

Les ressources minérales marines État des connaissances sur l'importance des dépôts

Par Yves FOUQUET*

Depuis quelques années, du fait d'une forte demande émanant des pays émergents, des tensions sont apparues dans l'approvisionnement en métaux de base ou en métaux rares. En un siècle, la consommation mondiale des quinze principaux métaux a été multipliée par 20 en tonnage, alors que la population mondiale n'était multipliée que par 3,6. Les cours de ces métaux se sont envolés. Quatre axes sont discutés pour répondre à cette demande croissante : le recyclage, l'optimisation des technologies, la substitution et, enfin, l'exploration de nouvelles ressources primaires, y compris en mer. Trois types de ressources métalliques potentielles sont connus dans les grands fonds marins : les sulfures hydrothermaux, les encroûtements cobaltifères et les nodules polymétalliques. Outre des métaux de base (comme le cuivre, le zinc, le plomb, le nickel ou le cobalt) et des métaux précieux (or et argent), ces minéralisations peuvent contenir des métaux dits rares (tels que platine, tellure, molybdène, zirconium, yttrium, indium, germanium, gallium et terres rares) devenus importants en raison de leur utilisation dans les technologies avancées et les énergies « vertes ».

Quelles est l'importance des minéralisations océaniques par rapport aux réserves connues sur les cinq continents ?

Introduction

L'alignement de la consommation des pays émergents sur le standard européen nécessitera l'augmentation de la production de cuivre et de zinc de 65 à 70 % au cours des prochaines années. Il faut donc relancer l'exploration, non seulement sur les continents, mais aussi dans les océans (qui couvrent 71 % de la surface terrestre et dont 60 % atteignent des profondeurs dépassant les 2 000 mètres). Les explorations scientifiques menées dans les grands fonds depuis une trentaine d'années ont permis d'identifier plusieurs processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration de métaux sous la forme de nodules polymétalliques, d'encroûtements cobaltifères et de dépôts de sulfures hydrothermaux.

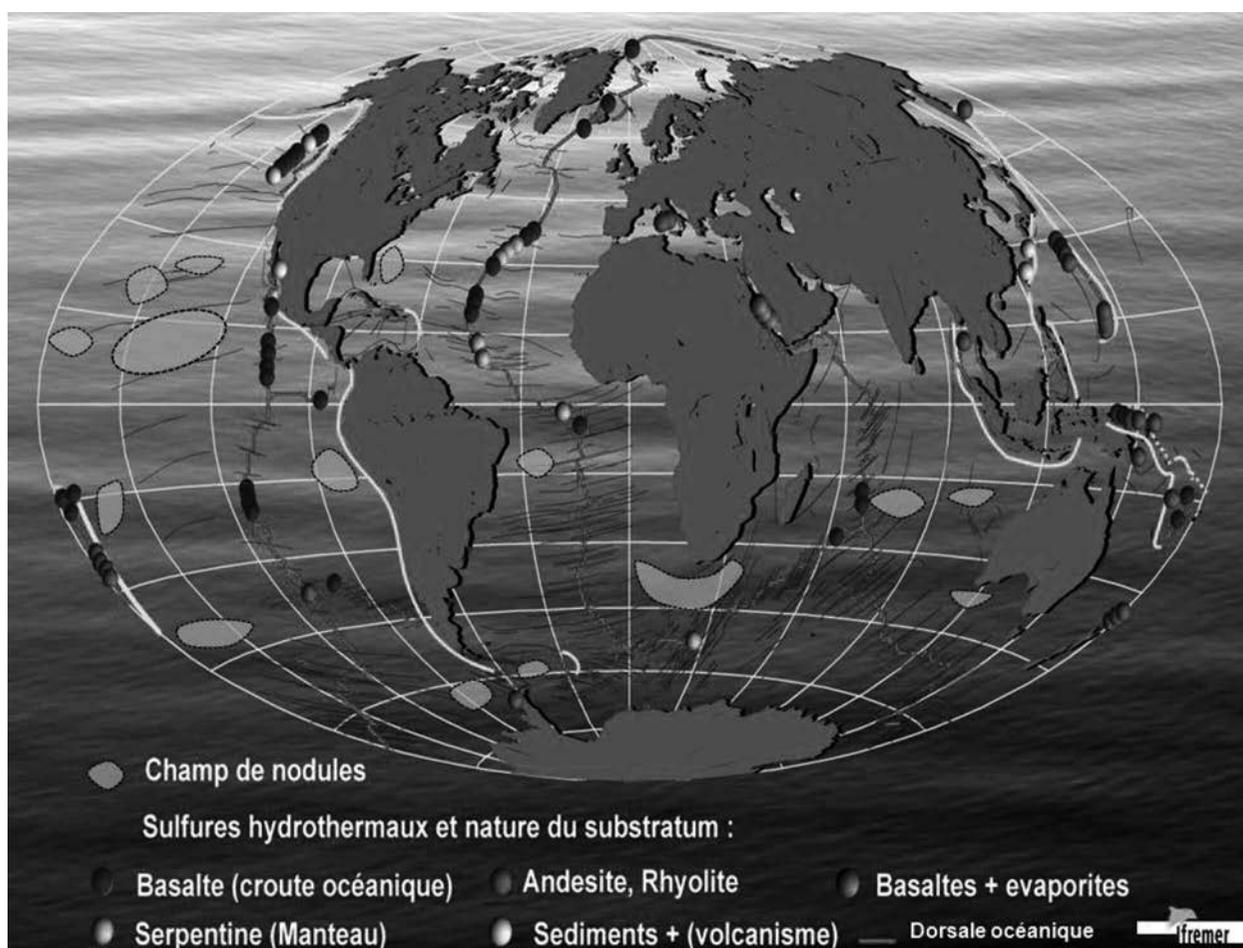
Ces découvertes ouvrent de nouvelles frontières pour la recherche et l'identification de nouvelles ressources minérales. Il faut noter que sulfures hydrothermaux, nodules et encroûtements sont liés à des processus toujours actifs et spécifiquement sous-marins (ils n'ont pas d'équivalents en domaine aérien sur la croûte continentale). Les minéralisa-

tions hydrothermales sont constituées de dépôts massifs de minerais sur le plancher océanique ; leur exploitation ne nécessitera pas le creusement de galeries et ne générera donc pas de volumes importants de stériles miniers. Ces facteurs convergent pour minimiser les coûts (infrastructures facilement transportables par voie de mer), l'impact environnemental et la dépense énergétique nécessaire aux exploitations.

Enjeux géopolitiques

Les pays développés sont de plus en plus dépendants des apports extérieurs en métaux. Ces pays représentent 20 % de la population mondiale, mais consomment 80 % des ressources. Si ces dernières devaient être partagées équitablement, les pays développés recevraient moins du quart de leur consommation actuelle.

La Chine est, quant à elle, passée d'une consommation de 0,66 kg de zinc par an et par habitant en 1996, à une consommation de 1,07 kg en 2000, et de 3 kg en 2010.



© IFREMER

« Les explorations scientifiques menées dans les grands fonds depuis une trentaine d'années ont permis d'identifier plusieurs processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration de métaux sous la forme de nodules polymétalliques, d'encroûtements cobaltifères et de dépôts de sulfures hydrothermaux. », localisation des sites hydrothermaux et des champs de nodules à l'échelle mondiale.

Pour que l'ensemble de la population mondiale atteigne le niveau de vie moyen des pays développés, il faudrait disposer de l'équivalent de trois fois les ressources actuellement connues sur Terre. Les besoins de pays à fort taux de croissance, tels que la Chine ou l'Inde, ne pourront pas être satisfaits par leur seule production intérieure. L'accroissement de la demande réduit considérablement la durée actuellement estimée des réserves en métaux.

L'Europe dépend de plus en plus d'approvisionnements extérieurs pour ses métaux. Une telle situation présente des risques importants en cas de tension sur les marchés. Il devient donc nécessaire de fournir un important effort d'exploration afin d'identifier de nouvelles réserves. En raison de l'épuisement des ressources terrestres, des minerais de plus en plus pauvres sont exploités à des profondeurs de plus en plus grandes. Cependant, les limites de concentration des minerais ne peuvent être abaissées en dessous d'un certain seuil, en raison de l'augmentation des besoins éner-

gétiques nécessaires à leur extraction et d'un impact environnemental plus fort.

Dans les décennies à venir, notre approvisionnement en métaux passera donc par l'apport d'une composante durable (le recyclage) dans le cycle d'utilisation des métaux, ainsi que par la découverte de nouveaux gisements riches dans des sites potentiels encore peu explorés. Le vaste domaine océanique constitue à cet égard un atout qui ne doit pas être négligé. Dans ce contexte, l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) a élaboré des législations spécifiques pour l'exploration des sulfures et des nodules polymétalliques dans les eaux internationales. Plusieurs permis ont été délivrés au début des années 2000, pour les nodules, et depuis 2011, pour les sulfures.

Dans les ZEE nationales, plusieurs permis d'exploration et deux permis d'exploitations ont été délivrés portant sur des minéralisations profondes durant ces deux dernières années (voir la figure 1 de la page suivante).

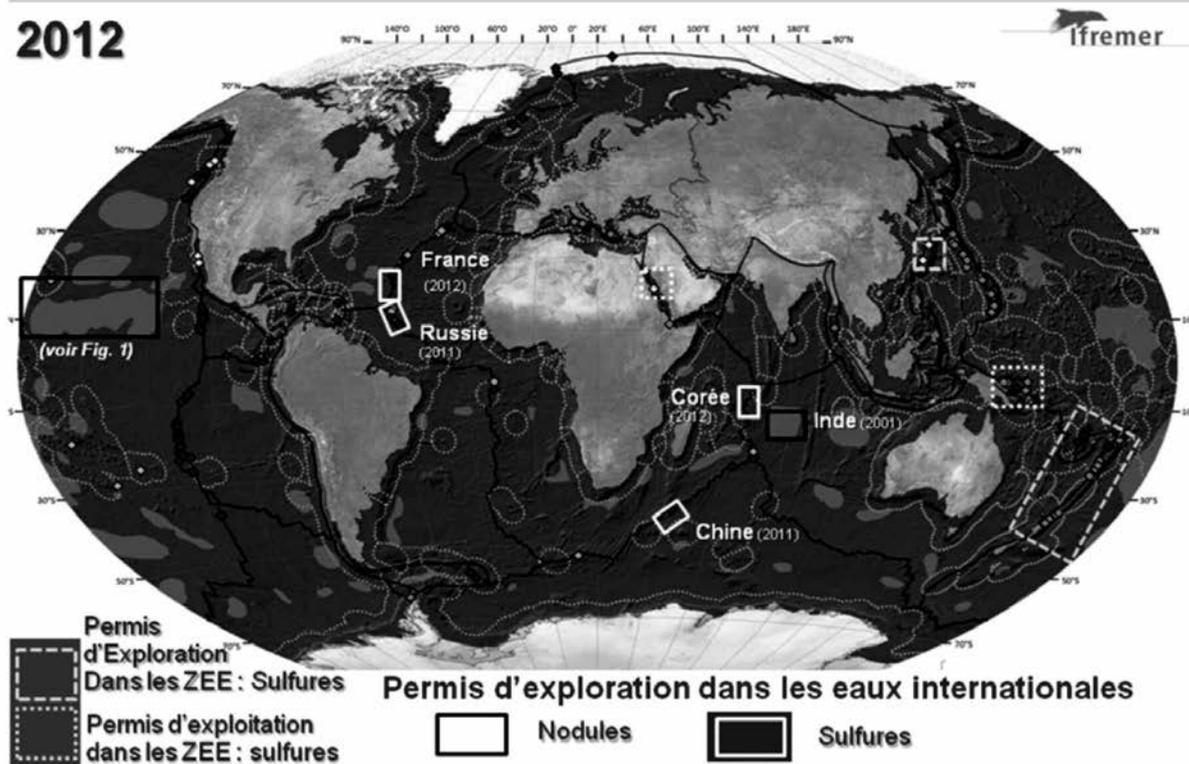


Figure 1 : Localisation des permis d'exploration et d'exploitation attribués dans les zones économiques exclusives (ZEE) et des permis d'exploration attribués par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) dans les eaux internationales. Les zones en gris clair, dans les océans, permettent de visualiser les principaux champs de nodules polymétalliques. Les losanges, sur les dorsales (traits noirs, au centre des océans), indiquent les principaux champs hydrothermaux connus.

Les différents types de minéralisation et leur importance relative

Les nodules polymétalliques

Les nodules polymétalliques se présentent sous la forme de boules sombres de 5 à 10 centimètres de diamètre contenant environ 40 % d'eau. Ils sont principalement composés d'hydroxydes de manganèse et de fer. Ils se forment à partir de complexes métalliques dissous dans l'eau de mer ou présents dans les sédiments.

On les trouve à des profondeurs supérieures à 4 000 mètres, dans des zones à faible taux de sédimentation. Leur intérêt minier qui a été souligné tient au fait que leur teneur en nickel est égale ou supérieure à celle des gisements de latérites, ou que leur teneur en cuivre est supérieure à celle des grands gisements de porphyres cuprifères (0,5 % de cuivre) exploités à terre, et que leur concentration en cobalt équivaut à celles des gisements terrestres. Dans les nodules polymétalliques du Pacifique, la concentration moyenne est de 0,42 % en cuivre, 0,63 % en nickel, 0,24 % en cobalt et 18,50 % en manganèse. Ces nodules contiennent également un certain nombre de métaux mineurs ou précieux, à de faibles teneurs (du cérium, du zirconium, du molybdène, du tellure, de l'yttrium, du thallium,

du tungstène, du lithium et des terres rares, notamment...). Ces éléments peu étudiés jusqu'à présent pourraient augmenter sensiblement la valeur des nodules jusque-là considérés pour le nickel, le cuivre et le cobalt.

La région d'exploration la plus intéressante actuellement connue est la zone Clarion-Clipperton, dans le Pacifique nord. Dans ce secteur, plusieurs permis d'exploration ont été accordés par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) (voir la figure 2 de la page suivante). À l'échelle mondiale, la zone de Clarion-Clipperton est la plus riche en métaux et en poids de nodules au mètre carré (de 8 à 10 kg m²). Les nodules y sont particulièrement concentrés en cuivre (0,82 %), en nickel (1,28 %) et en manganèse (25,40 %). Les estimations sur cette zone montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km² (soit 15 % des fonds du Pacifique), à des profondeurs allant de 4 000 à 5 000 mètres, le poids total des nodules est de 34 milliards de tonnes, soit 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt.

En ce qui concerne le cuivre, la consommation mondiale annuelle est d'environ 16 millions de tonnes. Les nodules de la zone Clipperton représentent ainsi une réserve couvrant environ 17 années de la consommation mondiale. Des estimations de l'*United States Geological Survey* (USGS) montrent que la ressource potentielle en cuivre contenu dans des nodules polymétalliques à l'échelle mondiale est d'environ

ron 700 millions de tonnes, ce qui est du même ordre de grandeur que les réserves prouvées dans les mines continentales (630 millions de tonnes). Notons qu'à terre, les ressources potentielles en cuivre sont estimées à 3 milliards de tonnes (Source : USGS).

Jusqu'à présent, les nodules de manganèse ont été considérés comme des réserves minérales potentielles. Les investigations menées dans les années 1970 et 1980 n'ont pas abouti à leur exploitation pour diverses raisons : une profondeur supérieure à 4 000 mètres de fond, une mauvaise estimation de la ressource, le coût élevé des traitements métallurgiques, des problèmes politiques liés au droit de la mer et, enfin, l'effondrement du cours des métaux.

L'évaluation de leur potentiel impliquerait maintenant d'inventorier les zones les plus riches en nodules grâce aux outils modernes de cartographie et d'imagerie à haute résolution, et de mieux comprendre les processus de formation des nodules présentant les plus fortes concentrations.

Des travaux sont réalisés pour analyser les métaux rares qui ne l'avaient pas été systématiquement durant les années 1970 et les années 1980. En 2001, la France a obtenu, pour une période de 15 ans, un permis minier dans les eaux internationales du Pacifique nord, dans la zone Clarion-Clipperton. Du fait de l'important effort d'exploration mené par la France dans les années 1970, cette zone est l'une des plus intéressantes au monde en termes de concentration en métaux et de densité des nodules présents

sur le fond marin. À ce jour, 13 permis d'exploration ont été accordés par l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). Quatre de ces permis ont été délivrés depuis 2011 dans la zone Clarion-Clipperton. Certains de ces permis sont directement soutenus par des industriels (voir la figure 2 ci-dessous).

Les encroûtements (notamment cobaltifères)

Des encroûtements d'oxydes ferro-manganésifères sont répertoriés dans tous les océans, dans des environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation empêche le dépôt de sédiments depuis plusieurs dizaines de millions d'années. Ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Les encroûtements atteignent de quelques centimètres à vingt-cinq centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Ils se déposent généralement sur des substrats durs (volcans sous-marins, anciens atolls immergés) à des profondeurs variant entre 400 et 4 000 mètres.

Leur croissance est très lente (de 1 à 6 millimètres par millions d'années) : ainsi, les croûtes les plus épaisses peuvent être âgées de plus de 60 millions d'années. Les plus fortes concentrations en métaux se forment aux profondeurs les plus appauvries en oxygène.

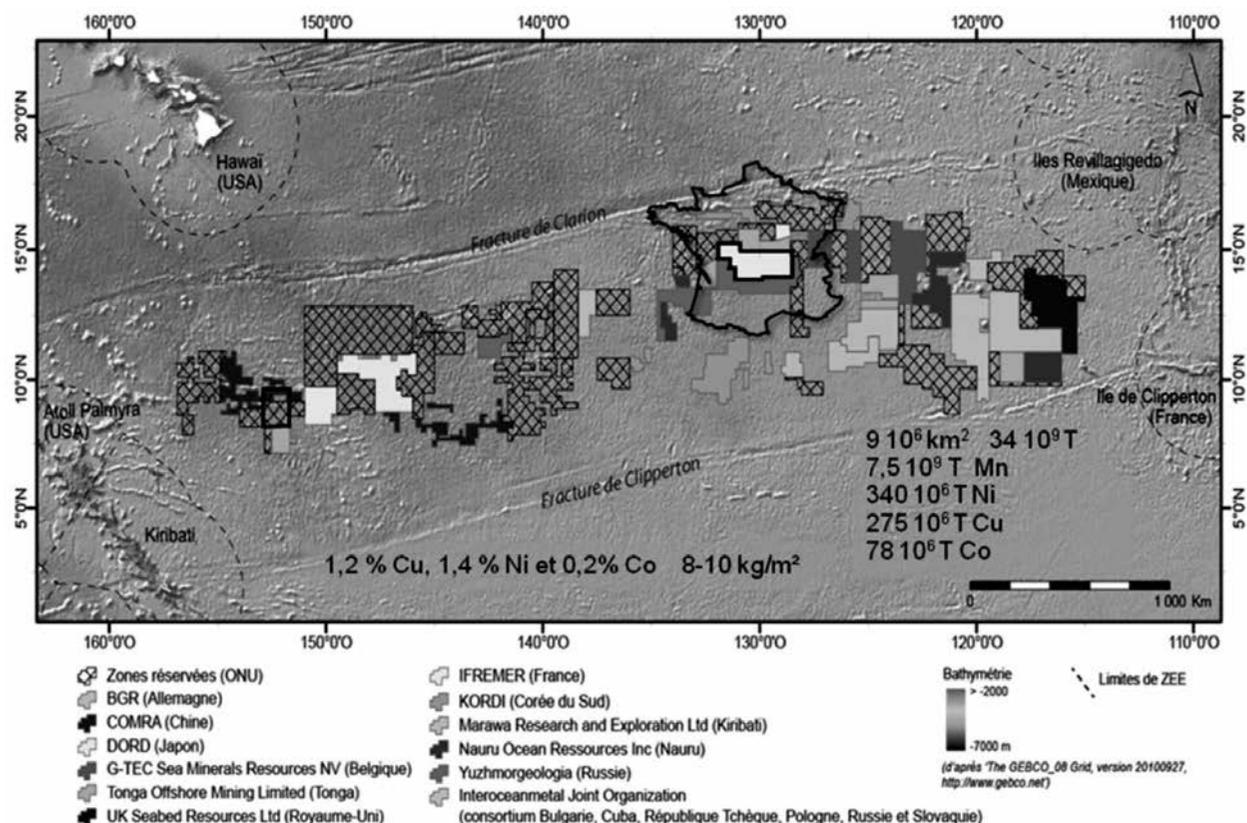


Figure 2 : Position des permis accordés par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) dans la zone à nodules de Clarion-Clipperton. Les deux zones des permis accordées à la France sont en blanc et entourées d'un trait noir. La carte de France superposée est à l'échelle, ce qui permet de mieux visualiser la dimension des zones bénéficiant de permis.

Les processus de précipitation qui leur ont donné naissance sont probablement influencés et renforcés par l'activité bactérienne.

Les estimations montrent que 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des fonds des océans, sont recouverts d'encroûtements de manganèse. Les premières investigations systématiques ont démarré en 1981 dans l'océan Pacifique central. De nombreux pays se sont intéressés depuis vingt ans à cette ressource potentielle : Japon, États-Unis, Russie, Allemagne, France, Corée, Royaume-Uni, Chine. Un très faible nombre de volcans immergés (estimés à 50 000) ont été étudiés dans l'océan Pacifique. Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont riches en cobalt et en platine. Ils sont tous situés dans l'océan Pacifique. Les échantillons les plus riches se situent sur les bords externes des plateaux sous-marins (notamment dans l'archipel des Tuamotu) et sur d'anciens volcans sous-marins, à des profondeurs comprises entre 800 et 2 500 mètres. En octobre 2012, l'AIFM a validé le texte juridique encadrant les permis d'exploration pour les encroûtements situés dans les eaux internationales. La Chine, le Japon et la Russie ont déposé des demandes qui seront examinées en juillet 2013.

Comme les nodules, les encroûtements sont essentiellement constitués d'oxydes de fer et de manganèse. Ils sont, cependant, en moyenne trois fois plus riches en cobalt

(0,7 % en moyenne), et souvent fortement concentrés en platine.

Leur valeur « métal contenu » est deux à trois fois supérieure à celle des latérites exploitées à terre. Les encroûtements marins sont parmi les minéralisations en cobalt les plus riches connues sur Terre. Leurs concentrations en cobalt sont bien plus élevées que celles des minerais exploités à terre, dont la teneur n'excède pas 0,1 à 0,4 %.

Les encroûtements marins pourraient constituer un véritable minerai de cobalt et non un sous-produit d'autres exploitations, comme c'est le cas aujourd'hui.

Le platine et les métaux rares, présents à des concentrations importantes dans certains sites, pourraient également conduire à une valeur ajoutée non négligeable. Comme pour les nodules, plusieurs métaux mineurs sont présents dans les encroûtements. En plus du cobalt, les croûtes d'oxyde de manganèse peuvent être une source potentielle de nombreux autres éléments métalliques, tels que le titane, le tellure, le tungstène, le niobium, le bismuth, l'yttrium, le nickel, le platine, le phosphore, le thallium, le zirconium, le molybdène et les terres rares. Les concentrations en terres rares, comprises entre 0,15 et 0,25 %, sont sensiblement plus faibles que dans les mines terrestres (> 5 %), mais les tonnages peuvent être comparables.

Cette observation justifie de progresser dans la connaissance des paramètres géologiques et chimiques qui condi-



© IFREMER-Campagne Nixonaut

« Les encroûtements marins sont parmi les minéralisations en cobalt les plus riches connues sur Terre. Leurs concentrations en cobalt sont bien plus élevées que celles des minerais exploités à terre, dont la teneur n'excède pas 0,1 à 0,4 % », découverte d'encroûtements cobaltifères lors de la campagne Nixonaut réalisée en 1987 dans le Pacifique Sud.

tionnent la formation des accumulations les plus riches. Au plan scientifique, des efforts demeurent nécessaires pour mieux comprendre les règles de répartition, la variabilité des épaisseurs et de composition, et les divers processus impliqués dans la formation des encroûtements.

Du point de vue économique, beaucoup reste à faire pour évaluer les dépôts, localiser les zones les plus fortement concentrées en métaux et identifier des zones relativement planes et continues sur lesquelles un ramassage serait possible sans trop de dilution dans du substrat stérile. Les concentrations les plus élevées (maximum de 1,9 % pour le cobalt et de 4,5 g/t de platine) sont situées en Polynésie. Dans la zone des Tuamotu, les croûtes forment un tapis plat et continu sur des formations sédimentaires indurées. Dans cette zone, on estime qu'une surface de 100 km² de fond marin contient environ 10 millions de tonnes de croûtes polymétalliques, ce qui représente plus de 100 000 tonnes de cobalt et 10 tonnes de platine (pour des concentrations de 1 % en Cobalt (Co) et de 1 g/t en platine (Pt)).

Les images sonar réalisées en Polynésie ont permis de déterminer que les substrats durs favorables à la formation des encroûtements représentent environ 50 000 km². Il y aurait donc en Polynésie, environ 50 millions de tonnes de

cobalt et 5 000 tonnes de platine, ce qui représente, au taux de consommation mondiale actuel (88 000 t/an pour le cobalt et 230 t/an pour le platine), près de 600 ans de ressources pour le cobalt et près de 22 ans pour le platine. Il convient cependant de nuancer ces chiffres, car beaucoup de zones, telles que les pentes des volcans, présentent des rugosités trop élevées pour un ramassage efficace. Comme pour les nodules, une réelle évaluation du potentiel des encroûtements métallifères implique de réaliser des cartographies en haute résolution près du fond marin afin de déterminer la continuité des minéralisations et de rechercher des zones relativement plates, qui seraient seules favorables à un ramassage. Ces opérations mettant en œuvre des submersibles devraient également permettre de sélectionner et de comprendre la formation des zones les plus riches.

Les sulfures polymétalliques hydrothermaux

Les sulfures polymétalliques hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique, sous l'effet de gradients thermiques importants. On les trouve sur toutes les structures sous-marines



© IFREMER-Victor/Campagne SERPENTINE

« Les sulfures polymétalliques hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique, sous l'effet de gradients thermiques importants. On les trouve sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique, en particulier le long des 60 000 kilomètres de dorsales sous-marines. », sulfures d'un site hydrothermal inactif (se situant à 3 700 mètres de profondeur) observé lors de la campagne océanographique Serpentine menée par l'IFREMER sur la dorsale médio-atlantique.

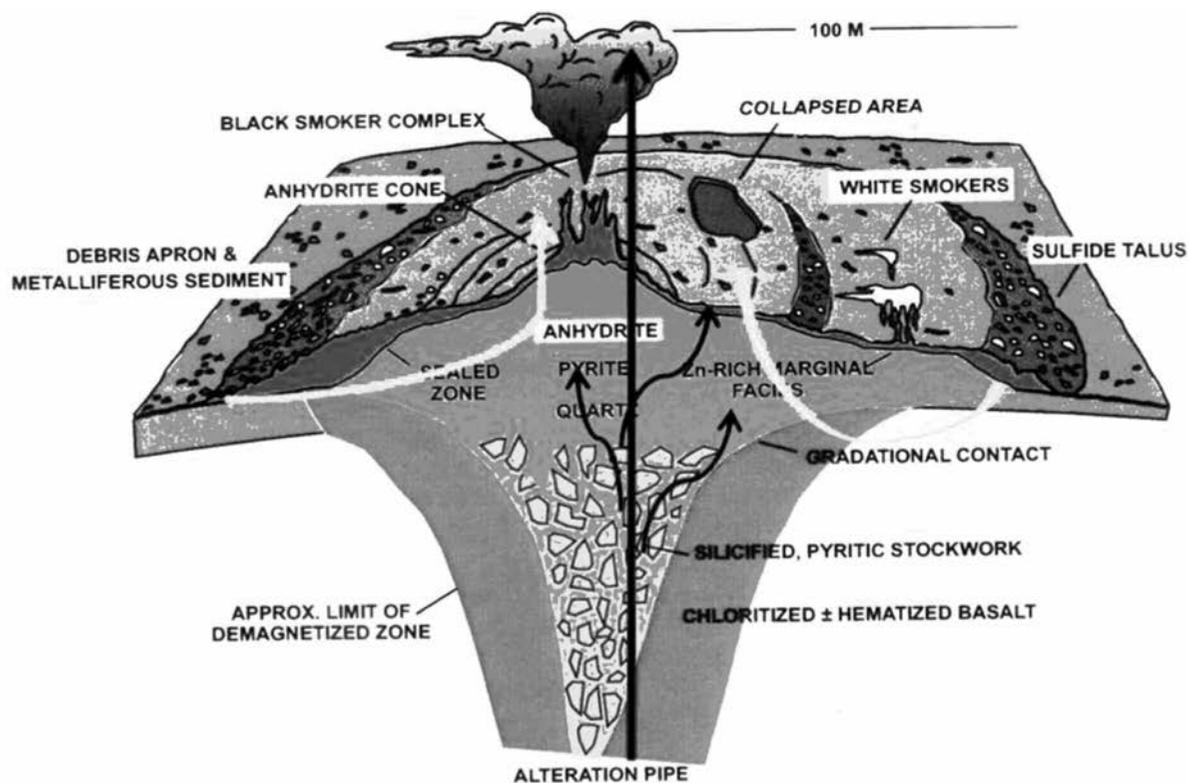


Figure 3 : Exemple d'amas sulfuré hydrothermal sur une dorsale lente (site TAG, à 23°N sur la dorsale atlantique). Noter la dimension réduite du dépôt par rapport à celle des champs de nodules.

d'origine volcanique, en particulier le long des 60 000 kilomètres de dorsales sous-marines. L'activité hydrothermale est un important mécanisme d'extraction, de transport et de concentration des métaux, qui s'accumulent sous la forme d'amas massifs de sulfures métalliques (voir la figure 3 ci-dessus).

Selon le contexte et la nature du substratum impliqué, les minéralisations hydrothermales peuvent être fortement concentrées en cuivre, en zinc, en or, en argent, en cobalt, en plomb et en baryum, mais aussi en éléments plus rares, tels que le cadmium, l'indium, le sélénium, le gallium, le germanium, l'antimoine et le mercure.

De manière générale, par rapport aux nodules et aux encroûtements de manganèse, il s'agit de minerais potentiellement riches en métaux, puisque leur teneur totale en cuivre + zinc est fréquemment supérieure à 10 %.

En raison de la salinité de l'eau de mer et de l'élévation de la température d'ébullition de l'eau, proportionnellement à la profondeur, les fluides circulant dans la croûte océanique ont une grande capacité à transporter les métaux. Ce type de minerai est bien connu dans les gisements fossiles exploités à terre et formés sous la mer au cours des temps géologiques. Une partie importante du cuivre, du zinc, de l'argent et de l'or exploités sur les continents sont produits à partir de ce type de gisement.

Après trente-cinq années d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux (voir la figure 1 de la page 51) démontre l'importance des

processus hydrothermaux associés au volcanisme sous-marin. Des minéralisations sulfurées sont maintenant connues à des profondeurs comprises entre 800 et 5 000 mètres et des champs hydrothermaux ont été localisés dans les principaux contextes géodynamiques (dorsales lentes et rapides, bassins arrière-arc, arcs insulaires) et sur des substratums variés (basaltes, andésites, dacites, sédiments, roches ultrabasiques du manteau).

Les premières minéralisations découvertes à la fin des années 1970 représentaient seulement quelques dizaines de milliers de tonnes de sulfures polymétalliques. On connaît maintenant une vingtaine de champs hydrothermaux dont les dimensions et les concentrations en métaux sont similaires à celles de mines exploitées à terre, c'est-à-dire de quelques millions à plusieurs dizaines de millions de tonnes.

Le dépôt le plus important se situe dans la fosse Atlantis, sur l'axe central de la Mer Rouge, où des sédiments métallifères totalisent (en poids sec) environ 100 millions de tonnes.

Les techniques d'exploration depuis la surface permettent essentiellement de localiser les sites actifs. Cependant, des explorations systématiques effectuées sur certaines portions de la dorsale atlantique ont montré l'existence de nombreux sites inactifs anciens, de dimensions souvent plus importantes que celles des sites actifs. Ces dépôts constituent une ressource minérale potentielle qui a commencé, depuis quelques années, à intéresser l'industrie pour les sites situés dans les eaux économiques des États. Plusieurs

compagnies minières ont déposé des permis pour évaluer et exploiter des amas sulfurés hydrothermaux dans le sud-ouest du Pacifique et en Mer Rouge (voir la figure 1 de la page 51).

Malgré des connaissances encore parcellaires, plusieurs auteurs ont tenté d'estimer les quantités de métaux accumulés dans les minéralisations hydrothermales. Ces approches sont souvent biaisées du fait que les techniques d'exploration efficaces ne permettent de localiser que les sites actifs. La zone la mieux connue et la mieux explorée actuellement, à la fois pour les sites actifs et les sites inactifs, est celle étudiée par la Russie depuis plus d'une dizaine d'années (et aussi dans le cadre d'une coopération entre la France et la Russie), entre 13°N et 21°N sur la dorsale Atlantique. Une exploration systématique de cette portion de dorsale lente sur environ 1 000 kilomètres de long et 20 kilomètres de large a permis de localiser sept champs hydrothermaux majeurs dont quatre dépôts inactifs. L'ensemble de ces minéralisations totalise plus de 75 millions de tonnes de sulfures. En considérant qu'environ 40 000 kilomètres des 60 000 kilomètres de dorsales sont des dorsales lentes, on peut estimer que la portion de ces dernières ayant moins d'un million d'années (20 kilomètres de large pour un taux d'ouverture de 2 cm/an) contient 40 X 75 millions de tonnes, soit environ 3 000 millions de tonnes de minéralisations sulfurées. Les amas sulfurés fossiles actuellement situés sur les continents et formés en milieu sous-marin au cours des temps géologiques représentent actuellement environ 850 millions de tonnes de sulfures. Avec une teneur de 5 % en cuivre, les minéralisations des océans actuels représentent donc environ 150 millions de tonnes de cuivre, ce qui correspond à une dizaine d'années de consommation mondiale (15,8 millions de tonnes/an). Les réserves mondiales en cuivre sur les continents sont estimées à 630 millions de tonnes, soit à une quarantaine d'années de réserves au rythme de consommation actuel. Notons, enfin, qu'au-delà de la largeur des 20 kilomètres considérée dans nos estimations, des dépôts de sulfures hydrothermaux enfouis sous une couverture de sédiments existent sur l'ensemble de la largeur de l'océan. En l'état actuel des technologies, ces dépôts sont difficilement détectables.

En raison de leur richesse en métaux, de leur emprise minimale (quelques hectares) sur le fond, de leur caractère

massif ne générant pas de stériles et de la profondeur plus faible que celle des nodules, l'exploitation des sulfures constituera sans doute, avant les encroûtements cobaltifères et les nodules, la première exploitation minière dans les grands fonds océaniques.

Un cas particulier : les terres rares présentes dans les sédiments marins

L'annonce de la découverte par des chercheurs japonais de stocks importants de terres rares dans des sédiments marins du Pacifique a fait l'objet de très nombreux articles dans la presse mondiale, en 2011. Les concentrations annoncées (de l'ordre 0,1 à 0,2 % de terres rares) sont nettement inférieures à celles des minerais exploités à terre (de l'ordre de 5 %) et sont similaires à celles des encroûtements cobaltifères dans lesquels les terres rares sont associées à d'autres éléments valorisables, tels que le cobalt et le platine. Dans les sédiments marins, la concentration maximale en terres rares lourdes, tel que le dysprosium (72 g/t), est plus faible que celle des gisements terrestres (par exemple, à Mount Weld, en Australie, avec 500 g/t) et est comparable à celle des encroûtements (58 g/t). Le dysprosium est l'une des terres rares indispensables à la fabrication d'aimants permanents, et dont l'offre pourrait être insuffisante à très court terme. La connaissance du potentiel réel en terres rares des sédiments de Polynésie implique de réaliser un maillage d'échantillonnage resserré afin de déterminer la continuité latérale et les variations des concentrations en terres rares. La conclusion de l'équipe japonaise qui indique qu'un kilomètre carré de ces boues fournirait un cinquième de la consommation mondiale de terres rares (1 377 tonnes en 2009), paraît prématurée. Il est probable que les zones les plus riches n'ont pas encore été découvertes, ce qui implique de reprendre les collections existantes de nodules, d'encroûtements et de carottes de sédiments sous-marins pour y rechercher les fortes concentrations de terres rares lourdes et de mener des campagnes spécifiques pour définir l'extension des zones riches.

Note

* Unité de Recherche Géosciences Marines, Laboratoire de Géochimie et Métallogénie de l'IFREMER (Brest).