ROV, à droite, devrait permettre d'obtenir des informations à bord TV, température, et de choisir, en fonction de ces informations, des lieux d'échantillonnage d'eau de mer et de solides (roches, sulfures...).

Le sujet hydrothermalisme sous-marin traite d'une manière non dissociable les aspects de connaissances fondamentales et les aspects finalisés, notamment ceux qui concernent la compréhension de la formation des gisements. Les actions sur ce sujet sont également sous-tendues, à terme, par l'identification de ressources minérales spécifiquement marines. Pour des raisons de stabilité dans l'eau de mer en fonction du temps, certains types de minéralisations peuvent n'avoir aucun équivalent à terre.

Tous ces éléments conduisent à augmenter notre potentiel de recherche sur ce sujet, notamment et spécifiquement en matière d'intervention sous-marine. Améliorations et innovations dans des technologies où nous avons déjà un savoir-faire sont, certes, encouragées. En France un effort tout particulier doit être consacré pour les ROV (Remote Operated Vehicle), non limités à la simple observation. Ces outils couvrent une échelle de travail -absolument nécessaire- de l'exploration des différentes formes d'hydrothermalisme sous-marin.