Les métaux, ressources minérales des océans

Bernard Commère

Résumé Les métaux jouent un rôle essentiel dans les progrès de l'humanité. Ressource non renouvelable et encore

rarement substituable par des polymères ou plastiques, leur présence dans les grands fonds marins pose la question de leur exploitation et des règles internationales qui doivent prévaloir dans une perspective de

développement durable.

Mots-clés Ressources minérales, nodules, sulfures métalliques, fonds marins, océan, hydrométallurgie,

biodiversité marine.

Abstract Metals, mineral resources of the oceans

The metals play an essential role in the progress of humanity. As non-renewable resource still rarely substitutable by polymers or plastics, their presence in deep seabeds raises the question of deep sea mining

and international rules that must prevail in a sustainable development perspective.

Keywords Mineral resources, nodules, metal sulfides, seabeds, ocean, hydrometallurgy, marine biodiversity.

es métaux ont joué un rôle important dans le progrès de l'humanité. Après avoir donné leur nom à l'âge de bronze ou à l'âge du fer, ils ont permis le fabuleux développement industriel des deux derniers siècles, notamment celui de la chimie (voir *encadré* 1).

La chimie s'est emparée des métaux comme éléments essentiels de ses découvertes pour la mise en œuvre de ses talents d'architecte (la catalyse par exemple), comme la nature s'en est emparée, probablement dès l'origine de la vie sur Terre, pour construire des biomolécules aussi essentielles et universelles que les chlorophylles, les métalloprotéines, etc.

Si la recherche de substituts ou de compléments aux ressources énergétiques fossiles est envisageable, il en va

Encadré 1

Les besoins en métaux, courte histoire

Les premières traces de l'utilisation des ressources minérales remontent à environ 5 000 ans avant notre ère, avec l'apparition de la métallurgie du cuivre, suivie de celle du bronze vers – 2600, puis du fer 1 000 ans plus tard. Jusqu'au XIX^e siècle, cinq métaux, l'or, l'argent, le cuivre, l'étain et le plomb, ont structuré les relations économiques et géopolitiques des peuples et des nations.

Au début des années 1980, une douzaine d'éléments chimiques métalliques étaient utilisés par l'industrie. Vingt ans plus tard, plus de 45 éléments différents sont mobilisés par l'avènement des nouvelles technologies, y compris des terres rares trouvées sous forme de traces dans des gisements d'éléments plus abondants, sur lesquelles la Chine s'est constitué un quasi-monopole, puisqu'en 2011 elle a produit 98 % des terres rares mondiales. Les disparités mondiales sont importantes. Au cours de sa vie, un occidental contemporain utilise 340 kg de plomb dans les batteries, 360 kg de zinc pour les toitures, 660 kg de cuivre pour ses câbles électriques, 1 600 kg d'aluminium, et 14 tonnes de fer pour les aciers divers. En revanche, dans les pays en développement, les consommations sont bien moindres, mais l'émergence économique crée une demande très forte. Ainsi en Chine, la consommation moyenne par habitant et par an est passée de

0,66 kg de zinc en 1996 à 1,07 kg en 2000, puis à 3 kg en 2010.

différemment pour les métaux dont la seule source autre que minière est le recyclage.

La découverte des ressources de l'océan (71 % de la surface terrestre) a conduit à l'envisager, non seulement au titre d'une étonnante biodiversité, mais aussi comme réservoir pour les besoins futurs de nos sociétés, développées ou en développement. En effet, les explorations scientifiques menées dans les grands fonds depuis les années 1960 ont permis de découvrir des processus géologiques et géochimiques sous-marins actifs, encore mal connus mais sans équivalent en domaine aérien sur la croûte continentale, et qui génèrent de fortes concentrations de métaux [1a].

Cependant, la difficulté d'accès aux profondeurs où se trouvent les concrétions, et la complexité et la probable fragilité du milieu rendent leur exploitation encore aléatoire. Les enjeux sont tels que, en préalable à toute action, la communauté internationale s'est donné des règles pour gouverner l'exploitation des grands fonds marins.

Ces questions et leurs développements récents, au-delà des aspects techniques liés à une telle exploitation, font l'objet de cet article.

Exploitation et règles internationales

Préoccupée par la menace d'une appropriation abusive de ces ressources, l'Assemblée générale des Nations unies (1970, 25e assemblée) a qualifié de « patrimoine mondial » (résolution 2749) le fond des mers et des océans situé audelà des limites des juridictions nationales. La Convention des Nations unies sur le droit de la mer, signée en 1982, prévoit ainsi que la zone qui se situe en dehors des juridictions nationales doit être utilisée « à des fins exclusivement pacifiques » et exploitée « dans l'intérêt de l'humanité tout entière ».

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), organisme intergouvernemental fondé en 1994 sous l'égide des Nations unies, instaure ainsi un régime d'appropriation collective et un contrôle de toutes les activités relatives aux ressources minérales des fonds marins et des activités connexes



Holothurie sur plage de nodules dans le Pacifique central Nord.

(exploration, transport) dans la zone internationale des fonds marins hors des limites des juridictions nationales, soit la plus grande partie des aires marines mondiales. L'extension des plateaux continentaux nationaux a, très naturellement, fait l'objet de longues études et de négociations acharnées. Ce n'est qu'en septembre 2015 que les premiers décrets de délimitation français correspondants ont pu être publiés.

Mais déjà, au début des années 2000, l'AIFM avait adopté un premier règlement concernant les nodules polymétalliques. Ces concrétions riches en manganèse, cobalt, cuivre et nickel se forment sur certains grands fonds. Densément présents par endroits, notamment dans la partie centrale de l'océan Pacifique ainsi que dans l'océan Indien, ces nodules ont suscité l'intérêt d'une quinzaine d'États qui ont sollicité des permis exclusifs d'exploration auprès de l'AIFM [1b]. Néanmoins, quinze ans plus tard, à quelques mois des échéances de ces permis, aucun titulaire n'a manifesté l'intention de passer à une phase d'exploitation industrielle.

Au début des années 2010, l'intérêt industriel s'est déplacé des nodules vers les sulfures polymétalliques et les encroûtements cobaltifères. De nouveaux règlements spécifiques ont été adoptés par l'AIFM, et plusieurs pays ont demandé de nouveaux permis d'exploration (voir encadré 2).

Aspects technologiques et innovation

En mer comme à terre, quatre méthodes principales permettent de recueillir des minéraux : le raclage de la surface, l'excavation, le creusement d'une galerie pour accéder aux gisements sous la surface ou le forage du gisement et sa fluidification. Une fois le matériau du gisement prélevé, il doit être transporté jusqu'aux installations où il sera concentré ou traité puis raffiné pour donner un produit commercialisable.

Dans les grands fonds sous-marins, les opérations sont commandées à distance à partir d'une plate-forme flottant en surface. Des premiers essais avec des systèmes de ramassage des sulfures polymétalliques à des profondeurs de 1 700 m montrent que l'exploitation de ce type de gisement semble possible du point de vue technique.

Le concours mondial de l'innovation lancé par la France en 2014 a retenu, dans sa phase 2, deux projets complémentaires : FONASURF (acronyme pour « du fond à la surface ») porté par Technip, qui vise à concevoir un système complet pour l'exploitation minière en eaux profondes, et « MELODI » (Magnetic and ELectromagnetic Ore Detectlon),

porté par CREOCEAN, qui propose des techniques innovantes de détection pour l'exploration à l'échelle régionale, la caractérisation à l'échelle locale, compatibles avec des objectifs industriels crédibles.

L'hydrométallurgie [2-3], dont le développement est lié à celui de la chimie, permet de séparer et valoriser des ressources naturelles jusqu'ici considérées comme non accessibles. Ce procédé de traitement consiste à dissoudre les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer pour les valoriser. Il s'avère particulièrement prometteur car moins gourmand en énergie que la métallurgie « classique » et produisant moins de déchets. Il permettra de valoriser les métaux classiques tels que le nickel, et aussi les métaux rares (terres rares, tantale, lithium, niobium...). Le point limitant reste néanmoins le développement de la capacité à traiter en continu. Le développement de pilotes pour la mise au point de ces technologies reste incontournable. Parallèlement, il est essentiel de développer le recyclage tant des chutes de production minières que des produits en fin de vie.

Développement durable

La plus grande surprise suscitée par l'exploration des fonds marins fut la découverte de la richesse de la vie et de la biodiversité qu'ils hébergent [1c], encore largement méconnue, ainsi que les services écosystémiques qu'elle fournit. En 2014, l'analyse des impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes a fait l'objet d'une expertise collective [4] qui s'appuie sur un corpus de

Encadré 2

Projets en cours et perspectives

La Russie soutient un important programme d'exploration et d'inventaire des ressources minérales hydrothermales le long de la dorsale Atlantique et vient d'obtenir un permis d'exploration dans l'Atlantique nord auprès de l'AIFM.

La Chine a obtenu en 2011 un permis dans l'océan Indien et conduit des campagnes en mer en vue de demander un second permis dans l'Atlantique sud.

Le Brésil a mis en place en 2011 un ambitieux programme pour l'exploration des sulfures et encroûtements métalliques dans l'Atlantique sud. Il a déposé en 2014 une demande de permis concernant les encroûtements cobaltifères sur l'élévation du Rio Grande en Atlantique sud.

L'Inde s'équipe de technologies spécifiques pour l'exploration des grands fonds dans l'océan Indien.

Le Japon, les États-Unis et l'Allemagne considèrent les métaux marins dans leurs priorités à moyen terme.

La Corée du Sud mène un programme d'exploration centré sur les ressources minérales des grands fonds et a obtenu un permis dans la zone économique exclusive (ZEE) des Tonga.

Des permis d'exploration ont été déposés sur cinq champs hydrothermaux dans l'ouest du Pacifique par les sociétés privées Nautilus Minerals (230 000 km²) et Neptune Minerals (264 000 km²).

Le premier projet industriel mondial, porté par Nautilus, a obtenu un permis exclusif pour installer un site d'exploitation pilote dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle Guinée. Nautilus prépare l'exploitation de dépôts hydrothermaux situés à 1 700 m de profondeur.

Les principaux acteurs industriels français intéressés, la société d'ingénierie pétrolière française Technip et l'opérateur minier Eramet, ont entrepris de créer une filière technologique de niveau mondial. En s'appuyant sur l'expertise de l'Ifremer, ils ont initié une action pilote d'exploration dans la ZEE de Wallis et Futuna. Technip est également au premier rang auprès de Nautilus et de Neptune pour réaliser les équipements nécessaires à l'exploitation des minerais sulfurés par grande profondeur.

plus de 13 900 références, dont 2 000 considérées comme d'intérêt majeur. Cette expertise conclut que les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi des grands fonds océaniques sont souvent peu ou non invasives et ne nécessitent généralement pas d'étude d'impact au sens de l'AIFM. Seul le prélèvement de nodules est soumis à une étude d'impact lorsqu'il est destiné à évaluer des teneurs moyennes, et donc l'intérêt économique, d'une zone dont l'aire dépasse 10 000 m².

Pour la plupart des systèmes envisagés, les techniques d'exploitation comportent des éléments communs : des éléments posés sur le fond assurant l'extraction du minerai, des éléments flottant dans la colonne d'eau pour la remontée du minerai, et en surface, un navire assurant le prétraitement du minerai à bord ainsi que l'unité de commande de l'ensemble. Les experts estiment encore très difficile d'évaluer l'impact potentiel de ces techniques qui n'en sont qu'au stade de concepts, de modèles ou au mieux de prototypes, d'autant que leurs caractéristiques restent encore mal définies ou confidentielles.

Quels sont les risques liés à l'exploitation ?

Sur le fond marin : la destruction du milieu (habitat et faune) provoquée par l'extraction dans la zone exploitée ; la mise en suspension de sédiments et de particules métalliques et l'effet de leur redéposition, pouvant par exemple provoquer l'étouffement des organismes fixés ; les vibrations induites par l'extraction ; la lumière.

Sur le lieu du rejet en mer de l'eau remontée avec le minerai, en surface ou à proximité du site d'extraction, suivant les cas : le transfert de masses d'eau de caractéristiques physico-chimiques différentes ; le rejet de particules fines après filtration, plus dangereuses pour les espèces que les grosses particules.

En surface : la dispersion de minerai en éléments de toutes tailles, depuis le navire ; le bruit causé par les moteurs, les pompes et autres systèmes.

À ces risques, qui devront faire l'objet d'une vigilance en conduite normale d'opérations, s'ajouteront les risques de dispersion accidentelle de minerai lors de transferts sur le navire, ou de ruptures ou de fuites de l'unité de remontée, qui pourraient affecter toute la colonne d'eau.

Vers une stratégie française dans un contexte mondial

La France, qui possède le deuxième territoire maritime au niveau mondial, est particulièrement concernée par ces enjeux. Forte à la fois d'établissements scientifiques très investis dans la connaissance des environnements profonds et de sociétés minières et d'ingénierie de rang mondial, elle a la capacité de convertir ce potentiel en véritables opportunités économiques.

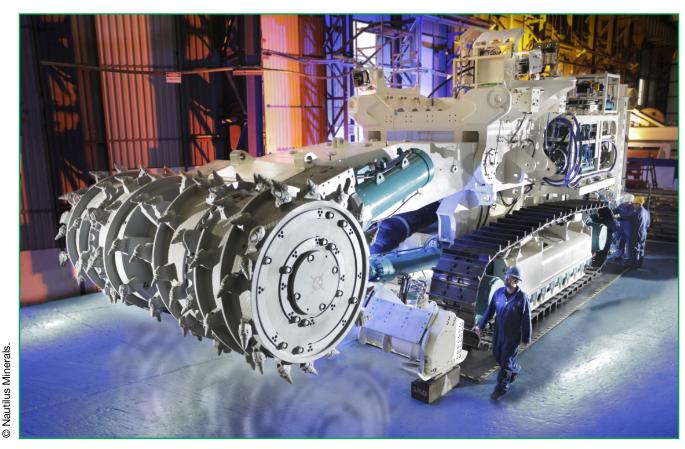
Mais elle a aussi l'obligation de concilier ces activités avec la préservation des milieux océaniques profonds et de l'ensemble des services qu'ils peuvent rendre à la société, qui restent, pour une part d'entre eux, encore très mal connus.

Afin de coordonner les acteurs, le Comité interministériel de la mer (CIMer) a décidé en décembre 2013 de confier aux ministères concernés le pilotage d'un programme national de recherche et d'accès aux ressources minérales des grands fonds marins, associant notamment l'Ifremer, le CNRS et les universités. Ce programme comporte les volets suivants :

- l'acquisition des connaissances (ressources minérales, biodiversité) et le développement des compétences associées avec trois zones d'intervention : plateau continental français, dans la zone de Clarion-Clipperton (permis nodules AIFM) et en zone Atlantique nord (permis sulfures AIFM);
- l'identification des conséquences environnementales de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes en vue de leur maitrise (expertise collective, *cf.* supra);
- le développement des technologies d'exploitation et de valorisation des ressources minières respectueuses de la biodiversité, grâce à la mobilisation des financements prévus au titre de la valorisation des richesses marines dans le cadre du volet « programme de soutien à l'innovation majeure » du programme des investissements d'avenir (PIA) ;



Pince du robot téléopéré Victor 6000 de l'Ifremer à proximité d'un fumeur noir, sur un site hydrothermal de la dorsale médio-atlantique.



Le « Bulk Cutter », machine conçue pour l'exploitation des ressources minérales marines.

- une recherche systématique de partenariats public-privé, notamment pour la poursuite des campagnes déjà lancées.

Découvertes dans les années 1960, les ressources minérales marines représentent une opportunité stratégique pour les pays industriels. À la différence des ressources terrestres placées sous le contrôle des États, dont les géostratégies ont conduit à des situations de quasi-monopole menaçant les équilibres mondiaux, la régulation de l'accès aux zones internationales, conduite sous l'égide de l'ONU, s'attache à préserver l'accès pacifique dans le respect de l'environnement et dans l'intérêt de l'humanité. Dans ce contexte, une bonne coordination entre l'Autorité internationale, les États et les industriels est essentielle pour optimiser les investissements importants à réaliser en fonction des perspectives économiques de valorisation.

Références

[1] La chimie et la mer, M.-T. Dinh-Audouin (coord.), Collection « Chimie et... », EDP Sciences/Maison de la Chimie/L'Actualité Chimique, 2009, a) Fouquet Y., Les ressources minérales du futur sont-elles au fond des mers ?, p. 55-80; b) Herrouin G., L'exploitation des nodules polymétalliques: utopie ou réalité ?, p. 81-98; c) Desbruyères D., Du minéral à la vie: les oasis des grands fonds, p. 121-134.

- [2] Rizet L., Charpentier P.E., Métallurgie extractive Hydrométallurgie (réf. Internet M2235), Métallurgie extractive et recyclage des métaux de transition (réf. Internet 42369), Élaboration et recyclage des métaux (réf. Internet ti554), Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [3] Vignes J.-L., Jehanne Y., L'hydrométallurgie, *Le Bup*, **2003**, 97, p. 1281.
- [4] Dyment J., Lallier F., Lamare S., Le Bris N., Rouxel O., Sarradin P.M., Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes, Synthèse du rapport de l'expertise scientifique collective, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 2014.



Bernard Commère

est ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, chargé de mission au Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche*.

Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Direction générale de la recherche et de l'innovation, Service de la performance, du financement et de la contractualisation avec les organismes, Département B3 – Analyse des politiques d'organismes et enjeux territoriaux, 1 rue Descartes, F-75231 Paris Cedex 05.

Courriel: bernard.commere@recherche.gouv.fr