

Minéralisations hydrothermales : les enjeux scientifiques de leur exploration

Par Yves FOUQUET

Ifremer

Les sulfures océaniques offrent un potentiel économique qui intéresse les industriels. Cependant, l'estimation de la nature des dépôts et de l'importance des ressources est peu précise. Les techniques d'exploration conventionnelles permettent de localiser les sites actifs, alors que l'industrie s'intéresse aux sites inactifs. Jusqu'à présent, la connaissance des minéralisations est basée essentiellement sur les explorations scientifiques. De nouveaux enjeux se présentent entre les recherches fondamentales, l'intérêt de l'industrie et la définition de stratégies de préservation des environnements. Les actions d'exploration sont indissociables des progrès technologiques, qui permettent, à différentes échelles, d'explorer et d'évaluer les ressources. De nombreux défis scientifiques sont encore à relever pour comprendre les processus de transfert et de dispersion des métaux dans l'océan et déterminer les conditions d'une exploitation durable de ces ressources.

Pprès de 200 champs hydrothermaux (parmi lesquels seulement quelques dizaines sont inactifs) ont été répertoriés dans l'océan. Les connaissances acquises à leur sujet sont indispensables pour optimiser les stratégies d'exploration régionale (dans un rayon d'environ 1 000 kilomètres) visant à localiser des champs hydrothermaux (< 300 mètres de diamètre).

Au-delà des enjeux scientifiques liés à l'exploration, les stratégies de recherche à long terme visent à comprendre les échanges chimiques entre l'hydrosphère et la lithosphère océanique. Les travaux de recherche ont pour but de préciser le cycle des métaux depuis leur origine dans les roches jusqu'à leur transport par les fluides et leur dispersion dans l'océan par les panaches hydrothermaux, en passant par les études portant sur l'interface océan/lithosphère – là où se forment les minéralisations.

Ces approches chimiques et géologiques impliquent d'intégrer le compartiment biologique pour pouvoir comprendre les interactions géobiologiques et biogéochimiques, le fonctionnement des écosystèmes et leur connectivité.

Ainsi, plusieurs enjeux scientifiques se posent en matière de connaissance des fonctionnements géologiques et biologiques et de définition des stratégies d'exploration et de préservation.

Les sites actifs ne seront pas exploités afin de préserver leur biodiversité chimio-synthétique originale et en rai-

son des risques encourus par les outils d'extraction qui seraient rapidement corrodés par des fluides chauds et acides.

C'est donc sur les sites inactifs que l'impact d'une éventuelle exploitation devra être évalué. Nous nous centrons ici sur les enjeux scientifiques de l'exploration des minéralisations sulfurées, qui présentent le plus grand intérêt pour l'industrie. Les questions scientifiques qu'elle implique peuvent être déclinées en huit enjeux synthétisés dans les paragraphes qui suivent.

Enjeu n°1 : déterminer quelle est la quantité de métaux piégée par les sulfures dans les minéralisations hydrothermales ? (estimation du potentiel de ressources)

Il existe certainement beaucoup plus de sites inactifs que de sites actifs (FOUQUET, 2013 ; GERMAN *et al.*, 2016 ; HANNINGTON, 2011 ; JAMIESON *et al.*, 2014) ; en effet, les techniques d'exploration actuelles permettent essentiellement de localiser les sites actifs. Les sites d'intérêt potentiel se situent sur les dorsales lentes (gros dépôts) ou dans les bassins arrière-arc (dépôts riches en métaux). Des travaux détaillés ont montré, dans quelques zones, que les sites inactifs sont au moins dix fois plus abondants que les sites actifs. Il existe actuellement plusieurs ordres de grandeur entre les estimations des ressources

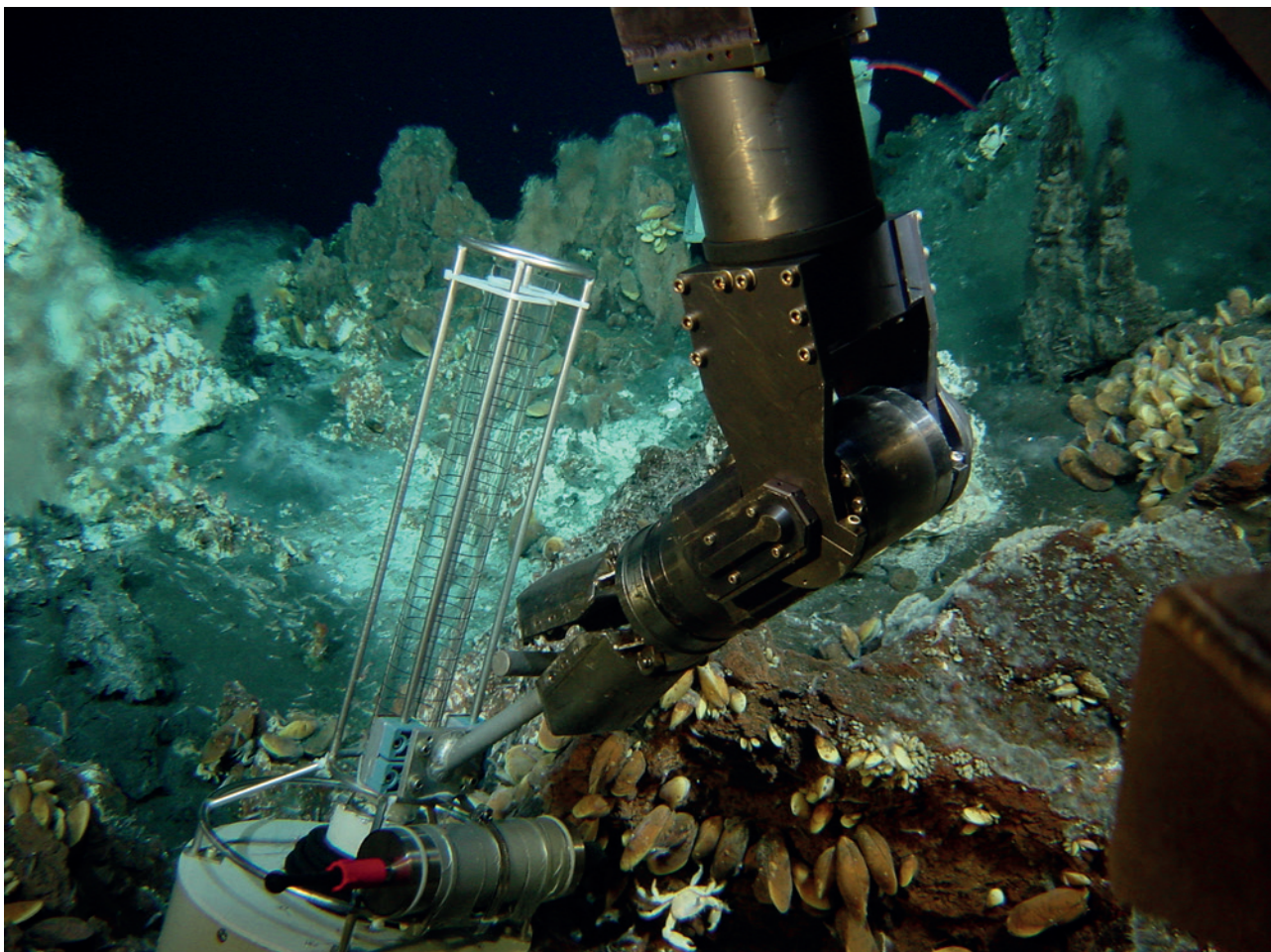


Photo © Ifremer-Campagne PHARE

Prélèvements et mesures réalisés sur une source hydrothermale grâce au bras télémanipulateur du Victor 6000 (système téléopéré faisant partie de la flotte de l'Ifremer) par 2 630 mètres de profondeur dans le Pacifique oriental.

« Outre son utilisation pour localiser les zones actives, l'étude d'un panache hydrothermal (concentrations, flux et processus) implique l'utilisation de traceurs chimiques et de paramètres physiques. L'objectif est de préciser le devenir des composés hydrothermaux (métaux, gaz, composés organiques...) dans l'océan global. »

basées sur des observations directes et celles basées sur les flux de métaux. Il est important de comprendre quelle est la proportion de métaux apportée par les sources hydrothermales qui est piégée dans les minéralisations et celle qui est dispersée dans l'océan. Ainsi, le tonnage de sulfures métalliques estimé à partir des sites actifs devrait être considéré comme un minimum. Pour la partie axiale, des estimations effectuées à l'échelle mondiale montrent que le potentiel est de $600 \cdot 10^6$ T (600 millions de tonnes) de sulfures (HANNINGTON, 2011 ; HANNINGTON et al., 2011). Une estimation intégrant les sites fossiles connus sur 20 kilomètres de largeur, le long des dorsales lentes, donne des tonnages sensiblement plus élevés, de $3\,000 \cdot 10^6$ T (FOUQUET, 2013). Du fait de l'augmentation de l'épaisseur sédimentaire recouvrant les minéralisations au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe, l'exploration d'une bande d'une vingtaine de kilomètres de large paraît l'option la plus raisonnable.

Enjeux n°2 : évaluer les apports chimiques des panaches hydrothermaux à l'océan

Outre son utilisation pour localiser les zones actives, l'étude d'un panache hydrothermal (concentrations, flux et processus) implique l'utilisation de traceurs chimiques et de paramètres physiques. L'objectif est de préciser le devenir des composés hydrothermaux (métaux, gaz, composés organiques...) dans l'océan global.

Cette approche suppose de comprendre les processus en jeu (mélange, précipitation, oxydoréduction, métabolisme bactérien) et de décrire la distribution des espèces chimiques et celle des paramètres physiques. L'un des enjeux est de quantifier les flux d'export.

Ces études permettront de préciser les bilans chimiques de l'océan. Elles sont incontournables pour quantifier les

apports naturels afin de déterminer des stratégies de préservation. Un champ actif de type Atlantique peut être actif pendant 50 000 ans et émettre dans l'océan des quantités considérables de métaux, qu'il reste à quantifier. Cela devra être mis en regard d'une exploitation qui pourrait durer au plus quelques dizaines d'années, sur un site donné. Les métaux en traces apportés par les fluides sont un facteur permettant de contrôler la production primaire dans l'océan et, par ailleurs, ils régulent la structure des communautés benthiques et phyto-planctoniques (MOREL et PRICE, 2003 ; SUNDA, 2012).

L'étude des cycles biogéochimiques des métaux et des métalloïdes (cadmium (Cd), cobalt (Co), chrome (Cr), manganèse (Mn), zinc (Zn), nickel (Ni), mercure (Hg) et sélénium (Se)) doit permettre d'appréhender le fonctionnement biogéochimique des océans et son impact sur l'abondance et la diversité du phytoplancton. Dans l'océan profond, les sources de métaux sont soumises à de fortes contraintes (apports fluviaux, resuspension sédimentaire et fluides hydrothermaux). Des études ont montré un transport de métaux d'origine hydrothermale sur des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres (FITZSIMMONS et al., 2014 ; RESING et al., 2015) et les contributions hydrothermales, dans certaines régions, représentent jusqu'à 30 % des apports en fer et influencent ainsi le réservoir en fer océanique sur des échelles de temps considérables (TAGLIABUE et al., 2010).

Enjeu n°3 : identifier la nature et l'origine des fluides hydrothermaux (soit mieux comprendre la mobilisation des métaux et le transfert des éléments chimiques)

Les fluides hydrothermaux sont les vecteurs du transport des métaux. Ils ont deux origines : a) l'eau de mer transformée par échanges avec les roches et b) les fluides issus des magmas. Ces derniers ont essentiellement été identifiés dans le volcanisme d'arc et d'arrière-arc, en arrière des fosses océaniques.

L'étude de ces fluides vise à comprendre les processus d'extraction des métaux des roches et leur transport vers le plancher océanique. Leur étude implique l'analyse des éléments majeurs, des éléments mineurs et de ceux présents à l'état de traces, ainsi que l'analyse des gaz (hydrogène (H₂), méthane (CH₄), gaz carbonique (CO₂), hydrogène sulfuré (H₂S)) et celle des composés organiques. L'acquisition de données sur plusieurs années permet de renseigner sur l'évolution temporelle des fluides. La connaissance des fluides est également essentielle pour comprendre les processus d'altération et de mobilisation des métaux dans la croûte océanique. Il s'agit d'un sujet constituant un enjeu central pour l'étude des échanges entre l'hydrosphère (en l'occurrence, les océans) et la lithosphère océanique. Les fluides hydrothermaux évoluent depuis la zone de réaction hydrothermale (en profondeur) jusqu'à leur sortie dans la colonne d'eau, sous la forme de panaches. Leur composition s'explique par leurs interactions avec les différentes roches traversées et par des processus physiques (séparation de phase). Des études

naturalistes, analytiques et expérimentales couplées à des modélisations thermodynamiques sont nécessaires pour appréhender les questions qui se posent.

Enjeu n°4 : accroître la connaissance des contrôles géologiques des minéralisations (c'est-à-dire des processus géologiques à l'interface hydrosphère/lithosphère, qui sont à la source de la précipitation et de la localisation de métaux)

Les cartes bathymétriques régionales permettent d'identifier les structures géologiques (failles, volcans, types de roche...) propices à la formation de minéralisations sulfurées. D'autres types de données (images acoustiques, compositions des roches) permettent de sélectionner des cibles potentielles d'exploration. Cette sélection s'appuie également sur la connaissance des processus profonds responsables de la diversité des minéralisations. L'étude des roches du plancher océanique (laves, roches du manteau, sédiments) est de ce fait importante pour connaître les sources profondes des métaux et des métalloïdes.

La variabilité des systèmes dépend de l'environnement géodynamique, de la nature du substratum et des processus physico-chimiques affectant les fluides.

L'activité hydrothermale est désormais connue dans les principaux contextes géodynamiques (dorsales lentes, dorsales rapides, bassins arrière-arc, arcs, avant-arcs), et ce, sur des substratums variés (basaltes, andésites, dacites, sédiments, roches ultrabasiques). L'intégration de l'ensemble des données et connaissances acquises sur le terrain devra, comme pour les gisements continentaux, aboutir à des « géomodèles » pour les différents types de minéralisations océaniques. Ces géomodèles sont importants non seulement pour la compréhension des processus métallogéniques, mais aussi pour orienter les actions industrielles et définir des stratégies d'exploration efficaces, aux différentes échelles.

Enjeu n°5 : appréhender la genèse et la nature des minéralisations sulfurées (et donc celle des processus géochimiques à l'interface)

La compréhension du mode de formation des minéralisations nécessite de connaître la morphologie, la structure et les zonations chimique et minérale des monts hydrothermaux. Les concentrations en métaux de base, précieux ou rares dépend très fortement du contexte géodynamique, de la nature des roches, de l'activité magmatique et de la nature des fluides. La compréhension de la variabilité des compositions minérales et chimiques des minéralisations implique de connaître les mécanismes de précipitation, les conditions de re-concentration des métaux (*zone refining*) au sein des monts minéralisés, les interactions fluides/minéraux/microorganismes et les processus de remobilisation/altération supergènes (tant biotiques qu'abiotiques). Couplée à des études géochronologiques, la caractérisa-

tion approfondie des dépôts doit permettre d'estimer les quantités de métaux et de métalloïdes piégées sur une échelle de temps donnée.

Enjeu n°6 : identifier les interactions géo-microbiologiques sur les sites inactifs et dans les panaches hydrothermaux

Un enjeu particulier porte sur les interactions entre microorganismes et sulfures sur le plancher océanique. Ces communautés jouent un rôle spécifique non seulement dans l'oxydation des sulfures métalliques et dans la dispersion de leurs métaux, mais aussi, parfois, dans leur re-concentration dans les zones oxydées. Un travail important reste à faire pour comprendre les mécanismes et les interactions sulfures/bactéries qui peuvent aboutir à la formation de nanominéraux spécifiques. Les mécanismes de ces interactions sont également à préciser. De plus, l'identification de microorganismes sulfo-oxydants et adaptés aux hautes pressions peut avoir un intérêt pour les techniques de biolixiviation des minerais utilisées dans l'industrie minière. Les communautés microbiennes associées aux fluides et panaches hydrothermaux pourraient en partie contrôler leur composition chimique (BAKER et al., 2012 ; LI et al., 2014). Dans ces habitats, la caractérisation de la diversité microbienne et de son activité métabolique demeure encore parcellaire et incomplète, alors que le volume important de ces habitats suggère que les communautés microbiennes associées aux panaches pourraient jouer un rôle important non seulement dans les grands cycles biogéochimiques (carbone, oxygène, azote et soufre), mais également dans la production de ligands organiques favorisant le transport de métaux sur de longues distances. Cet enjeu est ainsi directement connecté à l'enjeu n°2.

Enjeu n°7 : mieux connaître la biodiversité faunistique hors des sites actifs

L'arrêt de l'activité des sources hydrothermales prive d'énergie les communautés biologiques chimio-synthétiques. Comme dans les autres zones abyssales, les communautés situées sur les sites inactifs sont dépendantes des apports nutritifs extérieurs. Hors des sites hydrothermaux actifs, la faune des dorsales reste encore très peu étudiée. Outre son intérêt scientifique, l'étude de la biodiversité hors contexte hydrothermal actif est motivée par l'intérêt industriel pour ces ressources. Dans le cadre des permis d'exploration délivrés par l'*International Seabed Authority* (ISA), les contractants ont l'obligation d'établir un état de référence de l'environnement des sites explorés. Les travaux préliminaires réalisés en dehors des sites actifs montrent que la mégafaune présente une faible densité, mais une diversité élevée. Les substrats durs (basaltes, sulfures) sont colonisés par quelques espèces de suspensivores (coraux, crinoïdes, éponges...) et par une importante diversité d'organismes de petites tailles. Dans les sédiments hydrothermaux, les densités d'organismes sont élevées, mais elles sont très faibles dans

les sédiments hémipélagiques. Les approches des types metabarcodes et métagénomique sont également très prometteuses en matière d'inventaires d'espèces eucaryotes.

Enjeu n°8 : comprendre la dispersion larvaire et la connectivité des cycle de vie entre les diverses populations biologiques

La fragmentation des écosystèmes hydrothermaux entraîne une distribution des individus d'espèces endémiques au sein d'un ensemble de populations distantes les unes des autres (métapopulations) et formant un réseau interconnecté par des flux larvaires. La connectivité entre sites joue un rôle essentiel dans la dynamique des espèces du fait qu'elle détermine l'interdépendance démographique, écologique et évolutive des populations. Comprendre la structure et la dynamique de la métapopulation permettra d'identifier les sites pouvant jouer le rôle de zones de préservation ou abritant des populations pourvoyeuses de larves.

Les études portant sur la connectivité se heurtent à la méconnaissance du nombre des sites actifs (à l'axe et hors axe). Des sites de haute température sont connus jusqu'à huit kilomètres de l'axe. En plus de la distribution et de la connectivité génétique des populations, il est important de préciser la migration des larves. Notre compréhension de la biologie larvaire d'espèces profondes reste très peu avancée du fait de la difficulté à récolter, identifier et étudier ces larves en pleine eau. Le développement de nouveaux outils de prélèvement ainsi que d'outils d'identification taxinomique (barcodes moléculaires) permettront une meilleure connaissance de la phase larvaire d'espèces profondes et de la dynamique spatiotemporelle du pool larvaire susceptible de coloniser les sites. La caractérisation des courants près du fond est cruciale, car elle permettra le développement de modèles numériques simulant l'import-export de particules à proximité des systèmes hydrothermaux.

Bibliographie

BAKER (E. T.), WALKER (S. L.), EMBLEY (R. W.) & DE RONDE (C. E. J.), "High-Resolution Hydrothermal Mapping of Brothers Caldera, Kermadec Arc", *Economic Geology* 107, 2012, pp. 1583-1593.

FITZSIMMONS (J. N.), BOYLE (E. A.) & JENKINS (W. J.), *Distal transport of dissolved hydrothermal iron in the deep South Pacific Ocean*, Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 2014, pp. 16654-16661.

FOUQUET (Y.), « Les Ressources minérales marines – État des connaissances sur l'importance des dépôts », *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement* (thème du dossier « La mer et les ressources marines », n°70, avril 2013, pp. 49-56.

HANNINGTON (M.), "Comments on "What processes at mid-ocean ridges tell us about volcanogenic massive sulfide deposits"", by CATHLES (L. M.), *Mineralium Deposita* 46, 2011, pp. 659-663.

HANNINGTON (M.), JAMIESON (J.), MONECKE (T.) & PETERSEN (S.), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), "Estimating the Metal Content of SMS Deposits", *Oceans*, 2011.

JAMIESON (J. W.), CLAGUE (D. A.) & HANNINGTON (M. D.), "Hydrothermal sulfide accumulation along the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge", *Earth and Planetary Science Letters* 395, 2014, pp. 136-148.

LI (M.), TONER (B. M.), BAKER (B. J.), BREIER (J. A.), SHEIK (C. S.) & DICK (G. J.), "Microbial iron uptake as a mechanism for dispersing iron from deep-sea hydrothermal vents", *Nature Communications* 5, 2014.

MOREL (F. M. M.) & PRICE (N. M.), "The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans", *Science* 300, 2003, pp. 944-947.

RESING (J. A.), SEDWICK (P. N.), GERMAN (C. R.), JENKINS (W. J.), MOFFETT (J. W.), SOHST (B. M.) & TAGLIABUE (A.), "Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean", *Nature* 523, 200-U140, 2015.

SUNDA (W.), "Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean", *Frontiers in Microbiology* 3, 2012.

TAGLIABUE (A.), BOPP (L.), DUTAY (J.-C.), BOWIE (A. R.), CHEVER (F.), JEAN-BAPTISTE (P.), BUCCIARELLI (E.), LANNUZEL (D.), REMENYI (T.), SARTHOU (G.), AUMONT (O.), GEHLEN (M.) & JEANDEL (C.), "Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory", *Nature Geoscience* 3, 2010, pp. 252-256.