

probabilités d'interaction de l'axion et du photon correspondant au modèle KSVZ, pour lequel le couplage de l'axion aux photons est 2,7 fois plus intense que dans le modèle DFSZ. Cependant, grâce aux améliorations du dispositif, pour la première fois, les chercheurs ont pu exclure des axions du modèle DFSZ pour des masses comprises entre 2,66 et 2,81 microélectronvolts. Cet intervalle de masse semble modeste, mais il illustre les capacités d'ADMX et nous encourage à poursuivre sur cette voie.

Avec l'expérience ADMX, nous sondons désormais les masses les plus plausibles pour l'axion

L'expérience ADMX est constituée de nombreux systèmes complexes qui doivent fonctionner de concert, mais la plupart de ses éléments sont maintenant au point et leur fiabilité est confirmée. Au-delà de l'aspect technique de l'expérience, la collaboration a aussi connu des changements, elle s'est élargie et inclut désormais des physiciens de nombreux laboratoires et universités. Et une nouvelle équipe de direction d'ADMX a émergé, avec comme porte-parole Gray Rybka, de l'université de Washington, et Gianpaolo Carosi, du laboratoire Lawrence Livermore.

Nous sondons désormais la plage de masses la plus plausible pour les axions candidats à la matière noire, mais la nature peut toujours nous surprendre. Rechercher dans une plage de masses légèrement plus faibles n'est pas très compliqué; en revanche, adapter notre expérience pour rechercher des masses supérieures est un défi de taille.

Quand la masse des axions augmente, la fréquence de résonance de la cavité doit aussi augmenter. Cela implique de diminuer le diamètre de la cavité, ce qui réduit d'autant le volume dans lequel on peut rechercher les axions. Nous pourrions entasser un grand nombre de cavités à l'intérieur d'un unique gros aimant pour conserver un volume appréciable, mais nous serions alors confrontés au «problème de la montre suisse»: la complexité d'un tel système devient très difficile à gérer. Nous

pourrions aussi nous contenter d'une petite cavité, à condition d'augmenter l'intensité du champ magnétique pour compenser. Cette solution est coûteuse, mais elle est actuellement à l'étude. Il est possible que d'ici cinq à dix ans, une intensité accrue du champ magnétique (jusqu'à 32, voire 40 teslas) élargira la plage des masses de notre recherche.

Pour des masses de l'axion beaucoup plus grandes (proches de un milliélectronvolt), les astrophysiciens auraient les moyens de contribuer à la traque. Si de tels axions existent et forment des halos de matière noire autour des galaxies, les radiotélescopes pourraient détecter des raies d'émission très faibles.

À terme, ADMX et d'autres projets parviendront à explorer l'intégralité de la fenêtre théorique des masses possibles de l'axion candidat à la matière noire. Le fait que la plage des masses plausibles soit limitée et entièrement accessible par des expériences fait de l'axion un candidat attrayant, par rapport à d'autres possibilités impossibles à tester complètement.

LA TRACE DES AXIONS DANS LA STRUCTURE DE L'UNIVERS?

Tandis que nos travaux expérimentaux se poursuivent, les théoriciens font eux aussi des progrès. Des modèles cosmologiques complexes simulés sur des supercalculateurs sont en passe de produire des prédictions plus fiables pour la masse de l'axion. Il est possible, par exemple, que les axions se soient accumulés au cours de l'histoire de l'Univers, sous l'effet de la gravité, selon une distribution différente de celle des wimps. Cela aurait des conséquences sur l'histoire de la formation des grandes structures cosmiques. Des programmes d'observations astrophysiques à venir, comme le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope d'étude synoptique) qui sera opérationnel en 2019, établiront des cartes de la structure à grande échelle de l'Univers avec une précision suffisante pour permettre aux chercheurs de faire le tri entre les divers candidats à la matière noire.

Une autre possibilité encore est que les axions prédits par la chromodynamique quantique ne soient que la manifestation d'une théorie plus fondamentale œuvrant aux échelles énergétiques les plus hautes. L'une de ces théories en lice, la théorie des cordes, prédit des axions de masse beaucoup plus petite que celles qu'explore l'expérience ADMX. Mais la théorie des cordes est hautement spéculative, tout comme ses prédictions.

Il y a vingt ans, le consensus confortable était que la matière noire était constituée de wimps. Ces dernières années, les axions ont gagné en crédibilité. Dans un avenir pas trop lointain, nous devrions savoir si, oui ou non, ils sont la solution au mystère de la face invisible du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Du et al., **Search for invisible axion dark matter with the Axion Dark Matter Experiment**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, article 151301, 2018.

P. Sikivie, **Axions, domain walls, and the early Universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1156-1159, 1982.

S. Weinberg, **A new light boson ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 223-226, 1978.

F. Wilczek, **Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 279-282, 1978.

Bientôt des mines

L'ESSENTIEL

> La demande en certains métaux augmente et les gisements terrestres s'épuisent, d'où l'idée d'exploiter ceux des grands fonds marins.

> À plus de 4 000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, il existe d'immenses champs de nodules polymétalliques contenant des proportions importantes de nickel, de cuivre et de cobalt.

> L'utilisation de machines pour les ramasser disperserait des masses de sédiments en tous sens. Les navires d'exploitation feraient de même en surface après avoir trié le matériel dragué.

> Dès lors, avant que ne démarre cette nouvelle activité industrielle, il importe d'étudier comment minimiser son impact environnemental.

LES AUTEURS



THOMAS PEACOCK
professeur de génie
mécanique à l'institut
de technologie du
Massachusetts (MIT),
aux États-Unis



MATTHEW H. ALFORD
professeur
d'océanographie
physique
à l'institut Scripps,
aux États-Unis

Les grands fonds océaniques comportent de riches gisements de métaux. Mais leur exploitation, qui pourrait démarrer prochainement, aura des impacts environnementaux négatifs. Scientifiques et organismes régulateurs recherchent des solutions pour limiter les dégâts.

Février 2018, à 50 kilomètres au large de San Diego. Le navire océanographique *Sally Ride* flotte sur 1 000 mètres d'eau. À son bord, huit conteneurs grands comme une voiture familiale sont remplis de sédiments dragués au fond du Pacifique. Nous sommes en train de les mélanger avec de l'eau de mer dans un énorme réservoir. Puis nous ferons passer le contenu par une conduite d'évacuation plongeant depuis notre

bord jusqu'à 60 mètres sous la surface. L'objectif est de décrire la dynamique du nuage de boue créé. À l'aide de tout un réseau de capteurs reliés au navire, nous allons mesurer sa forme et suivre son évolution; nous mesurerons la concentration des particules de sédiment dans la colonne d'eau. Les données recueillies nous aideront à nourrir une réflexion générale sur l'exploitation minière en mer, une nouvelle industrie qui pourrait bientôt avoir un impact important sur l'océan. >

au fond des océans?



Les grands fonds
sont parfois
tapissés de nodules
polymétalliques.
Ils abritent des formes
de vie fragiles,
comme ce gros poisson
à croissance très lente.

> Après des années d'essais, plusieurs États et entreprises commencent à prospecter les grands fonds marins à la recherche de nickel, de cuivre, de cobalt et d'autres métaux de valeur. Il existe plusieurs types de gisement, mais les plus intéressants à exploiter consistent en accumulations, à plusieurs milliers de mètres de profondeur, de concrétions rocheuses riches en métaux de la taille du poing : des nodules polymétalliques.

Pour les récolter, les industriels veulent construire des machines capables de travailler à ces profondeurs. Ces machines collectrices avanceraient lentement sur le plancher océanique en aspirant la couche supérieure qui contient les nodules, opération qui s'accompagnerait du relargage vers l'arrière d'un important nuage de sédiments. Elles remonteraient les nodules sur de grands navires par des tuyaux de plusieurs kilomètres de long. En triant le matériel prélevé, on obtiendrait des millions de nodules par jour. Les sédiments restants seraient renvoyés dans la mer où ils formeraient cette fois un nuage plongeant.

Quel impact une activité d'extraction ainsi menée aura-t-elle sur les organismes vivant sur le plancher océanique et dans la colonne d'eau ? L'expérience de pollution volontaire décrite plus haut vise à apporter des éléments de réponse à cette question.

UNE DEMANDE CROISSANTE EN NICKEL, CUIVRE ET COBALT

Les mines terrestres à fortes teneurs commencent à s'épuiser. Dans le même temps, l'augmentation de la population mondiale, l'urbanisation, la croissance de la consommation mondiale et le développement rapide de technologies dépendant de certains métaux tirent les prévisions de marchés futurs vers le haut.

On estime par exemple que la demande mondiale de nickel – environ 2 millions de tonnes actuellement – devrait augmenter de moitié d'ici à 2030. Et les gisements terrestres en contiendraient encore environ 76 millions de tonnes de nickel. Or, à elle seule, la zone de fracture de Clarion-Clipperton, c'est-à-dire la plaine abyssale s'étendant de Hawaï à la Basse-Californie, en contient à peu près autant ! Pour le cobalt, la situation est similaire : les réserves terrestres sont évaluées à environ 7 millions de tonnes, mais les nodules de cette même zone de fracture en contiennent autant ou plus. C'est pourquoi plusieurs entreprises, telles que la GSR (la société belge Global Sea Mineral Resources) ou la société anglaise UK Seabed Resources, se tournent vers l'exploitation minière en mer profonde, qu'elles espèrent moins coûteuse à terme.

Du reste, certains pays disposant de peu de ressources minérales terrestres, comme le Japon et la Corée du Sud, veulent déjà prospecter les

océans à la recherche de gisements. Ils ont donc commencé par explorer leur zone économique exclusive (ZEE). En septembre 2017, la Jgmecc (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) a ainsi effectué dans ces eaux territoriales l'un des premiers essais à grande échelle. Une excavatrice prototype a récolté des tonnes de zinc et d'autres métaux en plusieurs endroits situés à 1 600 mètres de profondeur, au large d'Okinawa.

De petites nations insulaires, comme les Tonga et les Îles Cook, ont des ressources trop limitées pour développer elles-mêmes une telle industrie. Elles négocient donc des droits d'exploitation minière à l'intérieur de leurs zones économiques exclusives. S'agissant du plancher océanique sous-jacent aux eaux internationales, c'est l'Autorité internationale des fonds marins, ou AIFM (sigle anglais : ISA), communément appelée l'« Autorité », qui l'administre depuis Kingston, en Jamaïque. Pour le moment, l'Autorité a accordé 28 permis d'exploration à des organismes de 20 pays.

Pendant que les entreprises prospectent les ressources, les chercheurs s'efforcent d'en savoir le plus possible sur les éventuels effets destructeurs de la nouvelle industrie et de déterminer dans quelle mesure on pourrait les réduire. Des gouvernements, des industriels, l'AIFM, des universités et des organismes scientifiques (en France, l'Ifremer et le CNRS) s'associent afin de lancer et de mener les projets de recherche nécessaires.

Trois types de gisement sont prometteurs. Le premier est celui des « amas sulfurés ». Il s'agit d'accumulations de sulfures métalliques (FeS_2 , PbS , Au_2S_3 ...) créées par les sources hydrothermales présentes sur les dorsales océaniques, ces longues chaînes volcaniques sous-marines qui marquent la frontière entre deux plaques tectoniques. Les amas sulfurés contiennent des masses notables de zinc, de plomb et d'or. La Papouasie-Nouvelle-Guinée a accordé à la société canadienne Nautilus

La plupart des projets d'extraction en eau profonde concernent les nodules polymétalliques

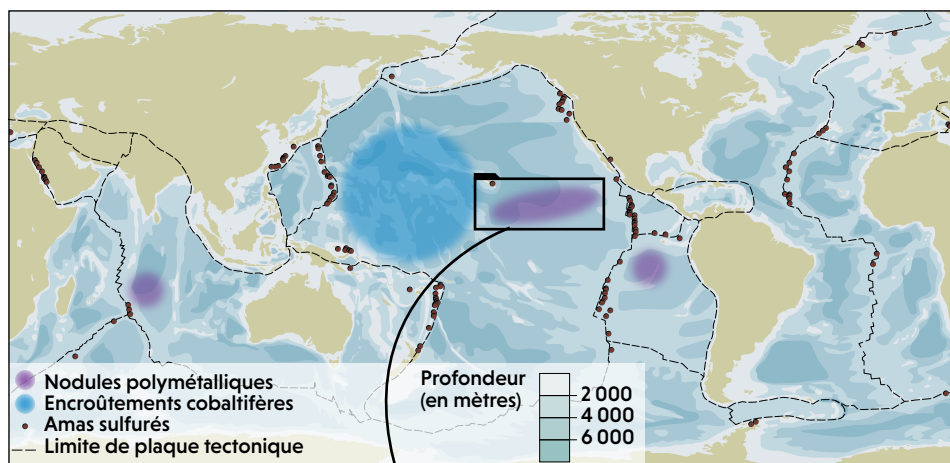
CHASSE AU TRÉSOR

De nombreux pays et entreprises exploitent les fonds marins peu profonds à la recherche de pétrole, de sable et de diamants. Nombre d'entre eux se sont aussi mis à prospecter les grands fonds à la recherche de métaux critiques, tels le nickel et le cobalt. Les chercheurs ont cartographié dans

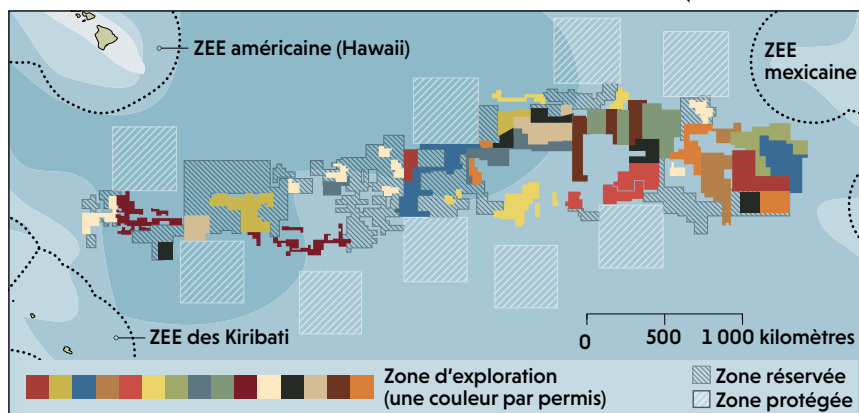
les eaux internationales trois types de gisement qui semblent particulièrement prometteurs (*régions colorées*). Sur le plan économique, ce sont les nodules polymétalliques, que l'on nomme aussi des nodules de manganèse, qui pourraient être les plus intéressants.

CONCENTRATIONS MÉTALLIQUES DANS LES FONDS MARINS

C'est l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) qui régleme l'exploitation minière dans les eaux internationales. Cet organisme a déjà émis 16 permis d'exploration (*ci-dessous*) à la recherche de nodules de manganèse dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton, une région du plancher de l'océan Pacifique grande comme l'Europe. L'essentiel de ces concrétions rocheuses se trouve à une profondeur de plus de 4 000 mètres.



PERMIS D'EXPLORATION



Quand l'AIFM accorde un permis, elle définit des zones réservées à une exploitation future par des pays en développement, et des zones protégées où aucune extraction ne peut avoir lieu. Certains pays mènent également des recherches dans leur propre zone économique exclusive (ZEE), c'est-à-dire l'espace maritime qu'ils ont le droit d'exploiter.

Minerals un permis d'extraction de ces sulfures sur le site hydrothermal inactif de Solwara 1. De son côté, l'AIFM a émis sept permis d'exploration sur des sites d'anciennes sources hydrothermales se trouvant dans les eaux internationales. Les scientifiques ont, eux, demandé un moratoire pour les sites actifs, afin de protéger leurs écosystèmes uniques.

Le deuxième type de gisement intéressant est celui des encroûtements cobaltifères. Le contact entre les courants marins et les flancs ou sommets de montagnes sous-marines entraîne en effet la précipitation des métaux contenus dans l'eau de mer. Cela finit par créer des amas considérables: même s'ils ne grossissent que de quelques millimètres par million

d'années, ils finissent par atteindre des épaisseurs de 5 à 10 centimètres. Outre du cobalt, ces amas contiennent du nickel et d'autres métaux intéressants. L'AIFM a émis quatre permis d'exploration pour l'Ouest du Pacifique, mais l'extraction de ces encroûtements cobaltifères sera un défi: il est difficile de les arracher au substrat rocheux, tandis que les pentes abruptes où ils se trouvent constituent un terrain difficilement praticable.

Dès lors, la plupart des projets d'exploration minière en eau profonde portent sur le troisième type de gisement: les nodules polymétalliques. On les nomme aussi nodules de manganèse, parce que ce métal y domine. Dans de nombreuses régions du plancher océanique, >

➤ ils jonchent le fond, à moitié enterrés dans les sédiments. Leur formation est très lente : sur un quelconque morceau de matière détritique, les métaux contenus dans l'eau se mettent à précipiter, formant un noyau dont le diamètre augmentera ensuite d'environ 1 centimètre par million d'années.

À ce jour, l'AIFM a accordé 16 permis d'exploration à la recherche de nodules dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton. Bien que les proportions varient d'un endroit à l'autre, un nodule contient typiquement 3% de son poids en nickel, en cuivre et en cobalt; c'est cela qui fait son prix, bien plus que les 25% de manganèse qu'il contient aussi. Le reste est du matériau durci sans intérêt économique.

RUÉE VERS LES NODULES

L'évaluation de l'intérêt minier d'un site potentiel à l'aide d'instruments et de collecteurs d'échantillons embarqués dans des véhicules autonomes sous-marins prend plusieurs mois. En raison de l'étendue des surfaces à explorer, on extrapole les résultats de l'échantillonnage sur l'ensemble du champ pressenti. Un site passe pour économiquement viable s'il promet au moins 10 kilogrammes de nodules par mètre carré, si peu ou pas de sédiments les recouvrent et si la pente du fond océanique est inférieure à 10%, afin que les machines collectrices, roulant sur de lourdes chenilles, puissent s'y déplacer sans trop de difficulté.

L'outil crucial de l'extraction minière sous-marine est la machine collectrice, alimentée par un câble électrique relié au navire. Elle doit être conçue pour exploiter la couche superficielle du fond océanique sur environ 50 kilomètres par jour, sans doute par allers et retours à l'intérieur d'une bande large d'un kilomètre. Des véhicules sous-marins autonomes aideraient à guider l'engin et à explorer les environs immédiats.

Après avoir aspiré ou ramassé à la pelle les nodules et les sédiments qui les accompagnent, la machine effectuerait un tri grossier en expulsant derrière elle le plus possible de boue. Un long tube équipé d'une série de pompes ferait ensuite remonter le matériau issu de ce premier tri jusqu'à un navire de traitement; les industries gazière, pétrolière et de dragage utilisent déjà couramment ce type de colonne ascendante. Le navire séparerait les nodules et renverrait le reste des sédiments dans l'océan par un tuyau d'évacuation. De gros navires minéraliers achemineraient ensuite les nodules jusqu'à une usine de traitement située à terre, qui en extrairait les métaux.

On estime que, pour que cette collecte soit économiquement rentable, les entreprises minières devront ramasser 3 millions de tonnes de nodules par an, soit environ 37 000 tonnes de nickel, 32 000 tonnes de cuivre, 6 000 tonnes de cobalt et 750 000 tonnes de manganèse.



Des nodules de manganèse contenant des métaux économiquement intéressants sont remontés du fond du Pacifique au cours d'une mission d'échantillonnage de la société canadienne Nautilus Minerals.

L'AIFM a été instaurée sous l'égide de la CNUDM, c'est-à-dire de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer. Celle-ci stipule notamment qu'une nation signataire doit prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger l'environnement marin. L'AIFM accorde des permis d'exploration par zones de 150 000 kilomètres carrés. Comme les pays ayant ratifié la CNUDM ou l'ayant rejointe (167 États et l'Union européenne) considèrent le fond des océans comme une ressource «pour le patrimoine commun de l'humanité», toute entreprise ou organisme qui souhaite y pratiquer une activité minière doit être parrainé par un pays ayant ratifié la CNUDM. Une fois les études prospectives faites, l'entreprise divise chaque parcelle en deux moitiés, dont l'une est choisie par l'Autorité et réservée pour une exploitation éventuelle par un pays en développement.

Les études suggèrent que sur une parcelle de 75 000 kilomètres carrés alloués, une entreprise ne trouvera vraisemblablement que 10 000 kilomètres carrés exploitables économiquement (soit environ 0,2% de la zone de fracture de Clarion-Clipperton).

La machine collectrice aspirerait les 10 à 15 centimètres superficiels du fond de l'océan

et compacterait le plancher océanique partout où elle passerait. Or une grande diversité d'organismes d'une taille dépassant la cinquantaine de micromètres vivent dans les nodules ou dans les sédiments. La plupart de ces organismes ne résisteront pas au prélèvement de la couche superficielle du fond ou au nuage de sédiments qui se redéposera.

Des microorganismes plus petits, notamment des bactéries, constituent le reste de la biomasse. On ne sait pas exactement ce qui arrivera à ces minuscules espèces. Projetées vers le haut avec les sédiments, elles se redéposeront au fond quelques kilomètres plus loin. Celles dont l'existence dépend des nodules auront sans doute du mal à survivre. Comme les nodules mettent des millions d'années à se former et que, dans l'océan profond, les communautés biologiques éloignées des événements hydrothermaux sont très lentes à se développer, il est probable que les régions exploitées ne retrouveront pas leur état antérieur avant une durée bien plus longue que la vie humaine.

Ainsi, il y a près de 30 ans, des chercheurs allemands ont utilisé un traîneau pour simuler le dragage le long d'un chemin d'extraction; quand les lieux ont été revisités en 2015, les traces de passage de l'engin semblaient encore toutes fraîches.

L'impact des nuages de sédiments relâchés par les navires est très difficile à évaluer

L'impact du nuage de sédiments émis par la machine collectrice est un autre sujet de préoccupation. Des courants de quelques centimètres par seconde parcourent le fond de l'océan; ils pourraient emporter les particules à plusieurs kilomètres du lieu d'extraction. Majoritairement très fines, avec un diamètre de l'ordre de 0,02 millimètre, ces particules sédimentent à une vitesse d'environ 1 millimètre par seconde. Comme les nuages de sédiments émis par les machines atteindront une dizaine de mètres de haut au sein des courants de fond, ces particules pourraient être déplacées d'une dizaine de kilomètres de leur lieu d'émission.

Cette estimation est peut-être trop simpliste, car les particules fines ont tendance à flocculer, c'est-à-dire à former des agrégats se déposant plus vite que les particules isolées, ce qui limite l'étendue des nuages. Mais comme le taux de sédimentation dans les grands fonds est extrêmement faible, de l'ordre du millimètre par millier d'années seulement, les biologistes pensent que même le dépôt de très faibles quantités de sédiments émis par les machines collectrices suffirait à étouffer la vie sur le plancher océanique jusqu'à des distances dépassant la dizaine de kilomètres.

Le compactage du fond par le passage de la machine collectrice est aussi un problème. L'étude des effets des tempêtes abyssales qui, de temps à autre, raclent les sédiments des grands fonds fournira peut-être des éléments d'information précieux à cet égard.

Quant à l'impact des nuages de sédiments relâchés par les navires sur l'environnement marin et son écologie, il est très difficile à évaluer. Les courants qui animent les couches supérieures de l'océan sont plus rapides et plus turbulents. La conduite rejetant les sédiments pourrait descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Elle émettra un nuage de forme plus ou moins conique, qui sera dilué et distordu par les courants, puis transporté sur plusieurs kilomètres par jour.

Au cours de l'expérience que nous avons menée au large de San Diego en février 2018, nous avons suivi le nuage à l'aide de plusieurs instruments. Nous avons constaté que les courants océaniques le rendaient sinueux, et observé la formation de filaments entremêlés. Un appareil sous-marin et remorqué en a prélevé des échantillons. Nous analysons les données recueillies afin d'en tirer les principales informations, telles que les concentrations en sédiments à proximité ou à distance de la conduite.

Les chercheurs tentent aussi de savoir dans quelle mesure la destruction de la vie dans une zone minière affectera les écosystèmes locaux, ainsi que les communautés abyssales adjacentes ou distantes de plusieurs kilomètres. Au sein de la zone de fracture de Clarion-Clipperton, l'AIFM a décidé de protéger neuf grandes régions et travaille aussi à l'établissement de zones protégées au sein de chaque zone contractuelle. Des spécialistes surveilleront en outre ces sanctuaires afin d'évaluer l'impact de l'extraction.

Il importe aussi de comparer les avantages et inconvénients de l'extraction minière en mer et sur terre. En République démocratique du Congo, qui fournit 60% du cobalt utilisé sur la planète, l'exploitation minière se traduit par de la déforestation et de la pollution atmosphérique, sans parler de l'exploitation des enfants dans les mines. Dans certains pays, les ➤

ET LA FRANCE DANS TOUT CELA ?

Dans les années 1970, la France a été pionnière dans la découverte des sources hydrothermales métallifères et dans l'exploration des zones à nodules de la zone de fracture de Clarion-Clipperton (CCFZ), située dans le Pacifique Nord équatorial. L'exploration du fond de l'océan à la recherche de gisements métallifères a ensuite connu un fort ralentissement en raison de la situation sur le marché des métaux. Puis, dans les années 2000, l'intérêt pour les trois types de ressources minérales marines profondes – les nodules polymétalliques dans les plaines abyssales, les amas sulfurés le long des dorsales océaniques et des bassins proches des arcs volcaniques, et les encroûtements cobaltifères sur les pentes des monts sous-marins – est revenu.

C'est pourquoi, dans le cadre de la stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins, l'État français patronne l'Ifremer (l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), qui a signé deux contrats d'exploration des ressources minières en océan profond avec l'Autorité internationale pour les fonds marins (AIFM), et en assure la gestion.

Signé en 2001, le contrat d'exploration des nodules dans la zone de Clarion-Clipperton concerne les nodules polymétalliques dans un secteur de 75 000 kilomètres carrés et court jusqu'en 2021. Les recherches effectuées sur la zone dans les années 1970 et 1980, puis pendant les 15 premières années du contrat, ont permis d'aboutir à une



Quelques exemples de nodules polymétalliques rapportés de l'océan profond. Une telle concrétion contient typiquement 25 % de son poids en manganèse et 3 % en cobalt, en cuivre et en nickel.

première estimation de la ressource, ainsi qu'à une meilleure connaissance de l'écosystème benthique. Les recherches se concentrent aujourd'hui sur les impacts qu'aurait une exploitation, notamment sur la vie marine profonde.

Signé en 2014, le contrat d'exploration des sulfures a été signé pour 15 ans. Il vise à explorer les sulfures polymétalliques d'une zone de la dorsale médioatlantique localisée entre 21° N et 26° N, par une profondeur moyenne de 3 400 mètres. Les travaux d'exploration menés ont pour objectifs l'évaluation des minéralisations, la recherche de sites hydrothermaux, l'évaluation de la biodiversité et des facteurs environnementaux.

Une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales profondes a été menée

Pour compléter cet appui à la puissance publique, l'Ifremer explore aussi des grands fonds, y mène des recherches sur la formation des ressources minérales et développe des technologies de reconnaissance, d'observation et d'intervention sous-marine à plusieurs échelles. Avec le CNRS, il a aussi réalisé une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploration et

de l'exploitation des ressources minérales profondes (*voir la bibliographie ci-contre*). L'institut a par ailleurs participé à un projet de recherche européen intitulé «Aspects écologique de l'activité minière en mer profonde» (Ecological aspects of deep-sea mining), qui visait à évaluer les impacts à long terme d'une exploitation des nodules polymétalliques sur l'environnement profond. La suite de cette action pilote s'articulera autour du suivi environnemental du test d'un prototype de collecteur de nodules prévu par le contractant belge GSR-Deme en 2019 dans la CCFZ.

Afin de mieux comprendre les organismes vivants autour des sources hydrothermales, leur cycle de vie, leur capacité de dispersion, etc., l'Ifremer pilote aussi un projet de recherche en collaboration avec l'université Pierre-et-Marie-Curie, le Muséum national d'histoire naturelle et l'Institut océanographique méditerranéen. Deux campagnes scientifiques ont déjà été réalisées en 2014 et 2018 (*Bicose 1 & 2*) sur le site du permis sulfures.

Enfin, en collaboration avec le CNRS et dans le cadre de l'infrastructure européenne Emso-Eric, l'Ifremer pilote le fonctionnement d'un observatoire du fond marin au sud des Açores sur le champ hydrothermal Lucky Strike. Cet observatoire est opéré depuis 2010 et vise à acquérir des séries temporelles de données sur les processus hydrothermaux, tectoniques, volcaniques et les écosystèmes d'un site hydrothermal actif de la dorsale médioatlantique.

**PIERRE-MARIE SARRADIN
ET SÉBASTIEN YBERT**
Ifremer

> entreprises qui extraient le minerai de nickel sont en train d'épuiser les gisements faciles d'accès, et se tournent vers des gisements dont l'exploitation exige plus d'énergie et davantage de traitements chimiques, et qui aura donc un plus fort impact environnemental.

L'impact des usines exploitant les nodules doit aussi être considéré. Si un nodule ne renferme que 30% de métaux intéressants, le reste constitue du déchet, généralement sous forme de boue. Aujourd'hui, les usines de traitement des minerais renvoient ces boues dans la mine d'où elles ont été tirées. Mais on ne saura pas quoi faire de celles produites par l'exploitation de millions de nodules océaniques. D'un autre côté, l'extraction minière marine présente l'avantage de ne laisser sur place aucune infrastructure lorsqu'un navire d'extraction quitte une zone pour une autre. Il n'en va pas de même à terre, où d'anciennes installations minières encombrant partout le paysage...

Afin de diminuer les besoins en minerais et les impacts environnementaux associés, il est essentiel que la société développe à l'échelle planétaire un recyclage efficace des métaux. Pour autant, la récupération ne suffira pas à satisfaire la demande, qui est en augmentation constante. Il est aujourd'hui difficile de dire si, à quantité de minerai équivalente, l'exploitation du plancher océanique aura des conséquences environnementales plus graves que celles de l'extraction terrestre.

Bien entendu, la régulation des activités minières aura un effet sur ce bilan. L'AIFM ne dispose pas de navires pour inspecter les exploitations, de sorte qu'elle partage cette responsabilité avec les nations parrainant les entreprises minières. Elle ne peut que révoquer le permis d'un pays ou d'une entreprise, suspendre les opérations ou imposer une amende si elle parvient à la conclusion que les opérations minières menées dans une zone ne respectent pas les normes environnementales.

Quatorze des pays membres des Nations unies ont signé la CNUDM, mais ne l'ont pas ratifiée (dont les États-Unis), et 15 autres membres ne l'ont pas signée. Ces 29 États pourraient essayer d'exploiter les eaux internationales sans respecter les règles de l'AIFM, laquelle devrait alors s'en remettre à la diplomatie internationale pour régler le litige.

L'organisation a publié une ébauche de la réglementation qu'elle prévoit pour l'exploitation minière dans les eaux internationales. Les règles correspondantes visent à tout couvrir à terme, de l'émission d'un permis d'exploration et d'exploitation jusqu'aux mesures à prendre pour protéger l'environnement marin. L'AIFM prévoit l'entrée en application de ces règles d'ici à 2020. Quant à l'activité dans les usines terrestres de traitement des nodules, sa régulation relèvera des pays les accueillant.

Un autre aspect important de la problématique posée par l'émergence d'une industrie minière en mer est l'exploitation au sein des zones économiques exclusives des différents pays. Certains pays n'ont pas de mers profondes dans cette zone qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques (370 kilomètres) à partir de la côte. D'autres en ont beaucoup, en particulier les États insulaires du Pacifique. Certains pays, telle la République des Palaos, ont purement et simplement rejeté l'exploitation minière de leur plancher océanique. D'autres, tels les Tonga, les Kiribati et les Îles Cook, mettent une régulation en place et recherchent des partenaires industriels. Les Îles Cook ont par exemple signé un contrat avec la société américaine Ocean Minerals, qui accorde à l'entreprise la priorité quant à la prospection à la recherche de nodules cobaltifères de ses 23000 kilomètres carrés de zone économique exclusive.

L'EXPLOITATION MINIÈRE DES FONDS MARINS EST SUR LE POINT DE DEVENIR UNE RÉALITÉ

L'exploitation minière des grands fonds marins est ainsi sur le point de devenir une réalité. Étant donné son intérêt économique et stratégique croissant, certains États pourraient lancer une exploitation pilote dans les 5 à 10 prochaines années. Il est souhaitable dans cette perspective que toutes les parties concernées coopèrent, comme elles l'ont fait jusqu'à présent, les essais industriels à petite échelle se faisant conjointement aux indispensables recherches scientifiques.

De fait, une grande partie de ce que nous savons des écosystèmes et des ressources dans les zones économiques exclusives est le fruit d'études menées en conjonction avec les entreprises. Notre expédition de San Diego, par exemple, a été financée par le MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), l'institut Scripps d'océanographie en collaboration avec l'Autorité internationale des fonds marins, l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) et l'entreprise GSR. En 2019, le projet européen *JPI Oceans* effectuera une étude dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton en collaboration avec l'AIFM et GSR.

Certaines des directives et normes à appliquer dans l'exploitation commerciale pourraient être inspirées des règles relatives à des industries existantes, et d'autres créées. Si les différents acteurs en présence parviennent à collaborer, l'exploitation minière du plancher océanique sera une référence éthique, puisque, jusqu'à présent, la réglementation n'a été établie qu'après la mise en exploitation d'une ressource naturelle. Nous pouvons cette fois réfléchir et réguler avant d'exploiter à tort et à travers. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Dymont et al. (coord.), **Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes**, Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS-Ifremer, 2014 (téléchargeable sur : www.cnrs.fr/fr/pdf/inee/SyntheseESCO/index.html#/1/).

Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule Province : Predicting and managing the impacts of deep seabed mining, Étude technique de l'AIFM n°3, AIFM, 2008.

Site de l'AIFM :
www.isa.org.jm

Expérience Plumex de l'institut Scripps d'océanographie :
www.mod.ucsd.edu/plumex

