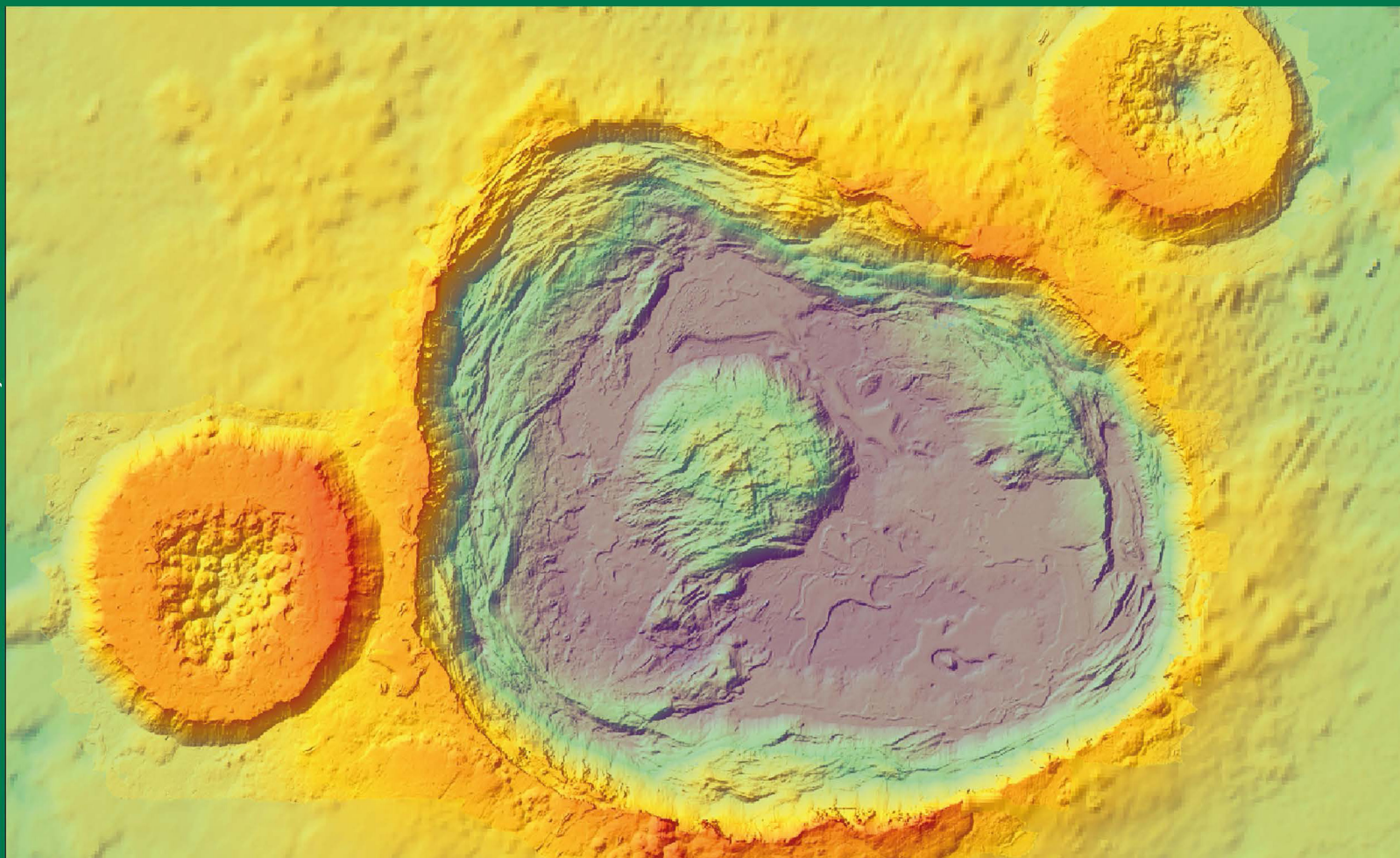


RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, *Journal des mines* n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Les minerais sous-marins : protéger les écosystèmes, exploiter les ressources

Hors dossier : Bilan énergétique de la France pour 2015

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom

N° 85
JANVIER 2017

Les minerais sous-marins : protéger les écosystèmes, exploiter les ressources

03

Avant-Propos
François JACQ

Les ressources minérales marines et leur contexte économique

05

Les mines terrestres, les ressources minérales des fonds marins... et notre soif de matières premières
François BERSANI

09

Minéralisations hydrothermales : les enjeux scientifiques de leur exploration
Yves FOUQUET

14

Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources
Sven PETERSEN, Mark HANNINGTON and Anne KRÄTSCHHELL

19

Enjeux économiques : quel est le potentiel des ressources minérales marines ?
Christophe-Alexandre PAILLARD

24

Les défis de l'exploitation minière en eau profonde : les cadres européen et global
Gwenole COZIGOU

Le défi de la protection des écosystèmes

30

Les impacts environnementaux de l'exploitation minière des fonds marins : un état des lieux des connaissances
Pierre-Marie SARRADIN, Jozée SARRAZIN et François H. LALLIER

35

Ressources minérales, risques environnementaux et stratégies de gestion de la biodiversité : l'exemple des zones à nodules du Pacifique Nord-est
Lénaïck MENOT

40

« Pourquoi pas les abysses ? » – Le projet de recherche de l'Ifremer pour mieux connaître la biodiversité des fonds marins
Sophie ARNAUD-HAOND et Florence PRADILLON

43

Addressing the Financial Consequences of Unknown Environmental Impacts in Deep-Sea Mining
Sarah P. HOYT, Linwood H. PENDLETON, Olivier THÉBAUD and Cindy Lee VAN DOVER

49

Les études d'impact de l'exploitation minière des grands fonds marins : une étape nécessaire, mais encore difficile
Jean-Damien BERGERON, Ronan LAUNAY et Jean-Marc SORNIN

Un cadre et des outils pour une exploitation durable

55

La législation internationale encadrant l'accès aux ressources minérales marines
Élie JARMACHE

62

EXTRAPLAC : les enjeux, pour la France, de son plateau continental
Walter R. ROEST

67

Le Secrétaire général de la Mer, acteur de la politique de recherche dans les grands fonds marins
Vincent BOUVIER

71

Quels sont aujourd'hui les atouts de la filière française de prospection et d'exploitation minières des grands fonds marins ?
Francis VALLAT

75

Un état de l'art de l'exploitation minière sous-marine
Julien DENÈGRE

HORS DOSSIER

81

Le bilan énergétique de la France pour 2015
Sous-direction des statistiques de l'énergie, CGDD, MEEM

104 Traductions des résumés

111 Biographies des auteurs

Dossier coordonné par François JACQ

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783
Série trimestrielle • n°85 - Janvier 2017

Rédaction

Conseil général de l'Economie, de l'Industrie,
de l'Energie et des Technologies, Ministère de
l'Economie et des Finances
120, rue de Bercy - Télédock 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Delphine Mantiene
Secrétaire général adjoint

Carine Chauvin
Assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier
Correcteur

Myriam Michaux
Webmestre

Membres du Comité d'Orientation

Le Comité d'Orientation est composé des membres
du Comité de Rédaction et des personnes dont les
noms suivent :

Jacques Brégeon
Collège des hautes études de l'environnement
et du développement durable, ECP, INA P-G, SCP-EAP

Christian Brodhag
Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne

Xavier Cuny
Professeur honoraire Cnam, Conseil supérieur
de la prévention des risques professionnels

William Dab
Cnam, Professeur

Thierry Chambolle
Président de la Commission « Environnement »
de l'Académie des technologies

Hervé Guyomard
CNRA Rennes

Vincent Lafèche
Président du BRGM

Yves le Bars
Cemagref

Patrick Legrand
Inra, Vice-président de la Commission nationale du débat
public

Benoît Lesaffre
CIRAD

Geneviève Massard-Guilbaud
Ecole des Hautes études en sciences sociales,
Directrice d'études

Marc Mertureux
Directeur général de la Prévention des risques (MEEN)

Alain Rousse
Président de l'AFITE

Virginie Schwartz
Directrice de l'Energie, MEDDE

Membres du Comité de Rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction
Ingénieur général des Mines

Pierre Amouyel
Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourrelier
Ingénieur général des Mines honoraire, Association
française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie
Haut fonctionnaire de développement durable

Dominique Dron
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Pascal Dupuis
Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique,
Direction générale de l'énergie et du climat, MEDDE

Jérôme Goellner
Chef du service des risques technologiques,
Direction générale de la prévention des risques, MEDDE

Jean-Luc Laurent
Directeur général du Laboratoire national de métrologie et
d'essais (LNE)

Richard Lavergne
Conseil général de l'Économie
Ministère de l'Économie et des Finances

Philippe Saint Raymond
Ingénieur général des Mines honoraire

Bruno Sauvalle
Ingénieur en chef des Mines, Mines ParisTech

Jacques Serris
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Claire Tutenuit
Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

François Valérian
Rédacteur en chef des Annales des Mines

Photo de couverture :
Cartographie en 3D de la caldera centrale du Kulolasi, dé-
couvert en 2010 sur la dorsale Alofi, au sud-est de Futuna.
TOM des îles Wallis-et-Futuna, Polynésie.
Photo © IFREMER/ Campagne Futuna 1-2010

Iconographie
Christine de Coninck

Abonnements et ventes
COM & COM
Bâtiment Copernic - 20 Avenue Edouard Herriot
92350 LE PLESSIS ROBINSON
Alain Bruel
Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32
a.bruel@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer
Impression : Printcorp

Editeur Délégué :
FFE - 15 rue des Sablons 75116 PARIS - www.ffe.fr
Fabrication : Charlotte Crestani
charlotte.crestani@belvederecom.fr - 01 53 36 20 46

Régie publicitaire : Belvédère Com
Directeur de la publicité : Bruno Slama - 01 40 09 66 17
bruno.slama@belvederecom.fr

Les ressources minérales marines : une perspective réelle, mais encore lointaine

Par François JACQ
Ifremer

Les océans, nouvel Eldorado ? Que penser de cette assertion souvent entendue au cours des dernières années ? Les océans représentent certainement une nouvelle frontière, que ce soit par les services écosystémiques qu'ils offrent ou, plus simplement, par les ressources qu'ils recèlent. Est-il besoin de rappeler le rôle central de l'océan dans la régulation du climat avec le stockage d'une part substantielle de la chaleur ou du gaz carbonique ? Plus connu est le rôle des océans de pourvoyeur de ressources alimentaires, avec la pêche et sa production mondiale annuelle d'environ 80 millions de tonnes. À cela viennent s'ajouter les ressources pétrolières et gazières, aujourd'hui découvertes et exploitées dans des contextes de plus en plus ardues, en termes de profondeur.

Mais qu'en est-il des ressources minérales marines ? Ces dernières sont, pour certaines d'entre elles, connues de longue date. Les océans recèlent des minerais en quantités substantielles. On a coutume de les partager entre trois grandes catégories : les nodules polymétalliques, les encroûtements cobaltifères et les amas sulfurés ; chacune d'elles comportant une grande diversité de métaux d'intérêt économique.

Depuis les années 1960, ces ressources ont suscité l'intérêt des États et des firmes minières, quoique de manière sporadique. Historiquement, les nodules polymétalliques comptèrent parmi les premiers sujets d'attention, avec les plaines abyssales de la zone de Clarion-Clipperton. Les amas sulfurés ont été appréhendés plus récemment et coïncident avec l'exploration des dorsales océaniques et l'étude des phénomènes complexes qui les caractérisent, comme la présence de sources hydrothermales au fond de l'océan.

Cette exploration est allée au rythme du développement des outils facilitant l'approche d'un milieu moins aisément maîtrisable que le continent. Pour évident qu'il soit, le constat de la difficulté d'exploration et d'exploitation des milieux marins doit demeurer en mémoire.

Les années 1960 et 1970 ont connu une mobilisation dans le domaine des nodules polymétalliques. Pour la France, cet intérêt s'inscrivait dans la perspective gaullienne de la maîtrise des ressources et des milieux qui nous entourent. Cela coïncida avec la création du CNEXO, le dernier à avoir émergé des grands organismes dédiés à l'exploration des océans et aux technologies nécessaires à l'exploitation des ressources minières marines. Les travaux alors menés furent substantiels, puisqu'ils comprirent tant des explorations *in situ* et la collecte de nodules que des essais de métallurgie. Mais cet enthousiasme retomba dans les années 1980-1990, à mesure que l'on identifiait les difficultés soulevées par cette exploitation, mais surtout l'absence d'une rentabilité avérée de celle-ci. Certes, il existait des gisements potentiels, mais leur teneur ne les démarquait pas de ceux du monde terrestre. En revanche, leur difficulté d'accès les rendait peu prometteurs, tout au moins à court terme.

De même que l'évolution des prix du pétrole scanda (et scanda encore aujourd'hui) les vagues d'intérêt pour la maîtrise de l'énergie, les ressources minérales marines furent, elles aussi, l'objet de flux et de reflux, principalement liés à la perception d'une tension sur les métaux extraits de l'écorce terrestre et à l'évolution de leurs cours. Ainsi, au cours des années 2000, la croissance des pays émergents et l'usage toujours plus fort des métaux dans les industries de consommation courante firent ressurgir le souci de la maîtrise des ressources minérales marines, mais cette fois en disposant d'une connaissance scientifique bien supérieure des milieux marins et d'un potentiel technologique sensiblement plus développé.

On sait désormais de manière plus précise ce que représentent ces ressources, au moins en termes de typologie et de zones d'intérêt, sans que cela ait favorisé des campagnes systématiques de prospection. On connaît également la nature des principales technologies qui pourraient être employées. Pour autant, l'exploitation n'a pas réellement commencé à ce jour. Une seule entreprise semble s'être engagée dans l'exploitation, sans que des résultats clairs aient été fournis. Autre indice de cette prudence persistante : le renouvellement récent de toute une série de contrats accordés par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) n'a pas suscité chez les pays concernés un sentiment d'urgence manifeste quant au passage à une phase plus concrète dépassant celle de l'acquisition de connaissances.

Force est de reconnaître que des obstacles significatifs demeurent : quel cadre institutionnel mettre en place ? Quel modèle économique adopter, à l'heure où les cours des minerais ne permettent guère d'assurer une rentabilité ? Quel volume d'investissements consacrer à des aventures industrielles et technologiques complexes (par plusieurs milliers de mètres de fond) ? Quelle réglementation environnementale associée à l'exploitation ?

Autant de questions qui demeurent à ce jour sans réponse complète.

Dès lors, pourquoi s'intéresser aux ressources minérales marines ?

Est-ce un faux sujet, que l'on pourrait remiser pour quelques années encore, malgré la fascination qu'il suscite ? Probablement pas.

Tout d'abord, la ressource est réelle. Mieux vaut la connaître, et ce dès à présent.

Ensuite, la complexité de l'environnement associé demandera du temps pour que finisse par émerger un cadre d'exploitation durable. Autant s'y préparer.

Enfin, on a là une opportunité de renverser les processus industriels usuels qui consistent bien souvent à avancer d'abord, puis à se soucier de l'impact après coup.

On connaît si peu de choses, aujourd'hui, sur l'environnement marin et sur les conséquences de son exploitation éventuelle qu'il semble urgent de comprendre et d'appréhender cet environnement, sa biodiversité, ses écosystèmes et les effets potentiels de son exploitation minière.

Ce volet majeur, qui peut être mené dès à présent, nous permettra d'être mieux armés pour aborder avec sérénité une exploitation rendue possible, voire nécessaire, par l'environnement économique.

Le présent numéro de la série *Responsabilité et Environnement* des *Annales des Mines* entend apporter un éclairage sur les diverses facettes de ce dossier : la connaissance des mécanismes et des minerais, les outils disponibles, l'émergence des cadres juridiques nationaux et internationaux permettant d'appréhender la gestion des ressources minérales, les politiques nationales, les stratégies de développement industriel, la compréhension des écosystèmes et des impacts éventuels sur ces derniers d'une exploitation minière.

Le lecteur y trouvera, nous l'espérons, des clés de lecture pour approcher un sujet qui s'inscrit à un horizon de plusieurs décennies.

Les mines terrestres, les ressources minérales des fonds marins... et notre soif de matières premières

Par François BERSANI
Ingénieur général des Mines

Si, à la différence des hydrocarbures, et sauf pour certaines substances, et encore à proximité des côtes, les ressources minérales des fonds marins n'ont pas encore été exploitées et sont loin d'être toutes connues, leur intérêt est aujourd'hui certain. Au fur et à mesure des progrès technologiques en cours, elles pourraient contribuer à l'approvisionnement du monde en matières premières dans un avenir relativement proche, sous réserve des précautions à prendre pour assurer la protection de l'environnement... et de l'évolution des cours.

Depuis les premiers âges de l'humanité, la consommation de matières premières minérales (ou organiques, plus récemment) n'a fait que croître. De multiples études, de nombreux ouvrages – à commencer des articles des *Annales des Mines* – permettent de s'en persuader et d'apprécier l'évolution récente et prochaine. Et jusqu'à présent, l'exploitation de la nature, à commencer par celle des terres émergées, a permis de répondre à nos besoins. Jules Verne, dans son roman, *Vingt mille lieues sous les mers*, fait dire au Capitaine Nemo : « La mer est le vaste réservoir de la nature. C'est par la mer que le globe a pour ainsi dire commencé, et qui sait s'il ne finira pas par elle ». Nous allons voir combien cette formule, apparue dans la période 1865-1870, était prophétique, sachant en outre qu'il est évidemment utile (« économiquement parlant »), voire nécessaire pour répondre aux besoins futurs, d'éviter le gaspillage des ressources grâce aux économies de matières, aux substitutions et au recyclage...

Au-delà des « pierres » (on dirait aujourd'hui des « matériaux de carrière »), l'exploitation minière a pris son essor après la découverte de « premiers » métaux à l'état natif et de leurs propriétés (tout particulièrement leur malléabilité permettant leur travail par martelage), il y a de cela plus de 8 000 ans, suivie par celle de la métallurgie, et notamment la fusion, il a 4 000 ans ; des découvertes qui ont permis de passer de l'âge de pierre à celui des métaux (le cuivre natif (ou Chalcolithique), puis le bronze, le fer...) à des dates variant d'ailleurs selon les régions du monde.

Pour ce qui concerne les métaux, l'exploitation minière a commencé à partir des affleurements, dans les « filons » ou les « veines » de minerais, puis s'est enfoncée de plus en plus profondément, avec le progrès des techniques d'exploitation, puis en procédant de plus en plus systématiquement à la recherche d'indices en surface permettant

de conjecturer la présence de minerais dans le tréfonds.

À la fin du XIX^e siècle, les exploitations terrestres les plus profondes atteignaient déjà 1 600 mètres (dans le « Pays du cuivre », dans l'État du Michigan). Ce sont aujourd'hui les mines d'or de l'Afrique du Sud qui sont les plus profondes (- 3 900 mètres), avec des projets encore plus profonds.

Les hydrocarbures (d'abord le pétrole, la « roche d'huile ») ont également été connus et exploités dès la plus haute Antiquité dans des affleurements tout d'abord, puis, progressivement, dans des gisements proches de la surface du sol, avant de s'enfoncer encore plus profondément : aujourd'hui à plus de 6 000 mètres de profondeur, pour l'extraction de gaz, d'ailleurs, en Mer du Nord sous juridiction britannique, un cas tout de même exceptionnel.

C'est dès la fin du XIX^e siècle que les hydrocarbures ont été exploités dans les fonds marins : d'abord des gisements se prolongeant sous la mer, à partir d'une jetée, sur la côte californienne, puis, au début du XX^e siècle, des gisements situés dans les marais de La Louisiane ou dans le lac Maracaïbo, au Venezuela, à partir de plates-formes (dans de faibles profondeurs d'eau), et plus tard dans le Golfe du Mexique, par des profondeurs d'eau croissantes, et, aujourd'hui, au large de nombreux pays et par des profondeurs d'eau pouvant atteindre 3 000 mètres : ainsi, cette année, un puits a été foré (par Total) au large de l'Uruguay, à plus de 100 milles marins de la côte, par 3 400 mètres sous le niveau de l'eau. Notons au passage que les entreprises pétrolières françaises ont très tôt participé au développement des activités pétrolières en mer et que diverses entreprises françaises, tant d'ingénierie que de construction ou de services, détiennent une part significative du marché mondial du « parapétrolier » qui est nécessaire à leur activité.

Cette évocation de l'histoire de la production des hydrocarbures permet de comprendre pourquoi, dans les années 1970, un certain nombre d'acteurs (États, organismes de recherche, compagnies minières...) ont commencé à s'intéresser véritablement aux ressources minérales des fonds marins, alors que le premier choc pétrolier venait d'avoir lieu et que les cours des matières premières s'envolaient et alors que le fameux rapport du Club de Rome de 1972 « *Limits to growth* » (également appelé Rapport Meadows, et traduit chez nous par « Halte à la croissance ? ») faisait planer la perspective d'une pénurie de matières premières tant énergétiques que minérales.

Jusqu'à-là ces ressources n'étaient exploitées qu'à de faibles profondeurs d'eau, souvent dans le prolongement de gisements terrestres. On peut ainsi citer l'exploitation de sables aurifères (en Alaska), de charbon à partir d'îles (au Japon), d'étain (en Malaisie, en Indonésie et en Thaïlande), de graviers diamantifères (en Namibie et en République Sud-Africaine) et de fer (en France, à Diélette (dans la Manche !)).

On a également connaissance de gisements de phosphates en mer (le long de la côte sud-est des États-Unis, sur le plateau continental du Pérou-Chili, au large de la Namibie, de la Nouvelle-Zélande, de la Basse-Californie (au Mexique) et au large du delta du Congo). Mais aucun de ces gisements présents sous la mer n'est encore exploité, et ne le sera probablement pas tant que des réserves suffisantes existeront sur terre.

C'est au moment même où est évoquée une possible pénurie de matières premières minérales que la question de l'exploitation des nodules sous-marins polymétalliques devint d'actualité, alors même que leur découverte scientifique remonte aux années 1870 – grâce à la fameuse campagne océanographique du *HMS Challenger* – et que l'on en parlait déjà depuis le milieu du XX^e siècle. En effet, les études réalisées avaient montré que certains champs de nodules progressivement mis en évidence à de grandes profondeurs d'eau recelaient non seulement du manganèse et du fer, mais aussi d'autres métaux, avec des teneurs comparables voire supérieures à celles constatées dans des gisements terrestres (une teneur plus élevée en nickel par rapport à des gisements latéritiques, en cuivre par rapport à certains grands gisements de porphyre cuprifère, ou en cobalt, ainsi qu'en autres éléments particulièrement recherchés, mais à des teneurs faibles (comme le molybdène, le tellure, le lithium, les terres rares...)).

Selon certaines évaluations communément admises aujourd'hui, les nodules de la zone la plus prometteuse du Pacifique recèleraient trois fois plus de cobalt et plus de manganèse ou de nickel que la totalité des ressources terrestres identifiées et évaluées.

De nombreuses recherches furent ainsi engagées par des organismes scientifiques et des entreprises minières, souvent grâce à des soutiens financiers publics importants, pour non seulement comprendre les mécanismes de formation de ces nodules, mais aussi mieux connaître les zones prometteuses et mieux évaluer leur intérêt, et ce tout en cherchant à mettre au point des techniques d'exploitation portant, d'une part, sur l'extraction ou plutôt la collecte des nodules au fond de la mer et leur remontée

à la surface et, d'autre part, sur leur minéralurgie, tout en tenant compte des contraintes de protection de la nature qui commençaient à devenir une très forte préoccupation partout dans le monde... et ce d'autant plus que le milieu marin restait largement inconnu.

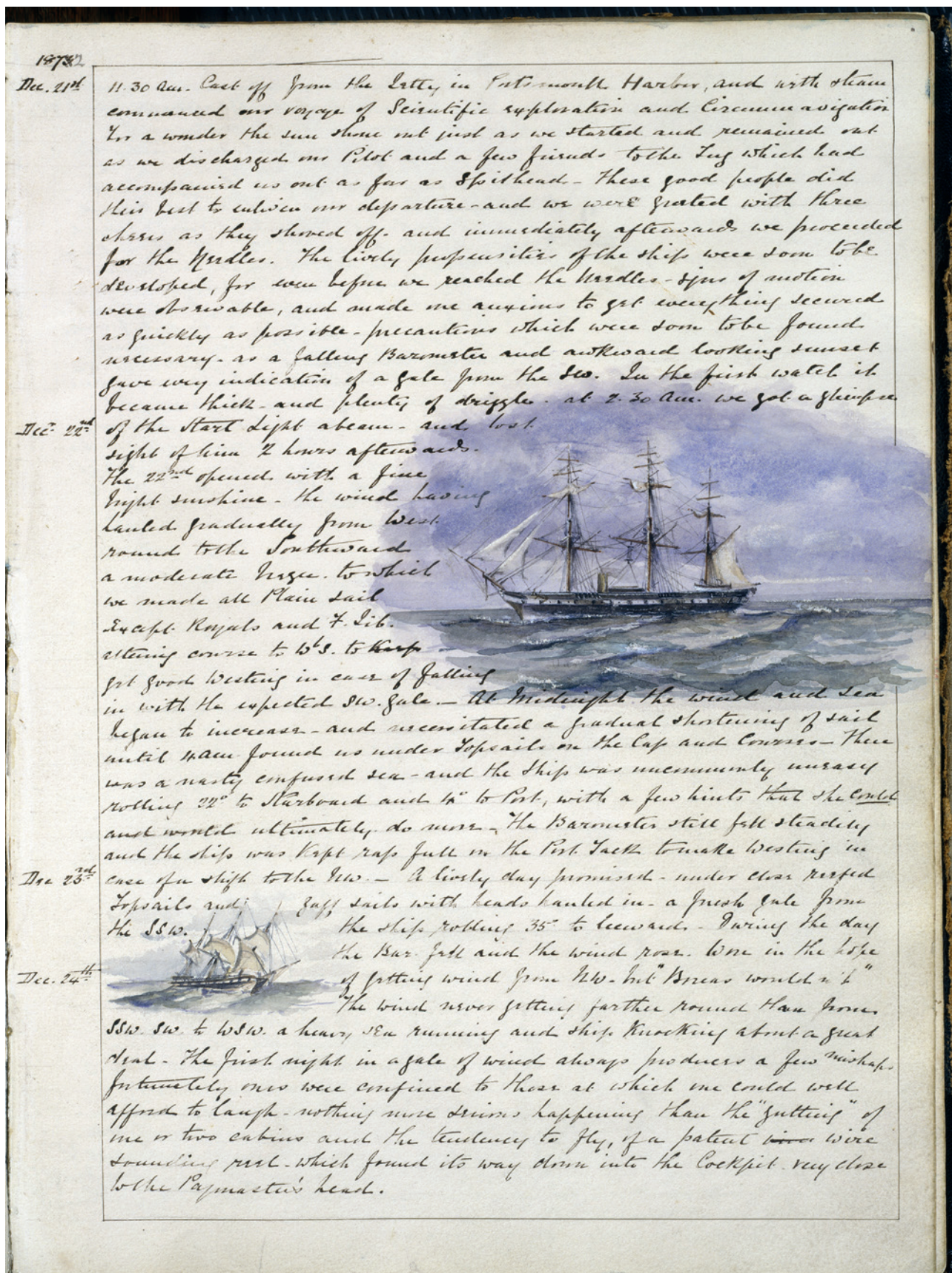
Le défi apparaissait alors gigantesque sur le plan technique, car ces nodules se trouvaient souvent à de grandes profondeurs d'eau (entre 3 000 et 5 000 mètres de fond), alors que les compagnies pétrolières, à cette époque, ne s'aventuraient qu'avec prudence, à des profondeurs de 500 mètres...

Pour la France, ce fut un groupement appelé Afernod (Association française pour l'étude et la recherche de nodules océaniques) et constitué autour du CNEXO (devenu depuis l'Ifremer), avec la Société Le Nickel (SLN) tout d'abord, puis, à partir de 1974, avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et les Chantiers France-Dunkerque, qui entama des travaux de recherche portant à la fois sur les gisements et sur les technologies utilisables. Ce dernier aspect fut ensuite traité jusqu'en 1988 par le groupement Gemonod, formé par l'Ifremer, le CEA et sa filiale Technicatome. Les dépenses effectuées jusqu'en 1992 ont été de plus de 130 millions d'euros, avant que les divers partenaires ne se retirent progressivement et que l'effort ne soit plus supporté que par le seul Ifremer...

C'est au début des années 1970, également, (et ce n'est bien évidemment pas une pure coïncidence) que le droit de la mer a progressé : il fallait assurer aux opérateurs tant publics que privés un cadre juridique que les conventions de Genève de 1958, dont celle portant sur le plateau continental, n'avaient pas suffisamment défini, tout en intégrant de nouveaux concepts, comme le patrimoine commun de l'humanité ou encore les zones économiques exclusives (ZEE), dans lesquelles les États côtiers peuvent exercer des droits souverains ; des concepts nés soit d'avancées jusque-là quelque peu unilatérales, soit de revendications émanant de pays en développement.

C'est après de laborieuses négociations que la Convention dite de Montego Bay vit le jour, le 10 décembre 1982. Toutefois, sa mise en application (à titre provisoire, dans un premier temps) n'est intervenue que le 16 novembre 1994, après diverses renégociations de certaines de ses dispositions à la demande de pays industrialisés (notamment des États-Unis, qui ne l'ont pas encore ratifiée...) ayant abouti à un accord, à New York, le 28 juillet 1993. Pour la France, son entrée en vigueur est intervenue le 11 mai 1996 (loi n°95-1311 du 21 décembre 1995 et décret n°96-774 du 30 août 1996).

En application de cette convention, l'Ifremer se vit d'abord reconnaître (le 17 décembre 1997), pour le compte du consortium Afernod, un statut d'« investisseur-pionnier ». Après l'adoption, le 13 juillet 2000, par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) de dispositions particulières pour l'exploration des nodules, l'Ifremer obtint de cette Autorité à compter du 20 juin 2001, et pour une durée de quinze ans, un contrat pour procéder à l'exploration d'une partie (sur laquelle ses travaux avaient porté) de la zone Clarion-Clipperton, dans l'Océan Pacifique. L'AIFM vient, lors de sa dernière session de juillet 2016, d'accorder une prorogation dudit contrat pour une période de cinq ans, en



Première page du journal de bord de la Corvette HMS Challenger, journal tenu par l'Amiral Pelham Aldrich (1844-1930) lors de sa participation à la campagne exploratoire en Arctique de 1872 à 1876.

« La découverte scientifique des nodules polymétalliques remontent aux années 1870 grâce à la fameuse campagne océanographique du HMS Challenger. »

notant, d'ailleurs, que « les circonstances économiques ne justifiaient pas le passage à une phase d'exploitation ».

Les autres intervenants dans la zone relevant de l'AIFM sont, et ce, depuis l'origine pour bon nombre d'entre eux (mais d'autres ont été acceptés tout récemment encore par l'AIFM) : l'Allemagne, la Belgique, le Royaume-Uni, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Russie, les Îles Cook, Kiribati, Nauru, Singapour, Tonga et un consortium réunissant la Bulgarie, la Pologne, la République tchèque, la Slovaquie, mais aussi Cuba et la Russie (soit directement, soit par l'intermédiaire d'organismes publics de recherche, ou simplement par un parrainage d'opérateurs privés). Des entreprises minières nord-américaines sont également présentes, mais elles le sont aujourd'hui seulement au travers de filiales étrangères.

On voit clairement que les grands pays, tant producteurs que consommateurs, s'intéressent de près aux perspectives prometteuses que paraissent offrir ces ressources, même si, aujourd'hui, aucune exploitation ne paraît pouvoir être engagée à un terme rapproché, et ce parce que les technologies ne sont pas encore disponibles (même si elles ne semblent pas hors de portée) et aussi parce que les contraintes environnementales ne sont pas encore toutes évaluées (en lien, d'ailleurs, avec la question des technologies à mettre en œuvre, comme l'a encore montré une « expertise scientifique collective » conduite en France en 2014 sous l'égide du CNRS et de l'Ifremer...) et, enfin, comme le relève l'AIFM, parce que les « circonstances économiques ne justifient pas le passage à une phase d'exploitation »...

Cependant, si les nodules polymétalliques sont connus depuis la fin du XIX^e siècle et si l'on dispose de travaux ayant porté depuis plus de quarante ans maintenant sur leur exploitation, ils ne constituent pas les seules ressources minérales que renferment les fonds marins.

C'est ainsi que l'on a découvert, lors d'une campagne océanographique menée en Mer Rouge en 1948, l'existence sur les fonds marins de gisements de sulfures métalliques liés à des systèmes hydrothermaux, dont la connaissance a été approfondie dans les années 1960, notamment pour ce qui concerne les seuls organismes français grâce à des travaux tant du BRGM que du CNEXO, à l'époque. Puis de tels dépôts (appelés « cheminées hydrothermales » ou « fumeurs ») ont été repérés à la fin des années 1970 à près de 3 000 mètres de profondeur, sur la dorsale est-Pacifique. Les travaux scientifiques ont alors été développés activement compte tenu de l'intérêt de tels gisements tant de par leurs teneurs en divers métaux (des teneurs particulières à chaque gîte...) que de par leur présumée relative facilité d'exploitation, au regard notamment de celle des gisements de nodules (la profondeur d'eau étant *a priori* plus faible) : ils sont en effet situés le long des 60 000 kilomètres de dorsales océaniques et au niveau de sites volcaniques sous-marins se situant entre 800 et parfois 5 000 mètres de profondeur.

En particulier, divers gisements ont pu être identifiés dans des ZEE, et pas seulement dans la zone relevant de l'AIFM. Plusieurs entreprises minières se sont impliquées activement, au point que non seulement de nombreux titres de recherche ont été accordés, mais encore qu'un

titre d'exploitation a déjà été attribué en janvier 2011 à l'une d'elles, Nautilus, au large de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, pour extraire de l'or, de l'argent, du cuivre et du zinc (projet Solwara) : selon les prévisions actuelles, l'exploitation de ce gisement devrait commencer en 2019... et des entreprises, comme Technip, participent à la fourniture des équipements nécessaires.

En France, des travaux de reconnaissance ont été engagés en 2010/2011 dans la ZEE au large de Wallis-et-Futuna, réunissant l'Ifremer, Eramet et Technip. Eramet a déposé une demande de permis de recherches en 2013, ce qui suppose que le cadre juridique soit clarifié.

Devant l'intérêt suscité par ces gisements, l'AIFM a défini, dès le 7 mai 2010, les règles applicables à l'exploration de tels gisements. Six contrats ont déjà été accordés à la Chine, à la Russie, à la Corée du Sud, à l'Inde, à l'Allemagne et à la France (pour l'Ifremer : un contrat obtenu dès juillet 2012 et signé en novembre 2014, et portant sur l'exploration de la dorsale médio-atlantique).

Enfin, d'autres formations géologiques découvertes dans les fonds marins suscitent également un grand intérêt, bien qu'elles présentent des difficultés d'exploitation *a priori* plus importantes : il s'agit des encroûtements cobaltifères, riches en fer et en manganèse. Ils peuvent également renfermer du bismuth, du molybdène, du niobium, du platine, des terres rares, du titane, du tellure, du zirconium... Ce sont des « croûtes », dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres et qui sont localisées au niveau de monts sous-marins et d'élévations intra-plaques.

De nombreux pays s'intéressent à ces gîtes, qui restent encore assez mal connus, même dans les ZEE. Pour la France, une zone particulièrement intéressante serait la ZEE de la Polynésie. Pour sa part, l'AIFM a établi, le 27 juillet 2012, les règles applicables à leur exploration et a déjà attribué quatre contrats (à la Russie, au Japon, à la Chine et au Brésil).

Parvenus au terme de ce propos, nous avons vu que le fond des océans (avant même d'envisager, peut-être à l'avenir, leur tréfonds) recèle déjà, en l'état de nos médiocres connaissances, des ressources minérales importantes, capables de répondre significativement aux besoins futurs. Leur exploitation dépend des solutions techniques à mettre au point, de l'évolution des cours des matières premières... et de préoccupations stratégiques, les consommateurs ne voulant pas tomber sous la coupe de producteurs « dominants »... Comme le disait Ambrose Bierce, dans son Dictionnaire du Diable : « *Océan : masse d'eau occupant à peu près les deux tiers d'un monde destiné à l'homme – lequel est dépourvu de branchies* ». Ou bien encore Jules Verne : « *Ah ! Monsieur ! Vivez, vivez au sein des mers ! Là seulement est l'indépendance !* ».

Et l'on peut se féliciter que les organismes scientifiques et les entreprises français, avec ou sans l'appui de l'État selon les périodes, aient (heureusement) engagé très tôt des efforts qui les mettent aujourd'hui en bonne position au niveau mondial et en situation d'établir les coopérations, notamment européennes, qui paraîtraient utiles (voire indispensables) pour contribuer à l'approvisionnement de notre pays en métaux « stratégiques », par exemple.

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

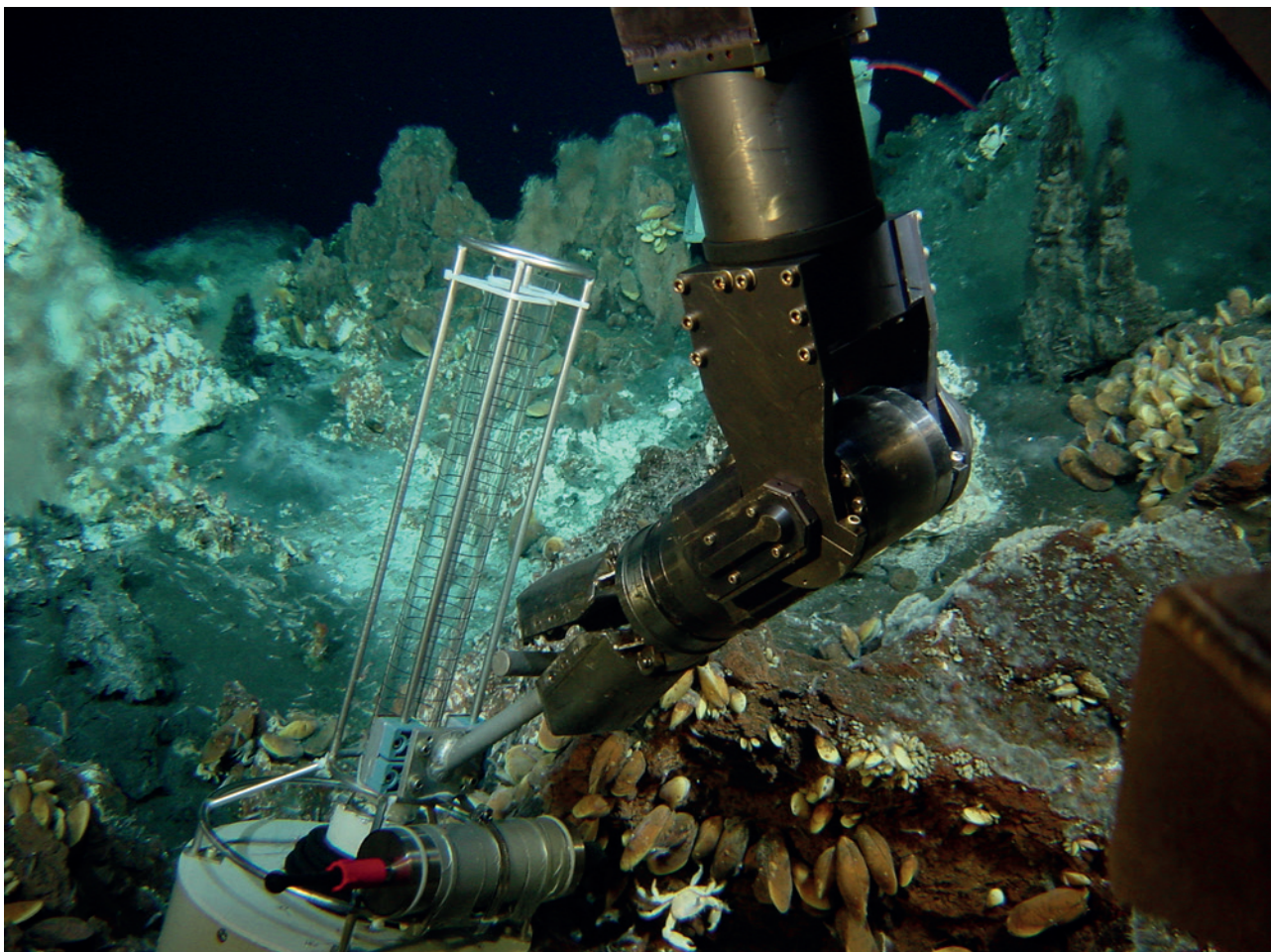


Photo © Ifremer-Campagne PHARE

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 métabarcodes 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.

Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources

By Sven PETERSEN
Mark HANNINGTON
and Anne KRÄTSCHELL

GEOMAR, Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (Germany)

Manganese nodules, Co-rich crusts, and Seafloor massive Sulfides (SMS) are commonly seen as possible future resources that could potentially add to the global raw materials supply. At present, a proper global assessment of these resources is not possible due to a severe lack of information regarding their size, global distribution, and composition. The sizes of the most prospective areas that need to be explored for a global resource assessment are vast. Future deep-sea minerals exploration has to provide higher-resolution data and at the same time needs to cover large areas of the seafloor in a fast and cost-efficient manner. While nodules and crusts are 2-dimensional occurrences and an assessment of their distribution at the seafloor itself seems sufficient, seafloor massive sulfides are 3-dimensional sites and a proper resource assessment will always require drilling. Here the development of methods to image the subseafloor and to recognize economically interesting sites prior to drilling is of importance.

Manganese nodules

Manganese nodules occur widely on the vast, sediment-covered abyssal plains at depths of about 3,000–6,500 m. They are mineral concretions made up largely of manganese and iron that form around a hard nucleus and incorporate metals from the sediment and seawater. As manganese nodules form directly on the seafloor, these deposits can be regarded as a 2-dimensional resource. The greatest concentrations of metal-rich nodules occur in the Clarion-Clipperton Zone (CCZ), which extends from Hawaii to Mexico. Nodules are also concentrated in the Peru Basin, near the Cook Islands, and at abyssal depths in the Indian and Atlantic Oceans. The abundance of nodules and, therefore, the quantities of associated metals are moderately well known for the CCZ, the Central Indian Ocean Basin and the Cook Islands EEZ, but poorly known for other areas of the global ocean (HEIN & *al.*, 2013). Nevertheless, over the past 15 years 17 contracts for manganese nodule exploration have been approved by the International Seabed Authority, of which 16 have been signed and 1 is pending signature. Most (16) are located in the CCZ, covering 1.2 million km², and one is in the Central Indian Ocean (77,000 km²).

On a local scale, the nodule abundance varies from 0 to up to 30 kg/m² within a few hundreds of meters depen-

ding on parameters such as overall sedimentation rate, burial of organic material, local bathymetry, near-bottom currents, and nodule size. Common approaches to map manganese nodule occurrences in the deep-sea rest on vessel-based hydro-acoustic backscatter and deep-towed side scan sonar data-sets. These techniques can monitor large regions but lack a resolution sufficiently high to identify variations in nodule density, the most important parameter for controlling the resource. Ground truthing is commonly done visually by towed video sleds and by point sampling using box corer or similar devices. Both methods only provide limited spatial coverage and might not be representative for larger areas. Also, recent photo surveys have shown that decimetric-sized blocks of volcanic rocks occur in between manganese nodules in certain areas of the CCZ (PEUKERT, 2016), and such blocks may hinder mining activities. Such blocks are not recognizable in ship-based or deep-towed survey data. This is just one example why we need to explore large areas of the seafloor with higher resolution. The need to also better understand the areal distribution of faunal communities makes photo surveys the tool of choice. Since submersibles and ROVs are slow and areal coverage is limited, only AUV photo surveys seem to be able to provide such large scale coverage. There is, however, a conundrum as

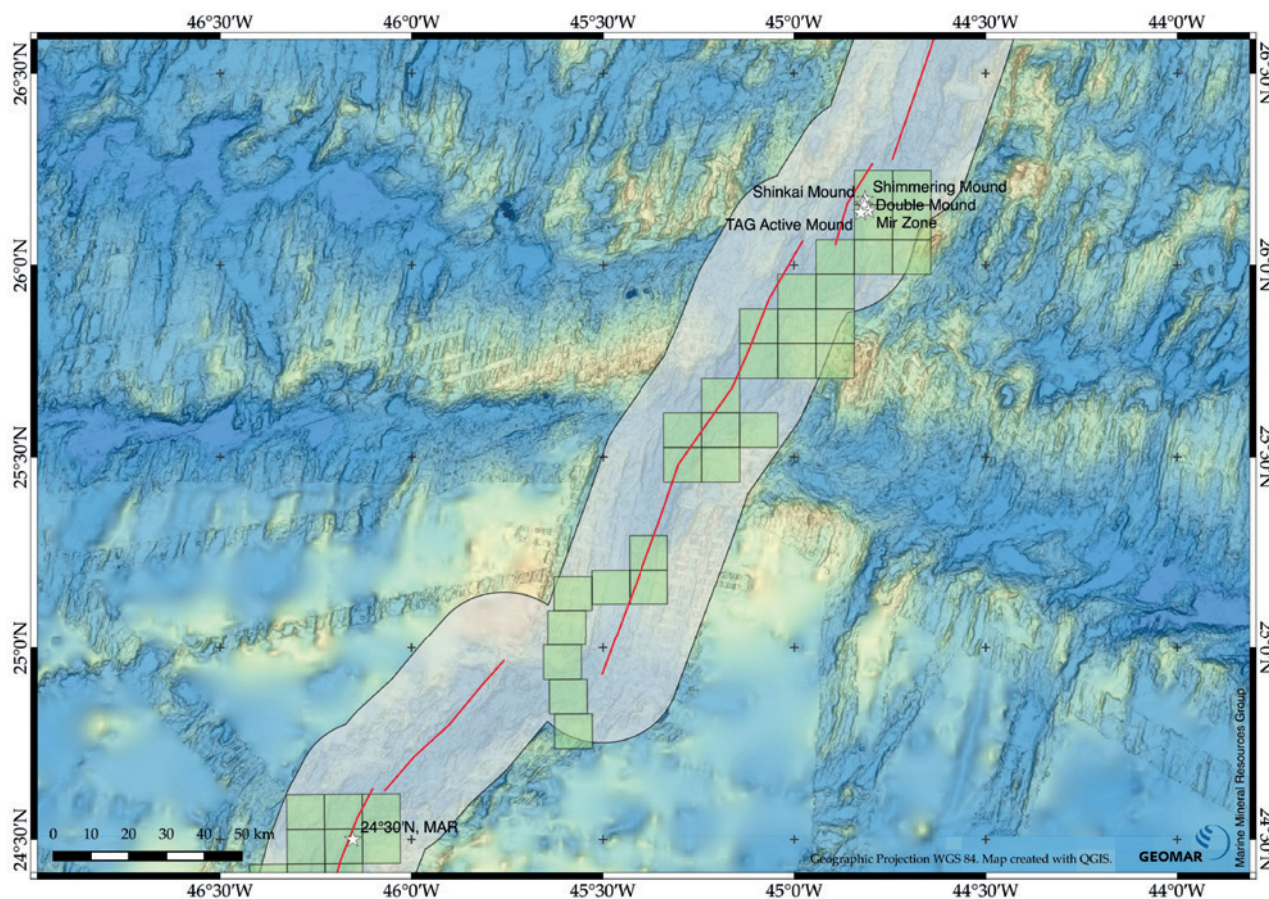


Figure 1: Regional bathymetry of the central Mid-Atlantic Ridge between 24°30' and 26°30' showing the location of the French exploration license blocks for massive sulfides in the area (green squares). Each square is 100 km² in size. The spreading axis is indicated by the red line. The white area shows the increase in the area that could be prospective for massive sulfides assuming a corridor of only 20 km on both sides of the spreading axis. White stars indicate the location of known active and inactive massive sulfide occurrences. Background bathymetry compiled from MGDS using GMRT v3.2 (RYAN & al., 2009).

current AUVs can either fly at a low speed (ca. 1kn) very close to the seafloor (1-3 m) providing high-resolution images (mm/pixel) with a limited areal coverage or they map large areas at higher speed (2.5 – 3.5 kn) and at higher altitudes (5-10 m) with a more limited image resolution (cm/pixel). The latter will only allow the recognition of megafauna, but is sufficient to calculate nodule abundance and will hence be useful for a proper resource assessment. Recent AUV surveys in the CCZ and the Peru Basin used a newly developed camera and LED lighting system developed in order to fly at higher altitudes and at greater speed (KWASNITSCHKA & al., 2016). During these surveys several 100,000 images were obtained per cruise (MARTINEZ-ARBIZU & al., 2015; GREINERT & al., 2015) and were then mosaicked using newly developed image analyses software needed to handle large amounts of images (SCHOENING & al., 2013). Overall, this setup, flying at a speed of ca. 3.5 kn, was able to cover 25,000-160,000 m² per hour, much more than previous surveys (KWASNITSCHKA & al., 2016).

With a combination of several methods from regional mapping using hydroacoustic vessel-based backscatter to local exploration using deep-towed side-scan sonar, automated image analysis of AUV-based photo surveys, and

seafloor sampling, it will be possible to produce predictive maps of prospective nodule areas. In order to provide a meaningful global resource estimate, however, exploration needs to cover vast areas of the ocean floor. A recent estimate of the global prospective areas for manganese nodule formation in sediment deep-sea basins indicates that 38 million km² would need to be explored (PETERSEN & al., 2016). This is based on water depth, sediment thickness, sedimentation rate, topography, and the age of the underlying crust. Using a single AUV during a couple of cruises is certainly not the way forward in exploration. A reliable global resource estimate would certainly need increased exploration activities outside the CCZ, most likely using fleets of AUVs mapping simultaneously in order to effectively cover larger areas. New technologies to extend battery lifetime and to communicate between AUVs need to be developed to further enhance exploration.

Seafloor Massive Sulfides (SMS)

SMS, also known as black smoker deposits, are occurrences of metal-bearing minerals that form on and below the seabed as a consequence of the interaction of seawater with a heat source below the seafloor, mainly at volcanically active oceanic spreading centers and along

volcanic arcs (HANNINGTON & *al.*, 2005). The majority of all SMS occurrences that are presently known are small, 3-dimensional bodies that are not of interest to the mining industry. Some deposits contain metals such as Cu, Zn, Au, and Ag that are of economic interest. Other trace elements, that are important for a variety of industry uses (Bi, Ga, Ge, In, Te), can be enriched at certain sites and may be considered as possible by-products (MONECKE & *al.*, 2016). A growing interest in SMS over the past few years resulted in six national exploration licenses, covering 10,000 km² each, that have been issued by the UN International Seabed Authority (ISA) since 2011. Each contractor has to explore 10,000 km² within the 15-year runtime of the contract. Actually, the need to define areas that are not economically interesting is more pressing, as 50% of the 100 license blocks have to be returned to ISA after eight years - hopefully areas that do not contain large and economically interesting SMS deposits.

Current geochemical prospecting technologies have mainly been developed for the search for active hydrothermal systems (e.g. hydrothermal vents and associated black smokers) that can easily be traced through physical and chemical anomalies in the water column (temperature, chemical variations of elements such as Mn, Fe, redox potential, and/or the particle concentration in the water column). Such plume surveys have been a primary tool for exploration of SMS systems, but they only identify active, and therefore mostly young and small hydrothermal systems.

Providing reliable global resource estimates for SMS is not possible: we simply do not know how much of the metal that is released by high-temperature fluid convection over a given length of a ridge axis and over a specific geological time frame is actually deposited as massive sulfides. There are no systematic surveys for massive sulfide abundance on a ridge segment scale and back in time (away from the ridge axis). The amount of sulfide along the neovolcanic zone has been estimated to be 600 millions of tonnes globally (HANNINGTON & *al.*, 2011). However, this estimate was based on the current knowledge of the vent sites at the time and is likely underestimating the resource potential of inactive sites. For example, in a recent survey within known vent sites at the Endeavour Segment, AUV-based high-resolution bathymetry was used to identify extinct sulfide chimneys and mounds. There, in only eight 18-hour dives, the number of chimneys and mounds present was quadrupled (JAMIESON & *al.*, 2014). This is especially noteworthy, since this vent site has seen well over one hundred submersible and ROV dives over the past 30 years and is considered to be one of the best studied submarine hydrothermal fields on Earth.

There is now ample evidence from recent seafloor surveys that much larger, but inactive or extinct sulfide deposits (eSMS) occur away from the ridge axis where long-lasting fluid flows along stable fault systems allow for the accumulation of massive sulfides over large time spans (McCAIG & *al.*, 2007). The hypothesis is that large eSMS deposits can be found in a strip of a few tens of kilometers away from mid-ocean ridges at only a few meters below

a sediment or lava carapace. The potential to find extinct sulfide deposits that far from the ridge axis opens up a vast area of the seafloor for future exploration. Extending the exploration effort to only 20 km on each side of the ridge axis results in a prospective area of 3.2 million km² (Fig. 1). Also, since the entire oceanic floor was once formed at a mid-ocean ridge and is likely to have formed SMS deposits during the entire time, the true global resource potential is probably much bigger. However, without a distal signature, e.g. a geochemical or geophysical anomaly that is detectable over hundreds of meters or even kilometers away from deposit, and with only poorly constrained geophysical properties, inactive deposits are difficult to locate or evaluate. We actually do not know the fate of seafloor massive sulfide occurrences after they formed. Do they oxidize quickly, releasing the metals back to the pore water? Without a better understanding of their size, structure, and distribution, the global resource potential of eSMS remains uncertain.

Knowledge about the regional and local spatial controls of sulfide deposition are currently also still lacking. This is largely a reflection of the lack of high-resolution investigations away from the spreading centers. However, large inactive deposits have been discovered in the past few years, especially at slow-spreading ridges. These include the Krasnov, Semyenov, and Petersburg sites in the Central Atlantic (CHERKASHOV & *al.*, 2010; SHILOV & *al.*, 2012) that are estimated to contain up to 14 million tonnes of sulfides in the case of the Semyenov cluster and the Krasnov occurrence (CHERKASHOV & *al.*, 2010). As stated above, these extinct sites cannot be found with traditional exploration technologies that are looking for geochemical or geophysical tracers in the water column. Russian scientists used time-consuming deep-towed platforms for their discoveries. Techniques to identify such deposits time and cost efficiently on a regional scale are still lacking. High-resolution AUV-based mapping of the bathymetry with associated magnetic and self-potential sensors seems to be the only way to survey larger areas fast, efficiently, and cheap. A recent AUV survey of the TAG Hydrothermal Field mapped the bathymetry over an area of 47 km² combining 13 AUV missions into a single map and identified a number of eSMS in the area (PETERSEN & *al.*, 2016b; Fig. 2). It should be noted, however, that a coverage of 47km² during a single cruise is only a fraction of the 10,000 km² that each contractor has to survey in 15 years. Clearly, for a global resource estimate, even using only the 20 km corridor around the spreading axis as the prospective area, other means are necessary. As with manganese nodules, fleets of AUV, working in tandem, seems the only choice.

Even worse, we currently also lack the ability to identify buried deposits (beneath a few meters of sediments or lava), thereby further underestimating the resource potential of explored areas. This currently limits our efforts to explore further off-axis, as the deposits are buried under increasing sediment cover. The sediments themselves may, however, provide a far-field halo around inactive deposits at a scale comparable to that of plume mapping.

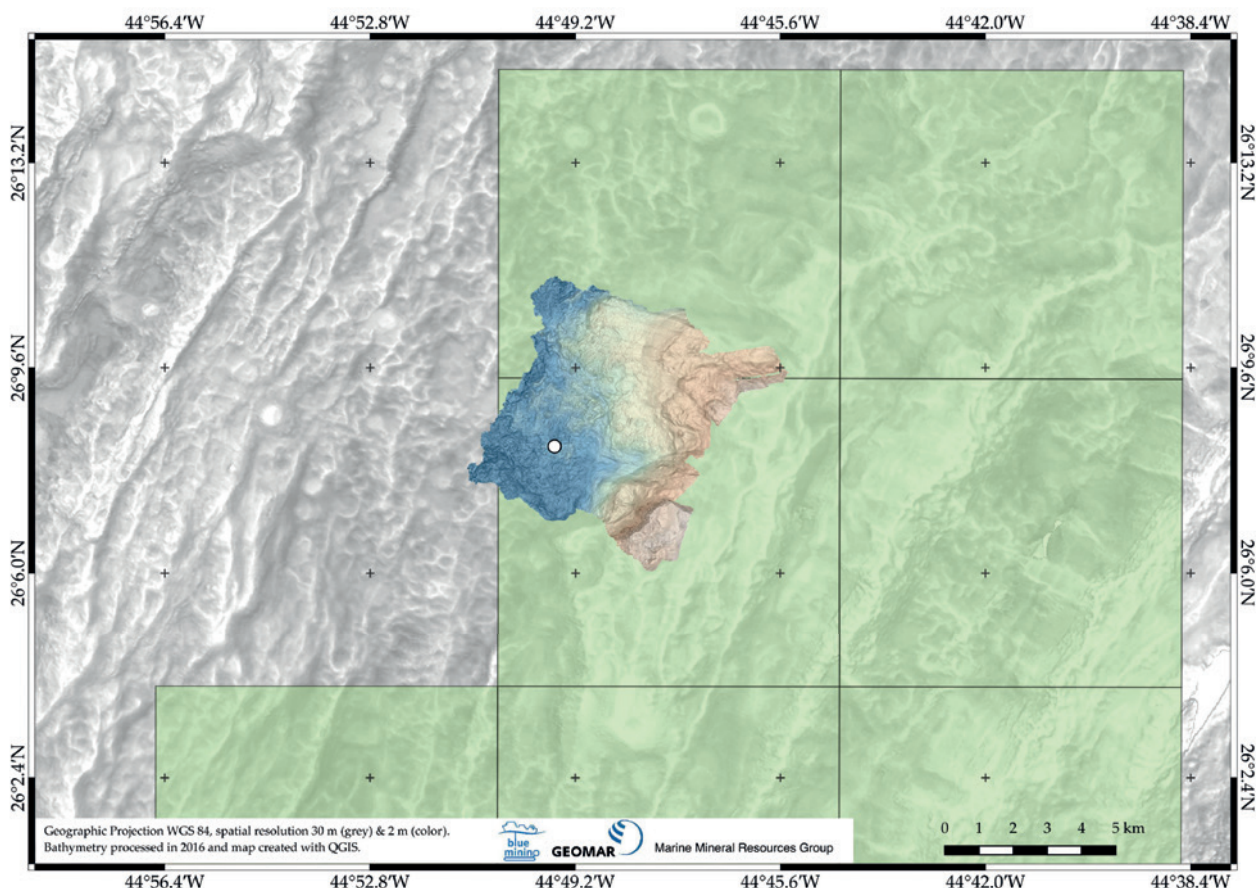


Figure 2: Location of the recently acquired AUV bathymetry in the TAG Hydrothermal Field during cruise RV Meteor M127 in 2016 and the French exploration license blocks for massive sulfides (green squares; each 100km² in size) compared to the license blocks. One hundred blocks need to be explored during the runtime of the contract. Note also, that less than 24 hours of shiptime were used for handling the AUV (launch and recovery for 13 missions) and the ship was free to do other science while the AUV was mapping. The TAG active mound is indicated by the white dot. Background shows texture-shaded ship-based multibeam bathymetry from M127 gridded at 30 m.

Although sediment geochemistry has been a standard tool in marine geology for over a century, there have been few modern advances to adapt this technique to the search for marine minerals. This contrasts with the search for ore deposits on land, where exploration geochemistry has achieved a high degree of sophistication, including the application of ultra-sensitive tracers such as mobile metal ions and pore-fluid gases. Depth profiles of metals in the sediments can potentially be used to estimate the age of a source (and how far away it might be, based on spreading rates), but few sensitive mineralogical, geochemical or isotopic vectors have been tested that could be traced back to metal sources more than 1-2 km distant or at depth below the sampled core. Gravity coring and ship-based analytics (e.g. portable XRF, PIMA, portable XRD) in combination with structural interpretation of AUV-based high-resolution self-potential, magnetics, and bathymetry data may open up a new frontier in exploration technology.

As stated above, SMS deposits are 3-dimensional bodies and therefore any resource estimate must build on depth information. Tonnage calculations reported for most known seafloor deposits, however, are only based on interpretation of visual surface information of the outcrop

thickness and lateral extension as well as on distribution of Fe-staining at the surface. In many cases, these estimates are considered to overestimate their size and tonnage (HANNINGTON & *al.*, 2011). Drilling is currently the only technology that provides depth information of SMS deposits and has only been performed for few deposits. With the exception of a those sites, little is known about the interiors of most SMS deposits. Several lander-type drill rigs are currently being used globally. However, obtaining representative samples from up to 50 m below the seafloor in rough topography is still challenging. Since drilling is very expensive, there is a pressing need to develop or modify existing technologies to gain subsurface information. In order to prevent coring of waste rock or sulfides lacking the commercial metals of interest (Cu, Zn) in-situ logging tools are needed in order to terminate holes in time and to reduce the costs of the assessment. Geophysical tools such as seismic and marine electromagnetics (EM) could also provide information about the interior. Due to the rough morphology reflection seismic data collected at the sea surface will be heavily disturbed by side echoes and diffraction events. Refracted seismic events from Ocean Bottom Seismometers (OBS) may be used

to further improve reflection seismic images. Such techniques have so far mainly been applied to crustal scale investigations and need to be tested for their potential to investigate eSMS deposits.

Acknowledgements

Method development for exploration and resource assessment for marine minerals is supported by a grant from the EU-FP7-Project “Blue Mining: Breakthrough Solutions for the Sustainable Deep Sea Mining Value Chain” under grant No. 604500. This grant also supported the recent cruise to the TAG area and is gratefully acknowledged. Additional support was provided by GEOMAR, Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel.

Bibliography

cHERKASHOV (G.), POROSHINA (I.), STEPANOVA (T.), IVANOV (V.), BEL'TENEV (V.), LAZAREVA (L.), ROZHDESTVENSKAYA (I.), SAMOVAROV (M.), SHILOV (V.), GLASBY (G.P.), FOUQUET (Y.) & KUZNETSOV (V.), “Seafloor Massive Sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: New Discoveries and Perspectives”, *Marine Georesources & Geotechnology* 28, 2010, pp. 222-239.

GREINERT (J.) and ship-board scientific party 2015, Cruise report SO242 Leg1 - JPI Oceans Ecological Aspects of Deep-Sea Mining DISCOL Revisited, GEOMAR Report 26, 290 p.

HANNINGTON (M. D.), DE RONDE (C. D.) & PETERSEN (S.), “Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems”, *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 2005, pp. 111-141.

HANNINGTON (M.), JAMIESON (J.), MONECKE (T.), PETERSEN (S.) & BEAULIEU (S.), “The abundance of seafloor massive sulfide deposits”, *Geology* 39, 2011, pp. 1155-1158.

HEIN (J. R.), MIZELL (K.), KOSCHINSKY (A.) & CONRAD (T. A.), “Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources”, *Ore Geology Reviews* 51, 2013, pp. 1-14.

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

KWASNITSCHKA (T.), KÖSER (K.), STICKLUS (J.), ROTHENBECK (M.), WEIß (T.), WENZLAFF (E.), SCHOENING (T.), TRIEBE (L.), STEINFÜHRER (A.), DEVEY (C.) & GREINERT (J.), “DeepSurveyCam - A deep ocean optical mapping system”, *Sensors* 16, 2016, pp. 1-17.

MARTINEZ-ARBIZU (P.) and ship-board scientific party 2015, Cruise report SO239 - EcoResponse Assessing the Ecology, Connectivity and Resilience of Polymetallic Nodule Field Systems, GEOMAR Report 25, 204 p.

McCAIG (A. M.), CLIFF (R. A.), ESCARTÍN (J.), FALLICK (A. E.) & MACLEOD (C. J.), “Oceanic detachment faults focus very large volumes of black smoker fluids”, *Geology* 35, 2007, pp. 935-938.

MONECKE (T.), PETERSEN (S.), HANNINGTON (M. D.), GRANT (H.) & SAMSON (I. M.), “The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions”, *Reviews in Economic Geology*, 2016, 18, pp. 245-306.

PETERSEN (S.), KRÄTSCHHELL (A.), AUGUSTIN (N.), JAMIESON (J.), HEIN (J.R.) & HANNINGTON (M. D.), “News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources”, *Marine Policy* 70, 2016, pp. 175-187.

PETERSEN (S.) and ship-board scientific party 2016b, Cruise report M127 - Metal fluxes and resource potential at the slow-spreading TAG mid-ocean ridge segment (26°N, MAR) – Blue Mining @ Sea.

PEUKERT (A.), “Correlation of ship- and AUV-based multi-beam and side scan sonar analyses with visual AUV- and ROV-based data: Studies for Mn-nodule density quantification and mining-related environmental impact assessments”, Unpublished MSc thesis. Christian-Albrechts Universität Kiel, Kiel, 2016, 132 p.

RYAN (W. B. F.), CARBOTTE (S. M.), COPLAN (J. O.), O'HARA (S.), MELKONIAN (A.), ARKO (R.), WEISSEL (R. A.), FERRINI (V.), GOODWILLIE (A.), NITSCHKE (F.), BONCZKOWSKI (J.) & ZEMSKY (R.), “Global Multi-Resolution Topography Synthesis”, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10, 2009, pp. 1-9, doi:10.1029/2008GC002332

SCHOENING (T.), STEINBRINK (B.), BRÜN (D.), KUHN (T.) & NATTKEMPER (T. W.), *Ultra-fast segmentation and quantification of poly-metallic nodule coverage in high resolution digital images*, Underwater Mining Institute, 2013, pp. 1-10.

SHILOV (V. V.), BEL'TENEV (V. E.), IVANOV (V. N.), CHERKASHEV (G. A.), ROZHDESTVENSKAYA (I. I.), GABLINA (I. F.), DOBRETSOVA (I. G.), NARKEVSKII (E. V.), GUSTAITIS (A. N.) & KUZNETSOV (V. Y.), “New hydrothermal ore fields in the Mid-Atlantic Ridge”, Zenith-Victoria (20°08'N) and Petersburg (19°52'N), *Doklady [Communications] Earth Sciences* 442, 2012, pp. 63-69.

Enjeux économiques : quel est le potentiel des ressources minérales marines ?

Par Christophe-Alexandre PAILLARD

Chef du département « Intelligence économique et protection de l'information » du service de défense, de sécurité et d'intelligence économique du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Les besoins en ressources minérales vont croissants. La place occupée par des technologies toujours plus consommatrices de métaux oblige à s'interroger sur les potentialités de l'exploitation minière sous-marine, qui est aujourd'hui limitée à quelques cas se situant à proximité des côtes et au projet emblématique – Solwara 1 – de l'entreprise canadienne Nautilus, en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Les conditions d'exploitation demeurent globalement incertaines et trois questions restent sans réponse claire : a) la nature des technologies nécessaires à cette exploitation, b) l'évaluation du coût financier de telles opérations et, enfin, c) l'impact sur l'environnement de l'exploitation de mines sous-marines. Le potentiel est élevé, mais ces obstacles rendent éminemment aléatoire toute prédiction future sur ce sujet. Consciente toutefois de son intérêt, la France a approuvé en octobre 2015, en Comité interministériel de la mer, une stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins.

La crise sino-japonaise déclenchée en septembre 2010 autour des îlots contestés des Senkaku a brutalement révélé au grand public et aux décideurs mondiaux l'importance hautement stratégique de métaux appartenant à la famille des terres rares, qui sont indispensables aux hautes technologies et à la transition énergétique.

La Chine concentre aujourd'hui plus de 95 % de la production de ces métaux et elle est tentée d'utiliser ce quasi-monopole comme arme diplomatique et industrielle. Même si cette crise politique est derrière nous et même si la question ne se limite pas aux seules terres rares, cet épisode rappelle que les filières d'approvisionnement en minerais et en métaux, plus ou moins stratégiques et plus ou moins critiques, peuvent être aussi problématiques que celles liées aux hydrocarbures.

En effet, nombre de métaux présentent des caractéristiques indispensables à beaucoup de secteurs de l'économie (transports (automobiles), nouvelles technologies de l'information et de la communication, énergies renouvelables, industrie nucléaire, aérospatial, équipements de défense...), et s'avèrent difficilement substituables.

Privées de substances comme le niobium, le gallium, le molybdène, le béryllium ou le titane, de nombreuses filières industrielles auraient des difficultés pour produire les outils technologiques les plus contemporains, des té-

léphones portables aux avions de ligne. L'impact d'une pénurie serait, pour nos sociétés, extrêmement problématique.

Or, les ressources en question sont inégalement réparties sur la planète et sont parfois situées dans des pays considérés comme étant à risque, tel le cobalt en République démocratique du Congo. Par ailleurs, l'enjeu se situe non seulement au niveau des ressources premières, mais aussi au niveau de l'ensemble de la filière de production, de transformation et d'approvisionnement. Ainsi, les diverses étapes de la transformation d'un élément en produit fini et la maîtrise des procédés industriels associés ne sont parfois contrôlées que par quelques industriels, ce qui justifie l'emploi du qualificatif « critique ».

C'est ce contexte qui explique que de nombreux pays et entreprises se soient une nouvelle fois intéressés aux ressources minérales existant dans les fonds marins. Avec la limitation des stocks mondiaux de métaux, l'exploitation des ressources minérales marines paraît être une solution logique pour sécuriser l'approvisionnement de pays comme la France ou l'Allemagne, des pays actuellement totalement dépendants de ressources importées (à l'exception du nickel pour la France).

Mais le modèle économique de cette exploitation reste encore à construire et peu d'acteurs industriels sont (pour

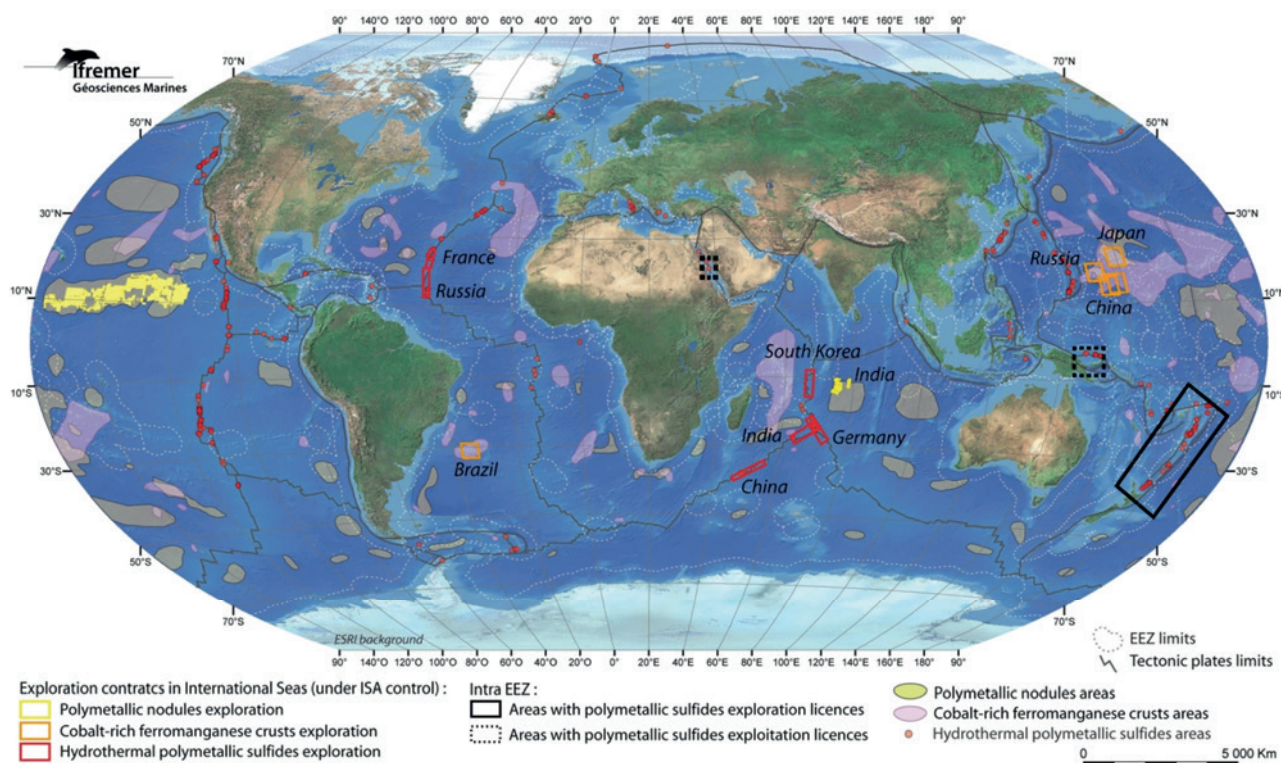


Figure 1 : Carte des ressources minérales des grands fonds et des zones couvertes par des permis de l'ISA.

Source : Ifremer, https://www.ifremer.fr/institut_eng/Appui-a-la-puissance-publique/Matieres-premieres-et-ressources-minerales/Contrats-les-ressources-minerales-metalliques-en-zone-internationale

le moment) prêts à lancer des projets opérationnels de grande envergure.

Cette question des ressources minérales marines n'est pas entièrement nouvelle. Elle avait déjà fait l'objet d'un intérêt industriel et géopolitique majeur dans les années 1980. En effet, pour lutter contre l'emprise du bloc communiste sur une part majoritaire de la production mondiale de minerais, de manière générale, et de certains métaux clés, en particulier, et par crainte d'une chute éventuelle du régime blanc sud-africain, pays qui était alors l'un des premiers fournisseurs des États-Unis et de l'Europe de l'Ouest en certains métaux comme l'or et le platine, diverses entreprises occidentales s'étaient lancées dans des projets d'exploration des fonds marins se focalisant sur les nodules polymétalliques. Ces nodules, comme les sulfures hydrothermaux, sont des dépôts de minerais métalliques, qui se forment par accréation sur plusieurs millions d'années, dans les grands fonds océaniques (à des profondeurs allant de - 1 500 à - 6 000 mètres, par exemple autour de l'île française de Clipperton) ; ce qui suppose de disposer d'importantes capacités industrielles et financières pour pouvoir les exploiter.

Face à l'absence de crédibilité financière, technologique et industrielle de ces projets, l'idée de l'exploitation de ces nodules polymétalliques fut rapidement abandonnée, car elle fut considérée, il y a plus de trente ans, comme trop peu rentable et trop complexe à mettre en œuvre du point de vue technologique.

Aujourd'hui, l'exploitation industrielle de ces ressources est à nouveau d'actualité, et certains experts parlent d'ex-

ploitations devenant rentables à l'horizon EEZ 2030 ; ce qui n'est pas, à mon sens, pleinement démontré.

Conscientes de l'intérêt croissant de ce sujet, les Nations Unies ont créé en 1994 une agence pour veiller à la gestion des ressources du sous-sol *offshore* : l'*International Seabed Authority* (ISA) ⁽¹⁾, basée en Jamaïque, que la France a rejointe en juin 1996. L'ISA a pour mission d'élaborer la loi internationale sur le sujet, d'établir un code minier spécifique et, surtout, d'attribuer les permis d'exploration dans les eaux internationales. Cette Autorité regroupe aujourd'hui 168 pays (situation au 25 juillet 2016), mais les États-Unis n'y ont qu'un statut de simple observateur.

Au-delà des questions purement juridiques de l'exploitation sous-marine en haute mer ou en zone économique exclusive (ZEE) – qui sont certes importantes, mais pas forcément essentielles pour cette problématique d'exploitation des ressources minérales marines –, trois questions me semblent être centrales :

- les technologies *offshore* dont nous disposons peuvent-elles nous permettre d'assurer la mise en exploitation de ces ressources, une fois les campagnes d'exploration effectuées ?
- les marchés mondiaux des matières premières et les marchés financiers sont-ils capables d'assurer un développement à long terme de ce type d'exploitation, alors que les grandes entreprises minières mondiales font au-

(1) Voir le site de cette agence : <https://www.isa.org/jm/>

jourd'hui face à d'importantes difficultés structurelles et budgétaires ?

c) enfin, l'exploitation des ressources minières des fonds marins est-elle socialement acceptable, alors que la conscience écologique ne cesse de croître et conduit à s'interroger sur les atteintes graves à l'environnement que pourrait occasionner l'exploitation sous-marine des minerais ?

Ces trois questions, suivant la nature des réponses qui y seront apportées, peuvent radicalement changer la donne minière sur le sujet qui nous intéresse, et faire des ressources minières marines un eldorado ou un miroir aux alouettes.

Sommes-nous capables technologiquement d'exploiter les ressources minières marines ?

Contrairement au pétrole ou au gaz, le « *Sea Mining* » et, plus encore, le « *Deep Sea Mining* » ne sont pas pratiqués à une échelle industrielle en raison de difficultés techniques encore irrésolues, même si, effectivement, le principe d'exploitation est très similaire à celui mis en œuvre dans l'exploitation des ressources gazières et pétrolières. Les technologies existantes pourraient être adaptées à l'exploitation des ressources minérales, mais des difficultés subsistent. Ainsi, le prélèvement des minerais suppose de ne pas avoir à concasser de la roche en quantités importantes pour éviter, par exemple, la destruction des fonds

marins. Le transport du minerai prélevé suppose que les quantités de roches prélevées, mêlées à de l'eau et à des sédiments, soient bien évidemment acheminées du fond jusqu'à la surface, sur une distance moyenne, à la verticale, de 1 à 5 kilomètres. Un système de pompes hydrauliques et de tuyaux pourrait assurer cette fonction, mais c'est une solution en réalité peu efficace et peu fiable.

Jusqu'à aujourd'hui, les seules opérations minières maritimes menées l'étaient à proximité des côtes, et en eaux peu profondes, et ce pour des raisons à la fois techniques et financières. À titre d'exemple, la société sud-africaine De Beers exploite des dépôts de diamant à l'embouchure du fleuve Orange, en Namibie. Sa filiale Debmarine possède cinq navires opérant entre - 90 et - 140 mètres de fond. Dans ce pays, la société De Beers produit plus de diamants sous-marins que de diamants terrestres. Le coût de telles opérations est élevé, mais il reste raisonnable du fait de la faible profondeur et de techniques d'exploitation proches du dragage.

L'entreprise canadienne Nautilus Minerals Inc. (2) est à ce jour la seule entreprise au niveau mondial à avoir prévu d'exploiter à brève échéance des minerais sous-marins de manière industrielle. En 2005, cette entreprise a décidé de se lancer dans l'exploration de zones présentant d'importantes réserves en sulfures hydrothermaux.

(2) Voir le site de Nautilus : <http://www.nautilusminerals.com/IRM/content/default.aspx>

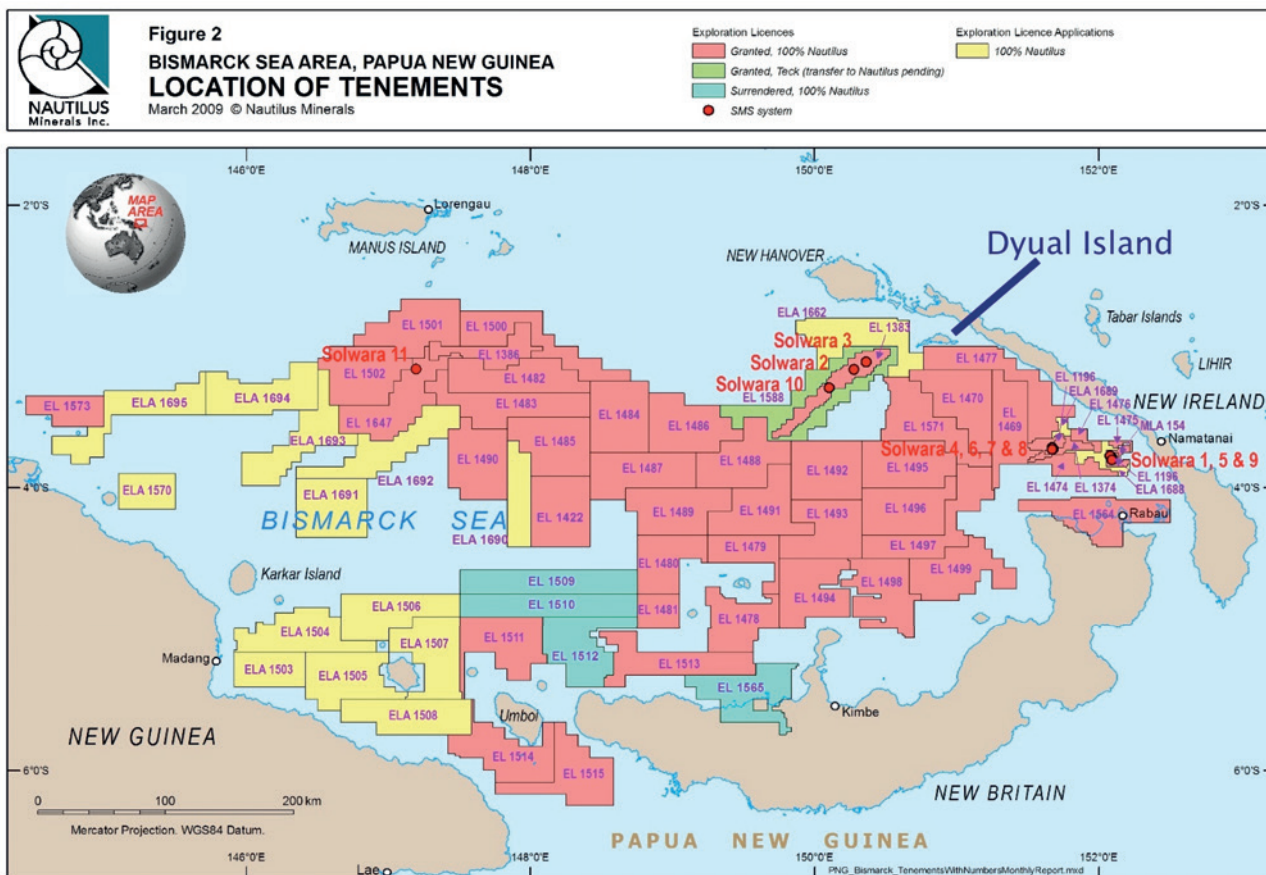


Figure 2 : Carte des sites offshore correspondant à des concessions d'exploration obtenues par Nautilus en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Sources : <http://www.mpi.org.au/wp-content/uploads/2009/08/dyual-island-deep-sea-mining-tenements.jpeg>

Elle a prévu de débiter l'extraction du minerai en 2017 dans la zone dite de Solwara 1, située dans la ZEE de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, entre les îles de la Nouvelle-Bretagne et de la Nouvelle-Irlande. Les sulfures présents dans cette zone présenteraient des concentrations en cuivre et en or presque deux fois supérieures aux concentrations que l'on trouve dans les roches issues de mines terrestres. Pour extraire les minerais contenant ces métaux, Nautilus développe des équipements similaires à ceux utilisés dans les mines terrestres, comme des robots tracteurs destinés à soulever les roches. Bien que l'exploitation soit plus coûteuse que sur terre, l'entreprise pense qu'elle resterait malgré tout économiquement rentable.

Bien évidemment, d'autres entreprises s'intéressent à ces richesses minières potentielles, même si leur modèle industriel et économique n'est pas encore mature. Ainsi, le groupe français Technip (en cours de rachat (depuis mai 2016) par l'américain FMC ⁽³⁾) met en œuvre plusieurs projets d'envergure dans le secteur des mines et des métaux, avec notamment pour références majeures deux des plus importants et des plus riches gisements de nickel dans le monde, Koniambo en Nouvelle-Calédonie et Weda Bay en Indonésie. Il s'agit bien sûr de sites terrestres. Toutefois, l'expérience acquise par Technip dans l'extraction *offshore* de pétrole et de gaz a conduit cette entreprise à s'intéresser aux minerais sous-marins. Sur Solwara, c'est en réalité Technip qui a gagné l'appel d'offres lancé par l'entreprise canadienne Nautilus pour la liaison fond-surface. C'est Technip qui est chargé de concevoir le « rider », le véhicule qui doit remonter le minerai concassé du fond de l'eau vers le pont du navire, où la séparation minerai/eau sera alors effectuée.

Technip participe en association, avec le BRGM et l'Ifremer, au projet d'exploitation des amas sulfurés de Wallis-et-Futuna, pour lequel des campagnes d'exploration ont eu lieu en 2012. À ce stade, si l'exploration de cette zone a fourni des indices, il n'y a aucune certitude sur l'existence de gisements, même si Eramet a déposé, au nom de sa filiale Sialéo, une demande de permis exclusif de recherche (PER) sur la zone considérée. De son côté, Technip est toujours à la recherche de partenaires crédibles pour poursuivre des campagnes d'exploration dans les autres collectivités d'Outre-mer françaises du Pacifique, comme la Nouvelle-Calédonie et la Polynésie française. Technip a d'ailleurs étendu son champ d'action en étant présent en Nouvelle-Zélande sur des projets d'extraction de sables lourds titano-manganifères et sur un projet semblable à celui de Nautilus en Papouasie.

La ressource financière devant permettre la mise en exploitation des ressources minières marines existe-t-elle ? Leur mise en exploitation ne va-t-elle pas se heurter à des mesures de défense de l'environnement ?

À ce jour, il n'existe pas de référentiel solide des activités d'exploitation minière sous-marine publiant leurs paramètres techniques et économiques, ainsi que leurs résultats. En effet, il n'existe pas à ce jour de données, à

l'exception de premières projections faites sur le gisement de Solwara ⁽⁴⁾.

Certes, les nodules polymétalliques et les encroûtements d'hydroxydes de fer et de manganèse sont intéressants pour leurs concentrations en nickel, en cuivre et en cobalt, mais ils peuvent également être riches en platine, en titane, en terres rares (en particulier le cérium), en zirconium, en molybdène ou en vanadium. Selon le contexte, les sulfures hydrothermaux peuvent être fortement concentrés en cuivre, en zinc, en cobalt, en plomb, en baryum, mais aussi en éléments plus rares, comme l'or, l'argent, le cadmium ou l'antimoine. Le coût croissant de l'exploitation de ces métaux remet toutefois en cause tout futur projet minier *offshore*. Et aujourd'hui, nul n'est capable d'évaluer le retour sur investissement de ce type d'exploitation dans le futur.

Le seul poste de dépense actuellement quantifiable et nécessaire avant tout lancement d'opération d'exploitation minière est l'exploration sous-marine ; coûteuse par nature, elle est actuellement entreprise par différents acteurs, comme l'Ifremer, pour pouvoir disposer d'une connaissance générale et approfondie de la zone potentiellement intéressante, une connaissance qui passe par la réalisation de relevés à grande échelle à l'aide de différentes méthodes acoustiques (bathymétrie, réflectivité), de la gravimétrie, du magnétisme et de technologies sismiques. L'étude des relevés (morphologie, tectonique, nature du substrat) permet ensuite de mieux comprendre le contexte géologique des gisements.

La question environnementale et sociale pèse d'un poids aussi lourd, sinon plus lourd, que ces considérations financières. Or, il s'agit là d'un facteur clef pour tout lancement d'une exploitation, mais l'on se heurte à une méconnaissance globale des équilibres des milieux marins et des impacts possibles des activités minières sur l'environnement océanique.

En effet, l'exploitation minière sous-marine risque d'engendrer de nombreuses nuisances. Ainsi, la destruction du milieu (habitats et faune) provoquée par l'extraction dans la zone exploitée est plus que probable, car il semble extrêmement difficile de pouvoir confiner les nuisances. Le risque environnemental le plus évident est celui de la re-déposition des sédiments et des particules métalliques mis en suspension, qui a pour effet d'étouffer des organismes marins fixés.

Autre effet induit de l'exploitation minière : les fonds océaniques seront bouleversés par les vibrations induites par l'extraction et par la lumière nécessaire aux appareils d'extraction. Le rejet (en surface ou à proximité du site d'extraction) de l'eau remontée avec les minerais peut

(3) Technip et FMC avaient créé, en 2015, Forsys Subsea, une coentreprise destinée à offrir aux compagnies pétrolières des outils permettant de réduire jusqu'à 30 % le coût de l'exploitation des gisements d'hydrocarbures en mer.

(4) Voir l'étude de l'IRD sur cette question : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-04/010067050.pdf

conduire à des transferts de masses d'eau présentant des caractéristiques physicochimiques différentes et au rejet de particules fines plus dangereuses pour les espèces vivantes que ne le sont les grosses particules. Enfin, en surface, la dispersion de minerais en éléments de toutes tailles, depuis le navire, ainsi que le bruit causé par les moteurs, les pompes et les autres systèmes d'extraction risquent de conduire à d'importantes perturbations du milieu marin.

En conclusion, comme le rappelle la stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins approuvée en Comité interministériel de la mer du 22 octobre 2015, « *les conditions d'une exploitation prochaine des grands fonds marins ne sont pas réu-*

nies, car plusieurs étapes doivent être encore franchies, comme l'amélioration de la connaissance géologique et environnementale des grands fonds, le développement de nouvelles technologies d'exploration et d'exploitation et la mise en place de cadres administratifs et juridiques pertinents. À cela s'ajoute une chute conjoncturelle des cours des matières premières qui ne favorise pas, à court terme, l'intérêt d'éventuels investisseurs ».

La question de la faisabilité et de la durabilité de l'exploitation minière sous-marine reste donc entière. Il est cependant évident que les besoins croissants de la population en ressources naturelles terrestres vont contribuer à pousser les feux et à rendre tôt ou tard opérationnelles de grandes régions d'exploitation minière sous-marine.

Les défis de l'exploitation minière en eaux profondes : les cadres européen et global

Par Gwenole COZIGOU

Directeur Transformation industrielle et chaînes de valeur avancées à la Commission européenne

Les ressources minérales marines profondes, en tant que sources potentielles d'éléments, tels que le cuivre, le zinc, l'or, le plomb, le cobalt, les terres rares et le manganèse, ont reçu une attention particulière ces dernières années.

La demande croissante ainsi que le risque de pénurie de certaines matières premières ont déclenché un regain d'attention au vu des possibilités d'exploitation des ressources minérales des grands fonds marins.

Plusieurs décennies de recherche et de développement technologique sur les ressources minérales en eaux profondes ont permis de pouvoir envisager aujourd'hui l'exploitation de ces gisements, qui étaient considérés par le passé comme hors d'atteinte. Toutefois, même si la plupart des technologies nécessaires sont disponibles, il importera, avant de passer à l'étape suivante, c'est-à-dire à l'exploitation commerciale de ces gisements, d'acquérir une connaissance beaucoup plus approfondie de l'impact environnemental de cette exploitation et de définir les mesures qui permettront d'en réduire les risques. Un autre élément important tient à la nécessité de mettre en place un cadre réglementaire adéquat préalablement au lancement de toute activité d'extraction.

Malgré les nombreux développements récents dans les connaissances et les technologies, l'exploitation des minerais en eaux profondes reste une activité difficile tant du point de vue technologique que du point de vue environnemental.

Introduction

Les ressources minérales marines profondes, en tant que sources potentielles d'éléments, tels que le cuivre, le zinc, l'or, le plomb, le cobalt, les terres rares et le manganèse, ont reçu une attention particulière ces dernières années.

Même si la présence de ces ressources dans les fonds marins est connue depuis plusieurs décennies, la demande croissante de certaines matières premières, en particulier celles considérées comme critiques pour l'économie européenne, a suscité un regain d'intérêt pour l'exploitation de ces ressources minérales en eaux profondes.

Il existe trois sources principales de gisements minéraux en eaux profondes qui, du fait de leur contenu en métaux, sont potentiellement intéressantes d'un point de vue économique :

- les nodules polymétalliques (aussi connus sous le nom de nodules de manganèse), qui sont riches en manganèse, en fer, en nickel, en cuivre et en cobalt,
- les sulfures polymétalliques, qui eux sont riches en cuivre, zinc, étain, or, argent, arsenic et antimoine,

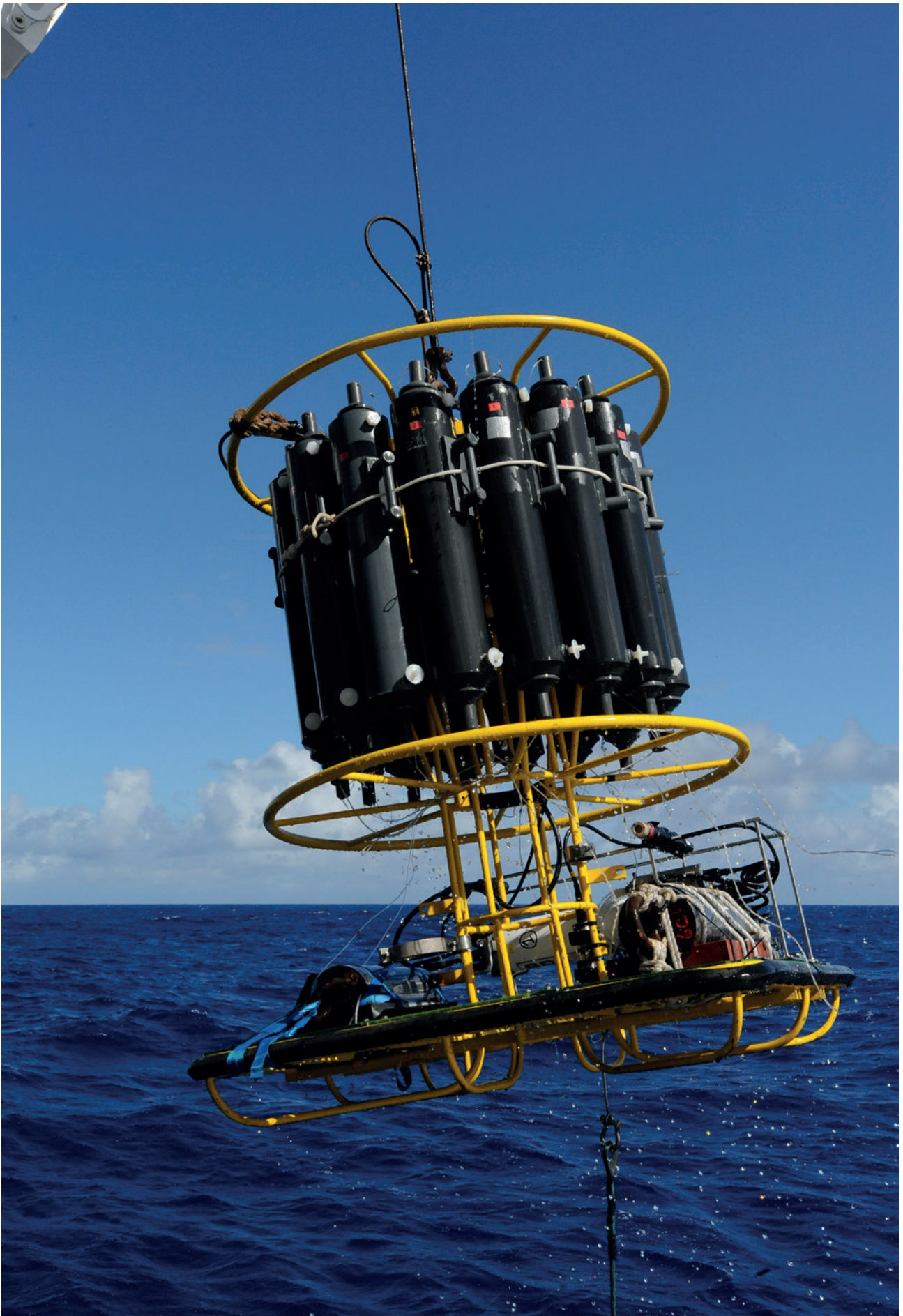
- les encroûtements cobaltifères de ferromanganèse, qui présentent des taux élevés en manganèse, en cobalt, en éléments de terres rares, en nickel, en platine, en phosphore, en tellure, en zirconium, en tungstène et en bismuth.

Ces trois types de gisement diffèrent quant à leur genèse. Ils correspondent d'ailleurs à des configurations géologiques différentes. Ils sont de plus présents à différentes profondeurs et ont la particularité d'être associés à des écosystèmes différents.

Par conséquent, leur intérêt économique, les défis technologiques associés à leur extraction et à leur traitement ainsi que l'impact environnemental potentiel lié à leur exploitation sont appelés à varier en fonction du type de gisement.

État d'avancement en matière d'exploitation

Plusieurs décennies de recherches et de développements technologiques sur les ressources minérales en eaux pro-



Photo©Ifremer/Stéphane Lesbats

Retour sur le pont du navire océanographique, l'Atalante, d'une rosette de prélèvement équipée d'une sonde CTD (conductivité, température, profondeur) après la réalisation d'un sondage vertical lors d'une campagne d'exploration au large des Îles Wallis-et-Futuna.

« Seuls le Portugal, l'Italie et la France (Territoire des Îles Wallis-et-Futuna) ont, à ce jour, reçu des demandes pour des projets d'exploration – des demandes qui sont toujours en attente de traitement par les autorités compétentes. »

fondes ont permis de pouvoir envisager aujourd'hui l'exploitation de ces gisements, qui étaient considérés par le passé comme hors d'atteinte. Toutefois, même si la plupart des technologies nécessaires sont disponibles, il importerait, avant de passer à l'étape suivante, c'est-à-dire celle de l'extraction, d'acquiescer une connaissance beaucoup plus approfondie de l'impact environnemental de l'exploitation des fonds marins et de définir les mesures qui permettraient de réduire ce risque. Un autre élément important à prendre en compte tient à la nécessité de mettre en place un cadre réglementaire adéquat préalablement au lancement de toute activité d'extraction.

Pour ce qui concerne les politiques européennes, l'initiative « Matières premières » de la Commission européenne (COM (2008)699 et COM (2011)25) vise à instaurer des conditions générales propices à un approvisionnement durable en matières premières en provenance de sources européennes ou de pays tiers. Le champ de cette initiative inclut les ressources minérales marines.

La communication de la Commission européenne intitulée « La Croissance bleue : des possibilités de croissance durable dans les secteurs marin et maritime », qui a été adoptée le 13 septembre 2012, a identifié cinq domaines prioritaires (parmi lesquels les ressources minérales marines) qui présentent un véritable potentiel en matière de créations d'emplois, d'innovation et de compétitivité.

Le rapport sur la « Croissance bleue » du Parlement européen (A7-0209/2013), quant à lui, reconnaît clairement l'existence de conditions favorables pour l'exploitation minière marine, tout en invitant la Commission européenne à accorder une attention particulière aux répercussions environnementales de l'exploitation des fonds marins, en particulier dans des environnements marins hautement sensibles.

Dans son avis sur la communication relative à la « Croissance bleue » (TEN/499), le Comité économique et social européen a, lui aussi, reconnu dans les ressources minérales marines un domaine présentant un potentiel de croissance élevé.

Il convient, toutefois, de noter que l'exploitation minière des fonds marins est toujours considérée comme une activité émergente. Il n'y a pas, dans l'Union européenne, de projet commercial d'exploitation minière des grands fonds marins. Il est par ailleurs très peu probable que cette activité débute prochainement dans les zones économiques exclusives (ZEE) des États membres de l'Union européenne, du fait qu'aucune licence d'exploration n'a encore été délivrée. Selon les informations dont nous disposons, seuls le Portugal, l'Italie et la France (Territoire des Îles Wallis-et-Futuna) ont, à ce jour, reçu des demandes pour des projets d'exploration – des demandes qui sont toujours en attente d'un traitement par les autorités compétentes.

Le projet commercial en haute mer le plus avancé est celui de la compagnie Nautilus Minerals, à qui un premier permis d'exploitation pour le projet Solwara 1 a été accordé en janvier 2011 – un projet qui est localisé en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Si le permis environnemental pour Solwara 1 a été attribué en décembre 2009, son exploitation ne devrait débuter qu'en 2018.

De plus, malgré leur intérêt croissant pour les activités liées à l'exploitation minière des grands fonds, la plupart des États membres de l'Union européenne ne disposent pas d'un cadre législatif spécifique. L'extraction minière en eaux profondes n'a pas encore été abordée dans le droit de l'Union européenne.

L'exploitation minière des fonds marins a également été à l'ordre du jour de l'OCDE (direction de la science, de la technologie et de l'industrie) dans le cadre du projet intitulé « L'avenir de l'économie de l'océan – Explorer les perspectives des industries émergentes de l'océan à l'horizon 2030 ». Les conclusions de cette étude indiquent que l'on ne sait pas encore clairement si l'extraction minière en eaux profondes à une échelle commerciale sera ou non une réalité dans un avenir proche, et elle met en avant, parmi les facteurs à l'origine de cette incertitude, un contexte économique défavorable et les problèmes environnementaux liés à l'exploitation minière des grands fonds.

L'exploitation minière des fonds marins est aussi un thème récurrent pour les ministres de la Science et de la Technologie des pays du G7, qui ont, eux aussi, pris note de l'intérêt croissant que suscitait l'extraction minière en eaux profondes, au-delà des limites de leurs juridictions nationales. À cet égard, ils ont demandé à l'Autorité internationale des fonds marins (ISA – *International Seabed Authority*) d'impliquer les parties prenantes et d'élaborer un code clair, efficace et transparent pour permettre une exploitation minière durable des fonds marins. Ils ont aussi mis l'accent sur la nécessité d'appliquer le principe de précaution, de soutenir la législation en évaluant l'incidence de ces activités sur l'environnement et de promouvoir la recherche scientifique dans ce domaine.

C'est dans ce contexte que le sommet du G7, qui s'est tenu en Allemagne en 2015, a publié une déclaration qui identifie la recherche scientifique et l'évaluation des incidences de ces activités sur l'environnement comme des sujets prioritaires, en vue d'une exploitation minière durable des fonds marins.

L'ensemble de ces initiatives démontrent qu'en dépit de toutes les connaissances acquises et des nouvelles technologies développées, l'exploitation minière des grands fonds reste aujourd'hui une activité difficile tant du point de vue technologique que du point de vue environnemental.

L'Europe dans le contexte mondial

En vertu du droit international, le cadre juridique de base pour l'extraction minière en eaux profondes est établi dans la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM), telle que modifiée par application de la partie XI de la Convention. La CNUDM établit une distinction entre les zones maritimes relevant de la compétence des États côtiers (eaux internes et eaux archipélagiques, eaux territoriales, zone économique exclusive et plateau continental) et les zones situées au-delà des limites des juridictions nationales, en l'occurrence la haute mer et les fonds marins situés au-delà du plateau continental des États côtiers (appelé « la Zone »). Tous les droits sur

les ressources minérales de la zone internationale des fonds marins, qui comporte les fonds marins et leur sous-sol, sont « confiés à l'humanité tout entière ». L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) est l'organisation responsable de l'élaboration de la réglementation de l'extraction minière en eaux profondes s'appliquant dans la zone. Son « droit minier » renvoie à l'ensemble des règles, des règlements et des procédures visant à réglementer la prospection, l'exploration et l'exploitation des minerais marins dans la zone internationale des fonds marins.

L'AIFM a publié une série de règlements sur la prospection et l'exploration dans la zone : a) des nodules polymétalliques (règlement adopté le 13 juillet 2000), b) des sulfures polymétalliques (règlement adopté le 7 mai 2010) et c) des encroûtements cobaltifères (règlement adopté le 27 juillet 2012). L'élaboration de règlements sur l'exploitation des ressources minérales dans la zone est, quant à elle, en cours et le projet de cadre réglementaire proposé par la Commission juridique et technique de l'AIFM a fait l'objet d'une consultation interne qui a pris fin le 2 novembre 2016.

À l'échelle mondiale, de nombreux pays, notamment la Russie, la Chine, le Japon, la Corée, l'Inde, le Brésil, et certains États membres de l'Union européenne (la France, l'Allemagne, la Belgique, le Royaume-Uni, la Bulgarie, la République tchèque, la Pologne et la Slovaquie : ces quatre derniers États s'étant constitués en consortium

avec Cuba et la Fédération de Russie) comptent parmi les principaux acteurs mondiaux et tous ont déjà des permis d'exploration dans la zone.

Ainsi, le dernier contrat à avoir été signé par l'AIFM l'a été avec l'Inde, à la fin du mois de septembre 2016.

Cela reflète l'intérêt accordé à ce sujet et indique que les activités d'exploration dans la zone vont se poursuivre. On peut d'ailleurs s'attendre à ce que plusieurs de ces permis d'exploration se transforment en licences d'exploitation. Nous nous rapprochons donc à grands pas de l'exploitation commerciale des gisements sous-marins dans cette « zone ».

Il est important de mentionner que l'Union européenne a déjà mis en place des normes environnementales et sociales, ainsi qu'un cadre réglementaire pour encadrer les activités minières considérées, et que l'Union européenne pourrait donc apporter une contribution utile au processus en cours à l'AIFM en soutenant la mise en œuvre de mesures strictes afin de s'assurer que les activités minières en eaux profondes ne portent pas atteinte à ces écosystèmes uniques.

En raison de la nature transfrontalière des activités d'extraction minière et de leurs impacts environnementaux potentiels, il est dans l'intérêt de l'Union européenne d'avoir un rôle plus actif dans ce processus.

Programme	Project details	Adresses URL
FP7	MIDAS - Managing Impacts of Deep-sea resource exploitation: resources from the deep-sea environment. 36 months project	http://www.eu-midas.net/
	<i>Blue Mining</i> - Breakthrough Solutions for the Sustainable Exploration and Extraction of Deep Sea Mineral Resources 48 months project	http://www.bluemining.eu/
H2020	VAMOS - Viable and Alternative Mine Operating System 42 months project	http://vamos-project.eu/
	UNEXMIN - Autonomous Underwater Explorer for Flooded Mines 45 months project	http://www.unexmin.eu/
	<i>Blue Nodules</i> - Breakthrough Solutions for the Sustainable Harvesting and Processing of Deep Sea Polymetallic Nodules 48 months project	http://www.blue-nodules.eu/
	ROBUST - Robotic subsea exploration technologies 50 months project	http://cordis.europa.eu/project/rcn/199910_en.html

Tableau 1 : Projets (FP7 et H2020) sur l'exploitation minière en eaux profondes financés par l'Union européenne.

RMC	Short description and objectives	Co-ordinator
ALBATROSS	<p><u>"Alternative Blue Advanced Technologies for Research On Seafloor Sulfides": Securing long term raw material supply to Europe by developing and testing deep-sea technologies for exploration and evaluation</u></p> <p>This project contributes to develop cost-effective technologies to evaluate Seafloor Massive Sulphides deposits (SMS), considered as "the most promising" by Blue Growth, and enables sustainable access to resources in EU States Exclusive Economic Zones (EEZ). Wallis and Futuna EEZ potential was confirmed by large scale mapping in previous campaigns. More biodiversity studies, monitoring, high resolution mapping and developments for seafloor geophysical and water column analysis are required to locate inactive areas. Evaluation requires 3D geo-metallurgical models. As current drilling tools need long campaigns and do not fit for chaotic seafloor or dispersed ore, development is needed. Sea cruises will give EU a chance to prove the potential of its EEZ and its ability to perform exploration through an integrated tool, perfectly fit for any SMS, based on collaboration.</p>	ERAMET SA, France
Blue Atlantis	<p><u>Innovative Mining of Marine Mineral Resources – A European Pilot Mining Test in the Atlantic on Tools, Facilities, Operations and Concepts</u></p> <p>Blue Atlantis will establish the world's only deep-sea mining test facility, covering RTD, mining tests, standards development and market access support. The consortium has 45 partners from 8 European countries along the entire value chain. Deep-sea mining has gone from a distant possibility to a likely reality within just a decade. There is a growing imperative for a better defined EU policy in this area. There are three good reasons why a deep-sea mining test in Europe would be important. First, securing raw materials for European industry, which depends on importing most strategic and critical metals, including: Co, Cu, Ga, Nb, Pt group metals, Ti, W, Zn, Au, Ag and Rare Earths. Second, Europe's leadership in advanced deep-sea technologies will be further enhanced on a global scale. Third, new education, skills and knowledge will be offered by universities and research centers.</p>	Working Group Marine Mineral Resources; German Association for Marine Technology, Germany
ERDEM	<p><u>Environmentally Responsible Deep-sea Mining</u></p> <p>ERDEM will embrace pro-active engagement of scientists, social scientists, policy makers and industry to collaboratively develop a Framework for Sustainable Deep Sea Mining. This will comprise innovative technologies and integrated management practices outputting renewed environmental impact assessment method and updated standards and legal instruments to achieve economically viable, environmentally sound and socially acceptable exploration and extraction of EU's mineral resources. ERDEM promotes international cooperation in R&D on best practice sharing with Japan. ERDEM aspires to develop a novel set of solutions for exploration, extraction and in-situ pre-processing of deep-sea ores and integrated robotic and sensor technologies to achieve lower cost and more efficient real time monitoring of environmental impact. It will assess the resilience of Deep Sea Ecosystems and of biodiversity to resource extraction activities and it will provide advanced understanding of deep sea mining associated geological processes.</p>	BMT Group Ltd, UK
SeaFlores	<p><u>Breakthrough Solutions for Seafloor Mineral Extraction and Processing in deep water environment</u></p> <p>Scientific explorations from the past decades have identified several types of seafloor mineral deposits including Seafloor Massive Sulphides (SMS). In Europe, Azores and Wallis and Futuna are shown to have the potential to contain SMS ores. To enable commercial deep sea mining socially and environmentally acceptable, technologically achievable and economically viable methods need to be developed. The key innovation in this project is the generic design and in-situ demonstration activities of a cost-efficient and environmentally-acceptable deep sea mining pilot system. This project is complementary with ALBATROSS deep-sea exploration project led by Eramet. Technology developed in this project will also reinforce Europe's ambitions to be active in exploration areas outside Europe, thus increasing access to Raw Materials via new mining solutions and decreasing EU dependency on resource imports.</p>	Technip, France

Tableau 2 : Les « Engagements Matières Premières » sur l'extraction minière en eaux profondes du Partenariat européen d'Innovation sur les matières premières.

En outre, il convient de souligner que de nombreuses technologies d'exploitation en eaux profondes sont développées dans l'Union européenne. Les entreprises européennes disposent d'une longue expérience en matière de navires spécialisés et de manutention sous-marine (technologies *offshore* mobilisées en général à des fins de forage, de dragage, de pompage...) et elles sont actuellement bien placées pour fournir, à l'échelle mondiale, des produits et des services de qualité pour l'exploitation minière en eaux profondes.

La recherche et l'innovation en Europe en matière d'exploitation de gisements minéraux sous-marins

L'Union européenne finance depuis de nombreuses années des activités de recherche et d'innovation dans le domaine de l'extraction en eaux profondes, couvrant les minerais, l'environnement, l'étude des écosystèmes et le développement technologique. Prendre des décisions qui soient fondées nécessite de garder les différentes options ouvertes et d'avoir une connaissance approfondie des différents écosystèmes, d'où l'importance de réaliser des travaux de recherche susceptibles de contribuer à améliorer notre connaissance des minerais et nos technologies d'extraction en eaux profondes.

Les projets financés dans le cadre du 7^{ème} Programme Cadre de Recherche et développement et les premiers appels à projets lancés dans le cadre du programme Horizon 2020 correspondent à un effort financier important de la part de l'Union européenne (de près de 47 millions d'euros) (voir le Tableau 1 de la page 27), qui vise justement à une amélioration des connaissances et des solutions à apporter aux défis que l'exploitation minière en eaux profondes peut présenter.

Les projets financés dans le cadre d'Horizon 2020 sont principalement focalisés sur le développement de technologies minimisant l'impact de cette exploitation sur l'environnement.

Le plan de mise en œuvre stratégique du Partenariat européen d'innovation sur les matières premières – une plateforme européenne réunissant l'industrie, les administrations, les universités, les organisations de recherche et les ONG pour promouvoir l'innovation tout au long de la chaîne de valeur des matières premières – inclut des actions en matière d'exploitation minière en eaux profondes dans trois de ses domaines prioritaires : les technologies, les conditions-cadres des matières premières en Europe et la coopération internationale.

Dans ce contexte, quatre « Engagements Matières Premières » (RMC) concernant l'extraction minière en eaux profondes ont été reconnus par le groupe de haut niveau du partenariat (voir le Tableau 2 de la page 28).

Conclusions

La décision de lancer une extraction minière en eaux profondes doit tenir compte de la spécificité de chaque

type de gisement et doit se fonder sur une analyse coûts/avantages, tout en prenant en compte les aspects économiques, sociaux et environnementaux.

En ce qui concerne les technologies pouvant être utilisées pour l'extraction minière en eaux profondes, l'industrie européenne occupe une position de premier plan, ce qui est un facteur déterminant permettant à l'Union européenne d'être le principal acteur mondial dans la fourniture de technologies et la surveillance environnementale de ces activités.

En conclusion, il y a aujourd'hui une bonne opportunité pour l'Union européenne de dégager en son sein une position commune sur l'extraction minière en eaux profondes. L'Union européenne, avec l'implication des différents États membres concernés par ces activités, est bien placée pour se constituer en leader industriel dans les industries amont et aval liées à la chaîne de valeur de l'exploitation minière en eaux profondes, et s'ériger en acteur de premier plan dans l'élaboration du cadre réglementaire mondial nécessaire aux activités d'extraction en eaux profondes.

Références

COM(2008) 699 final – Communication de la Commission au Parlement européen et au Conseil Initiative « Matières premières » : répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe.

COM(2011) 25 final – Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions : relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières.

COM(2014) 297 final – Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions sur la révision de la liste des matières premières critiques pour l'Union européenne et la mise en œuvre de l'initiative « Matières premières ».

COM(2012) 494 final – Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions : La Croissance bleue : des possibilités de croissance durable dans les secteurs marin et maritime.

Study to investigate the state of knowledge of deep-sea mining, Final Report under FWC MARE/2012/06 - SC E1/2013/04

<https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/call-commitments>

<http://www.eu-midas.net/>

OECD (2016), *The Ocean Economy in 2030*, OECD Publishing, Paris, DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264251724-en>

<https://www.isa.org.jm/>

Les impacts environnementaux de l'exploitation minière des fonds marins : un état des lieux des connaissances

Par Pierre-Marie SARRADIN

Ifremer

Jozée SARRAZIN

Ifremer

et François H. LALLIER

Professeur, CNRS

Le développement potentiel des activités d'exploitation des ressources minérales marines profondes nécessite de se poser, en amont, la question de leurs impacts sur les écosystèmes, et ce, afin de mieux pouvoir les prévenir, les limiter, voire de proposer des processus de mitigation et de restauration.

L'évaluation de ces impacts potentiels reste encore très difficile en raison de notre manque de connaissances sur les méthodes d'exploitation qui seront mises en œuvre par les industriels et de connaissances fondamentales sur l'évaluation de la biodiversité, sur la compréhension de la dynamique et du fonctionnement des écosystèmes associés, mais aussi sur les couplages entre les eaux profondes et le reste de l'océan.

Les avancées technologiques et l'arrivée des sous-marins d'exploration, au début des années 1960, ont permis l'acquisition de connaissances fondamentales sur le fonctionnement des océans. La découverte, en 1977, d'écosystèmes luxuriants dans les profondeurs océaniques a ainsi révolutionné notre compréhension de la vie sur Terre : une source d'énergie alternative apportée par la chimiosynthèse microbienne permettait de soutenir une vie animale des plus riches, en l'absence même de lumière solaire. Depuis lors, plusieurs autres écosystèmes ont été découverts, conférant aux fonds océaniques une complexité de paysages abritant une grande hétérogénéité d'habitats et de faunes.

Ces explorations scientifiques menées dans les grands fonds marins ont également permis d'identifier différents types de ressources minérales qui suscitent un intérêt croissant dans le contexte de la raréfaction des ressources continentales. Ces ressources minérales sont présentes dans tous les océans du globe, tant dans la zone économique exclusive (ZEE) de certains États côtiers que dans la Zone internationale. Situées à de grandes profondeurs, elles sont associées à des écosystèmes particuliers peu connus, dont certains sont identifiés comme des îlots de

biodiversité ou abritant un fort endémisme. Le développement potentiel des activités d'exploitation de ces ressources nécessite de se poser, en amont, la question de leurs impacts sur les écosystèmes, et ce, afin de mieux pouvoir les prévenir, les limiter, voire de proposer des processus de mitigation et de restauration.

Les écosystèmes associés aux ressources minérales marines

Les ressources minérales marines procurent à la faune une diversité d'habitats : des substrats sédimentaires meubles sur les plaines à nodules et une prépondérance de substrats durs pour les sulfures et les encroûtements cobaltifères.

Convoités depuis les années 1960, les nodules polymétalliques sont présents sur de vastes zones de plaines abyssales (se situant entre - 3 000 et - 5 500 mètres de profondeur). Ces concrétions rocheuses riches en cuivre, en nickel et en cobalt sont formées de cercles concentriques d'hydroxydes de fer et de manganèse. Les plaines à nodules sont colonisées par une faune abyssale sédimentaire classique se caractérisant par une forte diversité et



Photo © Ifremer-Nautile/Campagne Mescal Leg1 2002

Crabes vivant à proximité de cheminées hydrothermales dans le nord-est du Pacifique.

« Les zones hydrothermales actives sont colonisées par une faune dont la chaîne alimentaire est basée sur la chimiosynthèse microbienne. »

une faible biomasse. Elle est largement dominée par des organismes fouisseurs de petite taille, qui vivent dans le sédiment et qui sont consommés par une faune dépositrice de grande taille, mais peu abondante. Véritables îlots de substrats rocheux, les nodules abritent une faune fixée suspensivore spécifique. La diversité microbienne associée à ces nodules est peu connue, mais elle joue un rôle important dans leur processus de formation. Les plaines abyssales oligotrophes, homogènes sur de larges échelles, sont affectées par une dynamique saisonnière générale liée aux variations de la production primaire de surface.

Les encroûtements cobaltifères sont des précipitations d'oxydes de manganèse et de fer riches en cobalt, en tellure et en platine. Ils sont essentiellement rencontrés sur les monts sous-marins à des profondeurs allant jusqu'à - 4 000 mètres et peuvent recouvrir des surfaces de plusieurs kilomètres carrés. C'est la production photosynthétique de surface, concentrée grâce à l'hydrodynamisme local, qui constitue la principale source d'énergie pour leurs communautés biologiques. Encore peu étudiées, l'abondance, la biodiversité et l'endémicité de leur faune sont variables, selon les sites. Les coraux et les gorgones

contribuent largement à la structuration de l'habitat sur les substrats rocheux et abritent eux aussi une faune diversifiée. La dynamique temporelle des écosystèmes associés à ces encroûtements est fortement influencée par les variations saisonnières et climatiques.

Les dépôts massifs de sulfures polymétalliques sont localisés le long des dorsales médio-océaniques et à proximité des sites volcaniques sous-marins, jusqu'à plus de 5 000 mètres de profondeur. Ils sont constitués majoritairement de sulfures de fer et peuvent présenter de forts enrichissements en métaux de base (cuivre, zinc, plomb, cobalt, argent, or) et en métaux rares.

Les zones hydrothermales actives sont colonisées par une faune dont la chaîne alimentaire est basée sur la chimiosynthèse microbienne. Leur faune abondante est dominée par un petit nombre d'espèces souvent endémiques et dont la composition spécifique varie d'une région océanique à l'autre. Les environnements associés aux sites hydrothermaux actifs ont des propriétés physico-chimiques contrastées, qui contribuent à la structuration des communautés animales à travers leurs besoins nutritifs et leur adaptation aux conditions extrêmes. Les systèmes hydrothermaux se caractérisent également par

une forte instabilité temporelle liée aux processus tectoniques et volcaniques sous-jacents. La production microbienne, intense au niveau des sites hydrothermaux actifs, est également présente dans les sites inactifs, où elle est faiblement soutenue par les minéraux sulfurés.

Mais nos connaissances sur la faune typique des dépôts inactifs sont extrêmement parcellaires. Or, ce sont ces dépôts qui sont particulièrement visés par une exploitation potentielle des ressources qu'ils renferment.

Les impacts potentiels de l'exploitation

L'exploitation industrielle n'a commencé pour aucune des ressources minérales sous-marines aujourd'hui identifiées. Les techniques d'exploitation sont encore en cours de développement et doivent répondre aux contraintes spécifiques des milieux profonds. Le projet le plus avancé en la matière, piloté par la société canadienne *Nautilus minerals inc.*, vise un dépôt de sulfures polymétalliques situé dans la ZEE de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Sa notice d'évaluation d'impact a été publiée en 2008. La construction de l'infrastructure est pratiquement achevée, et l'exploitation pourrait débuter en 2019. Ce projet accuse actuellement un retard, et la compagnie recherche des financements complémentaires (<http://www.nautilus-minerals.com/IRM/content/default.aspx>).

Bien que les ressources considérées présentent entre elles des différences, les principes généraux de leur exploitation sont identiques (voir la Figure 1 ci-dessous et

l'article de Julien Denègre, publié dans ce même numéro de *Responsabilité et Environnement*). Ils comportent trois étapes principales : a) l'extraction du minerai, sur le fond marin, par une unité mobile, prendra en compte la spécificité de la ressource – pour les nodules : ramassage sur de grandes surfaces et séparation d'avec le sédiment ; pour les encroûtements : extraction spécifique sans prélèvement du substrat rocheux et pour les sulfures polymétalliques : extraction sur des surfaces réduites ; b) le minerai sera ensuite broyé, puis transporté par pompage, *via* un *riser*, vers le navire support. Une première étape de traitement (déshydratation) de la boue minéralisée pourra être effectuée sur ce navire, et ce préalablement c) au transport de la matière première vers la terre après son transfert sur une barge. L'eau utilisée pour l'étape de pompage ou extraite lors du traitement de la boue sera recyclée en partie dans le *riser* ou rejetée à plus ou moins grande profondeur.

L'exploitation des ressources marines aura des impacts certains sur l'environnement. Ces impacts dépendront de la nature de la ressource exploitée, de la technologie d'exploitation utilisée et des spécificités des écosystèmes associés. Quelques tests d'exploitation minière ou de perturbation des environnements profonds ont été menés durant les décennies 1970, 1980 et 1990, ils portaient sur les nodules polymétalliques. Depuis le début des années 2000, la tension mondiale sur la demande en certains métaux stratégiques suscite un regain d'intérêt pour les ressources minérales marines et l'évaluation des impacts potentiels liés à leur exploitation (par exemple, l'action pi-

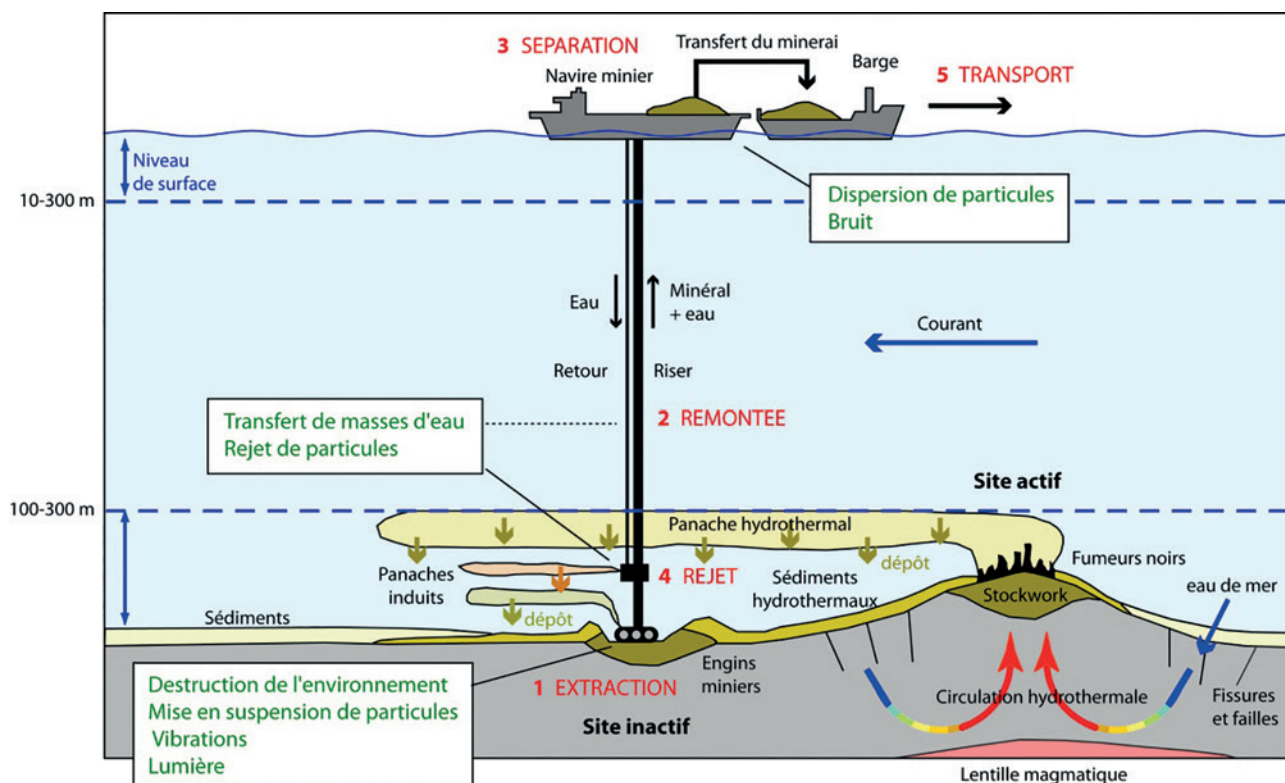


Figure 1 : Représentation schématique des impacts environnementaux de l'exploitation des nodules polymétalliques, sulfures polymétalliques et encroûtements cobaltifères (extrait de DYMENT et al., 2014).

lote du JPI Oceans – *Joint Programming Initiative Healthy and Productive Seas and Oceans* – ou le projet européen MIDAS – *Managing Impacts of Deep-sea Resource exploitation*). Ces impacts ont été évalués à partir des connaissances dont on dispose actuellement sur les technologies d'exploitation et les différents écosystèmes associés (ECORYS, 2014 ; DYMENT et al., 2014 ; ROGERS et al., 2015 ; Midas Research Highlights, 2016...).

Les impacts majeurs envisagés (voir la Figure 1 de la page précédente) seraient la destruction durable de l'habitat et de la faune associée durant la phase de collecte du minerai. Cette phase s'accompagnera de la formation d'un nuage de particules fines pouvant modifier la turbidité et la composition physico-chimique de la colonne d'eau. Le déplacement de la couche sédimentaire recouvrant la ressource et la sédimentation de ce panache sur une large zone géographique affecteront la faune locale, par ensevelissement et en perturbant l'alimentation des espèces suspensivores.

La dissolution et l'oxydation de particules issues du broyage du minerai sont susceptibles de relarguer des éléments toxiques (métaux lourds) dans la colonne d'eau, et donc vers les écosystèmes voisins.

Par ailleurs, comme ces particules auront une minéralogie et une composition chimique différentes de celles des panaches hydrothermaux, leurs impacts écotoxicologiques et leurs comportements biogéochimiques ne pourront être *a priori* comparés à ceux des phénomènes naturels.

Le rejet des déchets miniers (l'eau chargée en particules fines utilisée durant la circulation de la boue dans le riser, ou obtenue après déshydratation du minerai) constituera un second apport particulaire, dont les impacts dépendront de la profondeur à laquelle il sera effectué. Relargués à proximité du fond, ces rejets viendront enrichir le panache de particules formées par les engins d'excavation et de broyage. Leur rejet en surface risquerait d'engendrer non seulement une augmentation de la turbidité et une modification du pH et de la température, mais aussi un apport en nutriments et en métaux lourds, avec des conséquences potentielles sur la production primaire, sur les cycles biogéochimiques et sur les écosystèmes pélagiques (tout rejet de déchets dans la zone photique est fortement déconseillé depuis plus de dix ans par la communauté scientifique).

L'emprise spatiale de leur impact dépendra de la quantité et de la qualité des particules produites durant la phase d'exploitation, de leur granulométrie et de leur potentiel de dispersion selon la courantométrie des masses d'eau locales. L'évaluation de cette dispersion n'est accessible actuellement qu'en recourant à des approches de modélisation prenant en compte les phénomènes de turbulence générés dans les masses d'eau supérieures, et à la topographie.

D'autres impacts, peu documentés, sont également envisageables : émissions acoustiques et électromagnétiques engendrées par l'infrastructure d'extraction, vibrations, bruits et rejets liés à la présence des navires en surface, introduction d'espèces invasives et accidents (fuites de carburant ou de produits toxiques...). Enfin, les impacts

de l'exploitation minière sont susceptibles de se cumuler avec les impacts dus à d'autres activités anthropiques (autres exploitations à proximité) ou au changement global, mais les informations scientifiques à ce sujet sont encore limitées aujourd'hui.

Actuellement, deux contraintes majeures limitent notre capacité à évaluer les impacts potentiels de l'exploitation minière en milieu profond. La première est liée à notre connaissance parcellaire de la distribution géographique de la biodiversité de la faune aux échelles régionales (biogéographie) et de la capacité des espèces à se disperser (connectivité), à se reproduire et à coloniser de nouveaux sites. La seconde concerne l'impossibilité dans laquelle nous sommes de prévoir la capacité de résilience des écosystèmes. Ainsi, peu d'écosystèmes profonds ont fait l'objet d'un suivi à long terme ou d'expérimentations spécifiques nous permettant d'appréhender comment et à quel rythme les communautés biologiques se rétabliront suite à un impact. Caractéristiques des différents écosystèmes considérés, les spécificités de fonctionnement et les échelles temporelles de variation ne permettent pas, en effet, d'extrapoler à l'ensemble des écosystèmes concernés les observations réalisées sur certains sites modèles.

Les outils de gestion

Le cadre réglementaire applicable à l'exploitation des ressources minérales marines dépend de la zone géographique considérée : la réglementation de l'État côtier s'applique dans les ZEE, l'AIFM contrôle et organise les activités de prospection et d'exploitation dans la zone internationale (la Zone), suivant une réglementation en cours d'élaboration (voir l'article d'Elie Jarmache publié dans ce même numéro de *Responsabilité et Environnement*).

Les outils de gestion et de préservation applicables aux environnements marins profonds ne sont pas tous prescriptifs. Ils peuvent être sectoriels, ou ne pas être reconnus par les différentes conventions en place. On peut citer les Zones d'intérêt écologique et biologique (ZIEB) ou les Écosystèmes marins vulnérables (EMV), des outils permettant l'identification d'écosystèmes ou de zones d'intérêt aussi bien dans les eaux territoriales que dans la Zone. Les EMV – par exemple, les coraux profonds – peuvent faire l'objet de mesures d'évitement par la pêche profonde.

Les Aires marines protégées sont des outils intégrés de préservation du milieu et de gestion des usages. Elles peuvent être appliquées dans la Zone dans le cadre de conventions de mer régionales ayant une compétence au-delà des juridictions nationales. L'AIFM a acté, en 2012, dans le cadre du plan de gestion environnemental de la région de Clarion-Clipperton, la création de 9 ZIEP (Zones d'intérêt environnemental particulier), dans lesquelles toute forme d'activité minière était exclue (voir l'article de Lénéïck Menot publié dans ce même numéro de *Responsabilité et Environnement*). Une proposition similaire ciblée sur la dorsale médio-Atlantique et également portée par des initiatives scientifiques est en cours de discussion (*Atlantic Strategic Environmental Management Plan – Açores*, 2015).

Les questions émergentes

L'évaluation des impacts potentiels induits par l'exploitation des ressources minérales marines reste encore très difficile, en raison de notre manque de connaissances technologiques sur les méthodes d'exploitation qui seront mises en œuvre par les industriels et de connaissances fondamentales sur l'évaluation de la biodiversité, sur la compréhension de la dynamique et du fonctionnement des écosystèmes associés, mais aussi sur les couplages entre les eaux profondes et le reste de l'océan.

L'hétérogénéité des habitats aux différentes échelles caractérise les écosystèmes associés aux ressources minérales marines et représente également un facteur favorisant la biodiversité. Les fluctuations à court terme des conditions physico-chimiques des milieux associés aux encroûtements cobaltifères et aux sulfures minéraux inactifs ou, au contraire, la stabilité des propriétés des masses d'eaux profondes sont des propriétés particulièrement importantes pour appréhender la sensibilité des communautés biologiques aux perturbations qui pourraient être induites par l'exploitation. Le taux de croissance, le cycle de vie et la longévité des espèces clés, ainsi que la diversité génétique et les capacités évolutives des populations, sont des facteurs majeurs de la dynamique des peuplements, qui restent encore très largement méconnus.

La connectivité des populations n'est actuellement appréhendée que pour certaines espèces hydrothermales naturellement soumises à des phénomènes d'extinction-re-

colonisation. La plupart de ces espèces sont capables de coloniser rapidement de nouveaux sites, de proche en proche. La courantométrie régionale, qui est contrainte par le relief sous-marin, est un élément clé de la connectivité, et donc du maintien des populations, mais aussi du transport de particules et de composés minéraux dissous. Les outils et les modèles prédictifs qui permettraient de l'appréhender restent cependant à développer.

Enfin, le transfert de ces connaissances fondamentales vers l'élaboration de protocoles d'évaluation d'impacts qui soient scientifiquement efficaces et industriellement réalisables reste une étape importante à franchir.

Bibliographie

DYMENT (J.) & al., *Les Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective*, Rapport CNRS-Ifrremer, 2014, 930 p.

ROGERS (A. D.) & al. (Eds.), *Position Paper 22 of the European Marine Board*, Ostend, Belgium. 224 p., ISBN 978-94-920431-1-5.

Midas research highlights, 2016, www.eu-midas.net, MIDAS project, 2014-2016: PI P. Weaver.

Ecorys (2014), *Study to investigate the state of knowledge of deep sea mining*, Final report & Annexes, European Commission, DG Maritime Affairs and Fisheries.

Ressources minérales, risques environnementaux et stratégies de gestion de la biodiversité : l'exemple des zones à nodules du Pacifique Nord-est

Par Lénaïck MENOT

Chercheur en écologie benthique au laboratoire « Environnement profond » de l'Ifremer

La première ruée vers les ressources minérales profondes qu'avait suscitée la découverte des nodules polymétalliques, date d'un demi-siècle. Au cours de ces cinquante ans, exploration, droit international et sciences de l'environnement ont tous progressé, mais pas à la même vitesse. La zone à nodules du Pacifique Nord-est a été rapidement l'objet de contrats d'exploration dont la superficie totale égale celle de l'Europe et dont les gisements exploitables couvriraient un territoire grand comme la France. L'exploitation de ces ressources aura des conséquences certainement durables, mais encore mal connues sur une faune diversifiée et vulnérable. L'Autorité internationale créée en 1994 pour gérer ces ressources et l'impact environnemental de leur exploitation a acté d'un plan de gestion de la région considérée en 2012, sur la base de recommandations scientifiques alimentées par des connaissances encore très parcellaires, et ce, de surcroît, dans un espace déjà largement préempté par des droits exclusifs autorisant l'exploration des ressources minérales.

Les nodules et leur environnement : un patrimoine à gérer

La ruée vers les ressources minérales des grands fonds marins eut ses premières heures de gloire au début des années 1970. Les nodules polymétalliques tapissant les fonds abyssaux du nord-est de l'Océan Pacifique attiraient alors la convoitise de grands consortiums, privés ou soutenus par des États, dont la France, le Japon, la Corée, la Chine ou les ex-pays de l'Est. Cette ressource gisant au-delà des limites des juridictions nationales était reconnue patrimoine commun de l'humanité par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) signée en 1982 et ratifiée en 1994. Pour gérer ce patrimoine, la Convention a créé l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM). Au titre des missions confiées à cette Autorité, l'article 145 de la CNUDM précise qu'elle doit adopter des règles, règlements et procédures visant à protéger et conserver les ressources naturelles et à prévenir les dommages pour la flore et la faune marines.

À cette même époque, naissaient véritablement les sciences de l'écologie des environnements profonds, stimulées par la découverte, dans les sédiments abyssaux, d'une diversité biologique insoupçonnée. Cet environnement profond, que les naturalistes du XIX^e siècle avaient un temps imaginé dépourvu de vie ou peuplé d'espèces reliques, se révélait être parmi les plus diversifiés du monde marin (HESSLER et SANDERS, 1967). La perspective d'une exploitation des nodules polymétalliques sans causer de dommages graves à l'environnement devint alors un défi majeur, car, comme nous allons le voir, les perturbations de l'environnement allaient s'avérer potentiellement importantes. Or, la faune est par nature sensible à ces perturbations.

Les risques environnementaux d'une exploitation des nodules

Les permis d'exploration délivrés par l'AIFM se concentrent entre les fractures de Clarion et Clipperton,

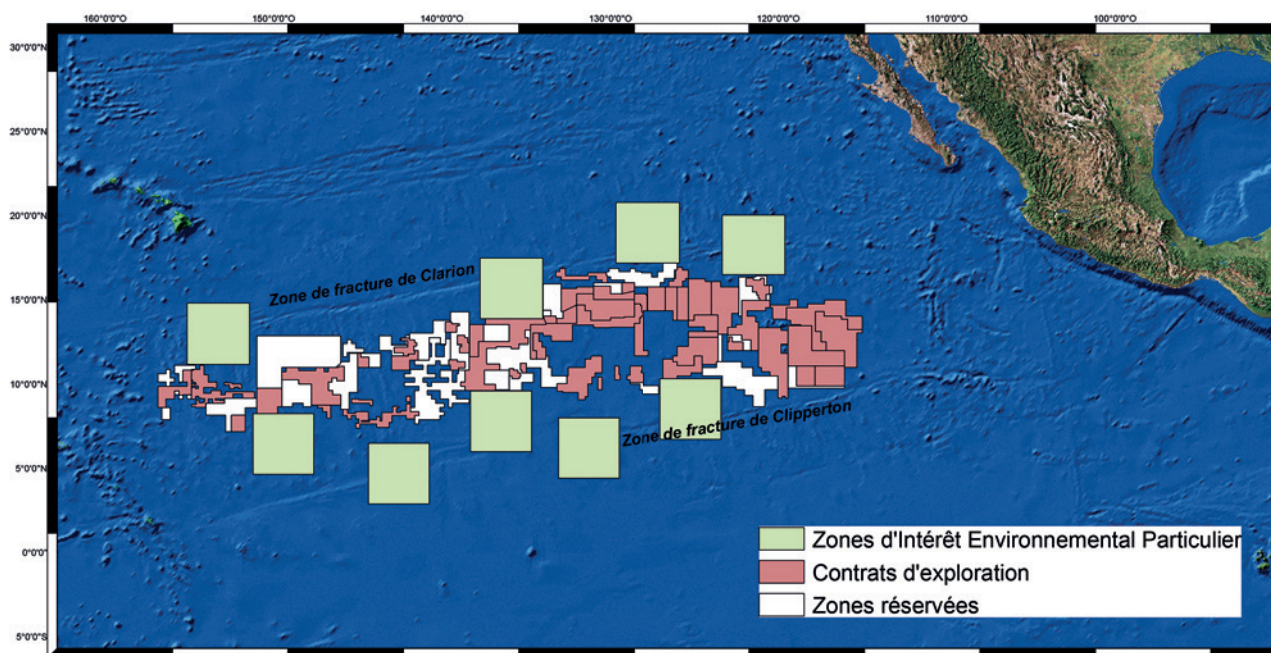


Figure 1 : Carte de la province à nodules polymétalliques des fractures de Clarion-Clipperton (dans le Pacifique Nord-est) présentant la localisation des contrats d'exploration, des zones réservées et des Zones d'intérêt environnemental particuliers (ZIEP) gérées par l'Autorité internationale des fonds marins (sources : AIFM, ESRI).

au milieu de l'Océan Pacifique, entre les côtes du Mexique et les côtes hawaïennes (voir la Figure 1 ci-dessus). Plus du tiers de cette région, d'une superficie de 5 millions de km², est couvert par un patchwork de 15 concessions auxquelles s'ajoutent les zones d'exploration réservées à des pays en voie de développement. Chacune de ces concessions a une superficie de 75 000 km². Les nodules n'y sont cependant pas répartis de manière homogène sur un fond uniformément plat. Plutôt qu'une plaine, le paysage abyssal s'apparente ici à une succession de collines et de vallées peu profondes. Les nodules exploitables se trouvent au pied des collines ; sur les flancs, les pentes sont trop élevées pour permettre le passage des engins de ramassage, tandis que dans les vallées les nodules sont absents. Finalement, des 75 000 km² d'un permis d'exploration, de l'ordre de 25 % seraient exploitables. Ce qui permettrait tout de même de soutenir, pour chacun des contractants, une exploitation pendant plus de trente ans. À l'échelle de la zone Clarion-Clipperton, les surfaces exploitables représenteraient une superficie totale de l'ordre de 500 000 km², soit presque la superficie de la France métropolitaine.

Les technologies de ramassage ne sont pas encore mûres. Il reste donc des inconnues sur la nature et l'ampleur exacte des perturbations qu'engendrerait une exploitation des nodules polymétalliques sur l'environnement abyssal. La plus évidente de ces perturbations serait la disparition des nodules, mais les sédiments sur lesquels reposent ces nodules seraient également profondément remaniés.

La principale inconnue réside, quant à elle, dans la dispersion des deux panaches de particules que générerait une exploitation. Le premier panache serait créé par la remise en suspension des sédiments par l'engin de ramassage. Le second panache résulterait, quant à lui, du relargage

en mer des sédiments qui auraient été collectés en même temps que les nodules polymétalliques. Les particules de ces deux panaches pourraient être transportées par les courants sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres, multipliant ainsi par deux voire par trois l'empreinte sur les fonds océaniques de l'exploitation des nodules.

Finalement, en ce qui concerne les seuls fonds océaniques du Pacifique Nord-est, une zone grande comme l'Europe des 28 est couverte pour plus du tiers par des concessions délivrées pour l'exploration des nodules polymétalliques qui, si elles étaient toutes exploitées, représenteraient une perturbation directe des fonds marins correspondant à la superficie de la France métropolitaine et une perturbation indirecte s'étendant à celle de l'ensemble des pays frontaliers de notre pays.

Diversité et sensibilité de la faune abyssale

Si les scientifiques du XIX^e siècle ont prédit que les grands fonds océaniques étaient dépourvus de vie, c'est parce que la faune de grande taille y est rare, à quelques exceptions notables telle la faune des sources hydrothermales (DESBRUYÈRES, 2010).

Et pourtant, l'environnement profond recèle une diversité cachée. Ainsi, les inventaires d'espèces réalisés localement dans la zone de Clarion-Clipperton ont montré que 100 espèces de polychètes – des petits vers marins – pouvaient coexister dans quatre mètres carrés de sédiments (PATERSON et al., 1998) et que 325 espèces de nématodes – des vers marins encore plus petits – pouvaient coexister dans un quart de mètre carré de sédiments (MILJUTINA et al., 2010).

Dans les deux cas, ces espèces, dans leur grande majorité, étaient nouvelles pour la science et, qui plus est, elles étaient généralement rares, n'étant représentées que par un ou deux individus.

Si la faune est rare, dans les grands fonds, c'est parce qu'à - 4 000 mètres de profondeur, la seule source de nourriture disponible, ce sont des miettes de ce qui est produit à la surface des océans, soit de l'ordre de 1 % de la production primaire de la zone euphotique.

Mais cette nourriture alimente un écosystème dont la température varie entre 0°C et 4°C, la vitesse des réactions métaboliques y est par conséquent divisée par 2, voire jusqu'à 4 fois, par rapport aux environnements aquatiques côtiers tempérés et tropicaux. Ou, autrement dit, la vie s'y développe à la même vitesse que dans nos réfrigérateurs...

Ces trois grandes caractéristiques de la vie dans les grands fonds – diversité, rareté, lenteur – pourraient la rendre particulièrement sensible aux perturbations de son environnement, les perturbations naturelles étant, par ailleurs, rares.

Au cours des dernières décennies, des dragages ou des perturbations expérimentales ont été réalisées dans la zone de Clarion-Clipperton, qui ont été – volontairement

ou involontairement –, autant d'opportunités d'évaluer les capacités de restauration de la faune abyssale. Dans le cadre d'une action pilote du programme européen JPI Oceans (*Joint Programming Initiative Healthy and Productive Seas and Oceans*), une campagne océanographique menée à bord du navire de recherche *Sonne* a permis de revisiter certains de ces sites en 2015 grâce à des moyens d'étude et d'observation modernes, en particulier l'engin téléopéré (ROV) Kiel 6 000. Des traces de drague âgées de 8 mois, 3 ans et 37 ans ainsi que le site d'une expérience de remise en suspension de sédiments datant de 20 ans ont été observés et échantillonnés.

En 2004, déjà, au cours de la campagne océanographique Nodinaut, à bord de *L'Atalante*, le submersible *Nautile* avait plongé pour étudier la plus ancienne de ces traces de drague, alors âgée de 26 ans (voir la Figure 2 ci-dessous).

Ces dragages ont laissé à la surface des sédiments des cicatrices certes peu profondes (de quelques centimètres seulement), mais néanmoins durables. Visuellement, les différences sont subtiles entre deux traces de drague, l'une vieille de 8 mois et l'autre de 37 ans (VANREUSEL et al., 2016). Cela traduit la faiblesse de la sédimentation et des courants à ces profondeurs.

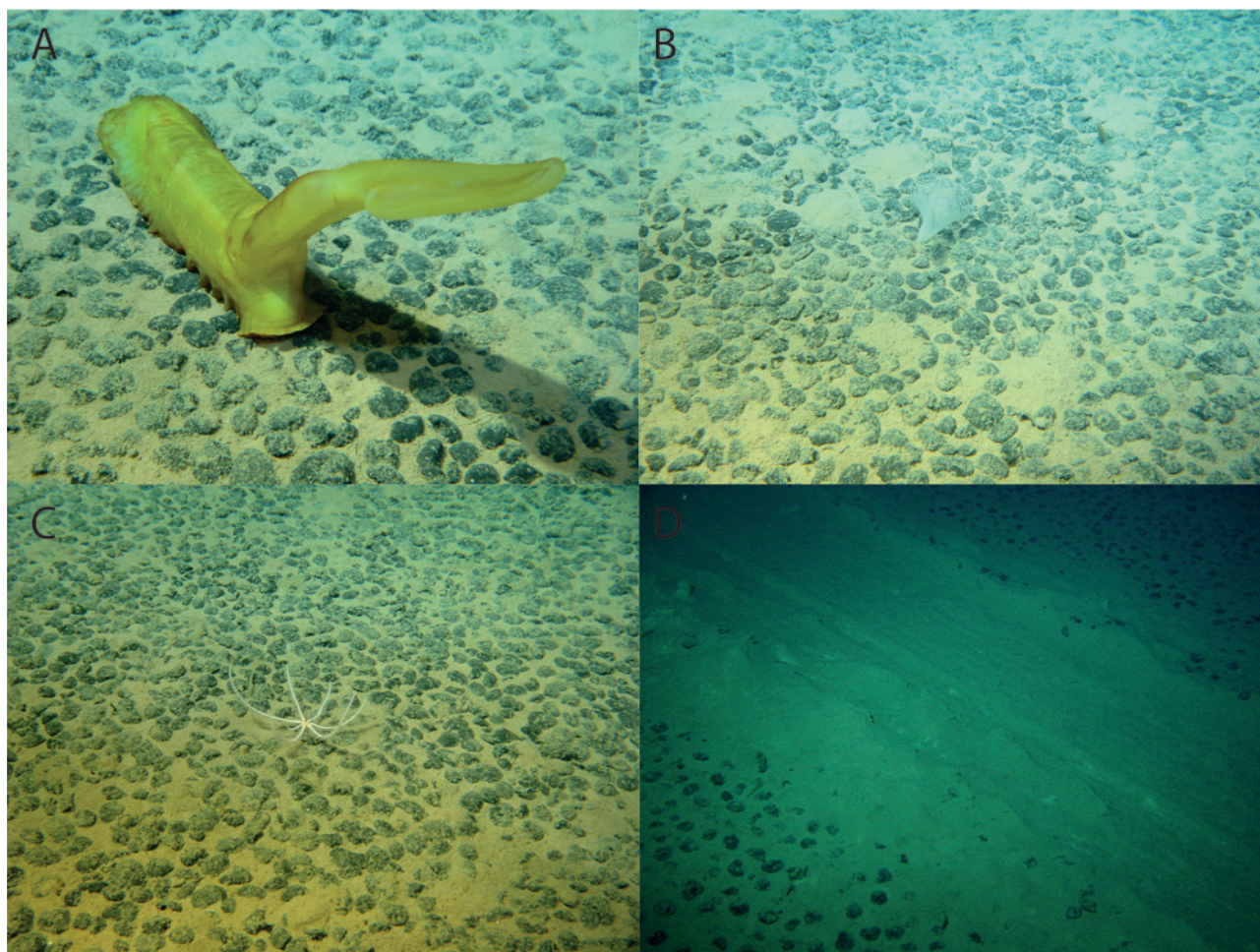


Figure 2 : Images des zones à nodules du Pacifique Nord-est, par - 5 000 mètres de fond : a) un concombre de mer (*Psychropotes longicauda*), b) un corail noir (*Bathypathes cf. alternata*), c) une étoile de mer (*Freyastera sp.*) et d) une trace de drague large d'un mètre, profonde de cinq centimètres et âgée de 26 ans (Ifremer/Nautile, campagne Nodinaut (2004)).

Les taux de sédimentation dans la zone Clarion-Clipperton sont de l'ordre de 5 mm/1 000 ans. Dix mille ans seront donc nécessaires pour combler le trou de 5 cm laissé par ces dragues. Qui plus est, la vitesse des courants, de l'ordre de 5 à 10 cm/s, est insuffisante pour remobiliser et lisser les sédiments perturbés.

Les prélèvements réalisés en 2004 avaient montré que ni la géochimie des sédiments ni la diversité des nématodes n'étaient comparables entre l'intérieur et l'extérieur de la trace de drague (KHRIPOUNOFF et al., 2006 ; MILJUTIN et al., 2011). Les taux de respiration des organismes, dans les sédiments, étaient, par contre, similaires, suggérant que les bactéries, représentant plus de 90 % de la biomasse, avaient retrouvé une activité normale dans la trace de drague.

Les observations réalisées en 2015 ont confirmé le fait que la faune de grande taille, celle visible sur les vidéos du ROV, différait, dans les traces de drague, de celles du milieu environnant, et ce quel que soit l'âge de la trace (VANREUSEL et al., 2016). Cela est particulièrement vrai pour la faune dite sessile, c'est-à-dire la faune fixée aux nodules. Avec l'exploitation des nodules, cette faune composée entre autres de coraux, d'anémones de mer et d'éponges perdrait le substrat dont elle dépend et ne serait pas en mesure de recoloniser les zones exploitées.

Finalement, l'empreinte physique et l'empreinte écologique d'une exploitation des nodules polymétalliques seraient à la fois vastes – de l'ordre de centaines de milliers de km² – et durables – se comptant en décennies, ou même en millénaires – voire localement irrémédiables, s'agissant de la faune associée aux nodules. Les échelles spatiale et temporelle des risques environnementaux soulignent donc la nécessité de l'adoption de règles et de règlements visant à protéger et donc à conserver la biodiversité.

Stratégies de préservation de la biodiversité dans la zone de Clarion-Clipperton

En 2012, onze ans après l'adoption du règlement sur la prospection et l'exploration des nodules polymétalliques, l'AIFM adoptait un plan de gestion environnementale pour la région de Clarion-Clipperton. Ce plan actait en particulier la création de neuf Zones d'intérêt environnemental particulier (ZIEP), dans lesquelles toute forme d'activité minière était exclue. Ces neuf ZIEP sont le résultat d'une initiative de scientifiques soutenue par l'AIFM et par des fondations privées américaines.

En 2007, le Pr Craig Smith, de l'Université d'Hawaii, organisait un atelier de travail sur la conception d'aires marines protégées pour les monts sous-marins et la province à nodules dans les eaux hors juridiction nationale du Pacifique. Avec ses collègues, il allait définir un ensemble d'aires à protéger dans la zone de Clarion-Clipperton sur la base des connaissances scientifiques concernant cette région (WEDDING et al., 2013). La zone de Clarion-Clipperton a tout d'abord été divisée en neuf sous-régions le

long des gradients est-ouest et sud-nord de production primaire de surface. La production primaire de surface (et donc l'apport trophique au fond) est en effet un élément structurant fort des communautés benthiques profondes, qui expliquerait les patrons régionaux d'abondance et de renouvellement des espèces.

Au sein de chacune des sous-régions, une aire a été définie, dont la taille devait capturer l'hétérogénéité des habitats et assurer un minimum d'autorecrutement, c'est-à-dire assurer que les larves émises par des populations dans l'aire protégée soient en mesure de recruter au sein de cette même aire. C'est en particulier cette dernière contrainte qui a conditionné la taille des aires protégées (soit 200 x 200 km) en s'appuyant sur le fait que, parmi les invertébrés marins, la distance maximale de dispersion d'une larve est estimée à 100 km. Craig Smith et ses collaborateurs ont par ailleurs recommandé d'entourer le cœur de ces aires protégées d'une zone tampon de 100 km afin de prévenir tout risque de perturbation par la dispersion des panaches de particules que générerait une exploitation des nodules, amenant finalement la taille des aires protégées à des carrés de 400 km de côté.

La localisation de ces carrés devait en définitive répondre à deux types de contrainte : d'une part, capturer un maximum d'habitats, en particulier de monts sous-marins, et, d'autre part, ne pas empiéter sur les zones déjà réservées à l'exploration des nodules polymétalliques.

C'est cette dernière condition qui a montré les limites de l'exercice. En effet, le taux de couverture par les contrats d'exploration et les zones réservées est tel qu'il ne peut s'accommoder d'aucune aire protégée de 400 km de côté dans la partie centrale de la zone Clarion-Clipperton. Ainsi, si l'AIFM a bien suivi les recommandations des scientifiques, en créant un ensemble de neuf ZIEP, celles-ci sont toutes positionnées en périphérie de la zone à gérer. Et, jusqu'en 2015, ces neuf ZIEP étaient vierges de connaissances, il était donc impossible de juger de leur représentativité réelle. En 2015, une campagne océanographique réalisée dans le cadre de l'action pilote du JPI Oceans, puis une seconde campagne liée au projet de recherche européen MIDAS (*Managing Impacts of Deep-sea Resource exploitation*) ont permis d'acquérir les premières observations et données sur les habitats et les communautés benthiques de deux de ces ZIEP. Dans les années à venir, les résultats de ces deux programmes de recherche ainsi que des études d'environnement réalisées par les quinze contractants de permis d'exploration devront lever nombre d'incertitudes quant à la diversité, à la distribution et à la connectivité des espèces, afin de permettre de valider un plan de gestion de la biodiversité qui soit à la hauteur des risques environnementaux que présente une exploitation des nodules polymétalliques.

Les acquis de l'expérience « nodules polymétalliques »

Les nodules polymétalliques ont suscité la première ruée vers les ressources minérales des grands fonds marins il y a de cela près d'un demi-siècle. Il n'en demeure pas

moins que nos connaissances et notre compréhension de la structure, du fonctionnement et de la dynamique de ce vaste écosystème abyssal restent extrêmement parcelaires. Les stratégies actuelles de préservation de la biodiversité s'appuient sur quelques hypothèses qui restent à valider et se mettent en place alors même que l'espace sous-marin à gérer est déjà très largement préempté par des droits exclusifs d'exploration des ressources.

La seconde vague d'intérêt pour les ressources minérales profondes que nous connaissons depuis quelques années s'oriente vers des gisements moins profonds, et donc plus accessibles, tels les sulfures polymétalliques et les encroûtements cobaltifères. Ces ressources sont situées dans des régions différentes des grands fonds et sont associées à des écosystèmes différents, mais l'expérience acquise au cours de l'histoire des nodules polymétalliques nous enseigne qu'il serait préférable de ne pas attendre dix ans de plus pour initier les recherches et planifier la gestion environnementale de ces ressources.

Bibliographie

- DESBRUYÈRES (D.), *Les Trésors des abysses*, Paris, Éditions Quae, 2010, p. 182.
- HESSLER (R. R.) & SANDERS (M. L.), "Faunal diversity in the deep-sea", *Deep-Sea Research* 14, 1967, pp. 65-78.
- KHRIPOUNOFF (A.), CAPRAIS (J.-C.), CRASSOUS (P.) & ETOUBLEAU (J.), "Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule fields of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5,000-m depth", *Limnology and Oceanography* 51, 2006, pp. 2033-2041.
- MILJUTIN (D. M.), MILJUTINA (M. A.), ARBIZU (P. M.) & GALÉRON (J.), "Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific)", *Deep Sea Research Part I, Oceanographic Research Papers* 58 (8), 2011, pp. 885-897.
- MILJUTINA (M.), MILJUTIN (D.), MAHATMA (R.) & GALÉRON (J.), "Deep-sea nematode assemblages of the Clarion-Clipperton Nodule Province (Tropical North-Eastern Pacific)", *Marine Biodiversity* 40, 2010, pp. 1-15.
- PATERSON (G. L. J.), WILSON (G. D. F.), COSSON (N.) & LAMONT (P. A.), "Hessler and Jumars (1974) revisited: abyssal polychaete assemblages from the Atlantic and Pacific", *Deep-Sea Research II* 45, 1998, pp. 225-251.
- VANREUSEL (A.), HILARIO (A.), RIBEIRO (P. A.), MENOT (L.) & ARBIZU (P. M.), "Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna", *Scientific Reports* 6: 26808, 2016.
- WEDDING (L. M.), FRIEDLANDER (A. M.), KITTINGER (J. N.), WATLING (L.), GAINES (S. D.), BENNETT (M.), HARDY (S. M.) & SMITH (C. R.), "From principles to practice: a spatial approach to systematic conservation planning in the deep sea", *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences* 280 (1773), 2013.

« Pourquoi pas les abysses ? »

Le projet de recherche de l'Ifremer pour mieux connaître la biodiversité des fonds marins

Par Sophie ARNAUD-HAOND

Écologue à l'Ifremer

et Florence PRADILLON

Chercheur au Laboratoire « Environnement profond » de l'Ifremer

Lancé en 2016 par l'Ifremer, le projet « Pourquoi pas les abysses ? » (ABYSS) a pour objectif de proposer un nouveau recensement de la biodiversité des grands fonds marins à l'échelle mondiale s'appuyant sur la mise en œuvre des nouvelles techniques moléculaires et devant permettre d'accéder à ce que l'on appelle l'« ADN environnemental ». Les fragments d'ADN isolés dans des échantillons d'eau ou de sédiments permettent désormais d'accéder à la liste des espèces qui vivent dans un environnement ou y ont séjourné à un moment donné. Basé sur une caractérisation systématique d'échantillons de sédiments et d'eau récoltés dans tous les océans du globe, ce projet a pour ambition de contribuer à l'inventaire moléculaire de la diversité marine, en particulier de celle présente dans le fond des mers et les abysses, des environnements qui à plus de 95 % sont à ce jour restés vierges d'exploration. Cette révision en profondeur de l'étendue de la biodiversité marine nous permettra également d'appréhender les facteurs qui gouvernent sa distribution et sa persistance.

Les abysses, des zones encore largement inconnues, mais pourtant déjà affectées par l'empreinte de l'homme

Les océans couvrent 70 % de la surface de notre planète et dans leurs trois dimensions représentent 90 % de la biosphère terrestre. Bien que les océans nous fournissent au minimum la moitié de l'oxygène que nous respirons et qu'ils renferment des puits de carbone essentiels, ainsi que des ressources uniques en termes d'alimentation et de biotechnologies, nous avons jusqu'à présent exploré moins de 5 % de leur surface. À titre indicatif, Vénus et Mars sont, à l'heure actuelle, mieux cartographiées, sur l'ensemble de leur surface, que notre propre planète.

En dépit de cette exploration encore très partielle et superficielle, aucun des compartiments marins (ou presque) ne semble échapper aujourd'hui à l'impact des activités humaines. Pendant un siècle, la surface occupée par tous les grands écosystèmes a diminué en raison de la pollution, de la croissance démographique – surtout dans les

zones côtières –, des conséquences de cette pression croissante sur les habitats et les ressources, et, plus récemment, de l'impact du changement climatique.

Ainsi, 30 % des récifs coralliens, 30 % des zones de mangroves et 65 % des herbiers marins et des zones humides ont disparu au cours des cinquante à cent dernières années, tout comme 90 % des grands animaux marins et un grand nombre de stocks de poissons.

L'intégration des données résumant les principales perturbations d'origine anthropique (les polluants, la pêche, le transport maritime, les changements de température et de pH dus au changement climatique, etc.) montre que l'avenir d'au moins 40 % des océans est gravement menacé en raison de l'accumulation de plusieurs facteurs d'impact d'origine anthropique. Une carte mondiale de l'empreinte de l'homme sur les océans publiée il y a de cela huit ans dans la revue internationale *Science* montre qu'aucune zone de l'océan n'est à l'abri, pas même la haute mer. La pollution et le changement climatique ont, eux aussi, un impact sur les endroits les plus isolés, là où

l'on relève peu d'activités humaines. En attestent la fonte des glaces en Arctique et la détection de contaminants rares provenant de pays industrialisés retrouvés jusque dans les sédiments marins du pôle Nord.

Ces observations ont également été confirmées par les études réalisées par un consortium international pour le recensement de la vie marine (*Census of Marine Life*) à l'issue d'une collaboration de 10 ans entre plus de 80 pays : quoique plus difficiles à quantifier dans les environnements méconnus, il est désormais avéré que les menaces qui pèsent sur la biodiversité marine touchent également les abysses.

Une grande inconnue : la biodiversité des grands fonds

L'étendue de notre ignorance s'accroît au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans les grandes profondeurs, où vivent de nombreuses espèces originales encore largement méconnues. Sur environ 1,8 million d'espèces décrites à ce jour, moins de 250 000 sont des espèces marines, mais les dernières estimations suggèrent que 60 à 80 % de la biodiversité « planétaire » serait en fait cachés sous la surface des océans.

Les grandes expéditions, comme celle du navire Challenger, à la fin du XIX^e siècle, ont révolutionné notre vision des abysses en révélant l'existence de la vie à des profondeurs où l'absence de lumière rendait la photosynthèse inenvisageable, seul processus bioénergétique connu jusqu'alors de production de la matière organique, le constituant élémentaire du vivant. La découverte, en 1977, par des équipes américaines, de sources hydrothermales sous-marines a montré l'existence d'une production primaire dans des zones dépourvues de lumière grâce à une autre voie, celle de la chimiosynthèse, conduisant à de très fortes concentrations de vie dans ces « oasis », qui contrastent avec la très faible biomasse estimée dans la plaine abyssale qui les entoure.

Cette découverte a profondément changé notre compréhension de l'environnement profond : la vie n'y dépend donc pas seulement de l'apport de matière organique dégradée produite dans la zone photique (exposée à la lumière de façon suffisante pour permettre la photosynthèse), mais également d'une voie de production « locale » originale et jusqu'alors insoupçonnée. Malgré les efforts développés depuis par la communauté internationale travaillant sur l'environnement profond, la nature et l'étendue de la biodiversité cachée dans les profondeurs marines restent de loin les plus mal appréhendées en raison de la difficulté d'accès et de l'exploration extrêmement fragmentaire des grands fonds, ainsi que du temps nécessaire à la constitution d'inventaires morphologiques et à la description d'espèces nouvelles.

Compte tenu du rythme de la description taxonomique en 2015, on estime que 10 000 ans seraient nécessaires pour compléter les descriptions et l'inventaire des espèces marines restant à décrire, à condition qu'elles soient accessibles et échantillonnées.

De nouvelles estimations avec « Pourquoi pas les abysses ? »

Le projet « Pourquoi pas les abysses ? » lancé en 2016 par l'Ifremer ambitionne de contribuer à de nouvelles estimations de la biodiversité marine cachée dans les profondeurs océaniques, en mettant à profit les moyens issus des avancées spectaculaires réalisées ces dernières années en biologie moléculaire. La capacité de séquençage, qui a été multipliée plusieurs milliers de fois depuis le premier séquençage du génome humain il y a à peine plus de 20 ans, permet de réaliser des inventaires de la diversité présente dans un milieu donné sur la base de l'analyse de l'ADN issu de simples prélèvements de sédiments et d'eau. Ce sont de nouvelles approches dites d'analyse d'« ADN environnemental ». Il ne s'agit pas de séquencer l'ADN de grains de sable ou de molécules d'eau, qui en sont dépourvus, mais d'extraire de façon massive l'ADN des microorganismes et des restes de macroorganismes (restes de peau, de coquille, de mucus, d'organismes en décomposition...) contenus dans une poignée de sédiments ou quelques litres d'eau. Cette capacité permet de changer le prisme à travers lequel peut se concevoir l'étude de la biodiversité et son inventaire : en nous donnant accès à l'invisible, les technologies reposant sur l'ADN environnemental nous offrent la capacité de révéler l'étendue de la diversité marine dans tous les écosystèmes, y compris les moins accessibles. Ces nouveaux inventaires de biodiversité permettent d'envisager une révision en profondeur des estimations qui en sont faites depuis des décennies, de reconstituer son histoire et d'identifier les facteurs qui gouvernent sa distribution et son maintien. À titre indicatif, des inventaires moléculaires réalisés à l'Ifremer dans les herbiers côtiers dans lesquels environ 300 espèces avaient été recensées en dix ans de surveillance, ont mis en évidence sur la base d'un seul échantillonnage temporel une diversité de plus de 1 200 « unités taxonomiques opérationnelles » ou OTUs (les spécimens sont décrits et leur espèce est déterminée sur la base d'un ensemble de critères morphologiques, les OTUs le sont sur la base de critères moléculaires – avec la mise en évidence de divergences entre les séquences).

La révolution des nouvelles techniques moléculaires

La révolution moléculaire – l'avènement du « séquençage de nouvelle génération » – a débloqué l'accès à la diversité microbienne, longtemps entravé par de multiples limites et biais techniques, en particulier la nécessité de cultiver des microorganismes, un défi impossible à relever pour la plupart des lignées bactériennes. La « métagénomique » (séquençage des génomes) et le « métabarcodage » (séquençage de portions clés du génome permettant d'inférer l'identité des lignées révélées) sont désormais incontournables en microbiologie. Ces méthodes ont récemment été transposées à l'étude des génomes d'organismes pluricellulaires, en particulier quand l'observation directe et l'approche morphologique ne permettent pas l'inventaire complet de la diversité des espèces présentes dans un environnement ou dans un échantillon donné (environ-

nement difficile d'accès, faune invisible avec des moyens d'observation directe, échantillons dégradés...). Le projet Tara Océan, qui se veut exemplaire dans ce domaine pionnier, et la circumnavigation espagnole Malaspina ont permis la réalisation à grande échelle des premiers inventaires de la diversité du plancton dans les océans et ont ainsi contribué à une meilleure compréhension des forces environnementales majeures et des interactions entre espèces qui gouvernent sa distribution spatiale.

Le fond de l'océan dans sa globalité, avec ses 95 % de zones inexplorées, est resté à l'écart de ces explorations pionnières de grande envergure, qui par ailleurs ont été principalement orientées vers le monde viral et microbien. Le but du projet « Pourquoi pas les abysses ? » (ABYSS) est de contribuer à combler ces lacunes géographiques et taxonomiques en fournissant une réévaluation de l'étendue et de la distribution de la biodiversité marine (des organismes microbiens jusqu'aux organismes macroscopiques). À terme, il s'agira également d'explorer les interactions entre les espèces et de ces dernières avec leur environnement, des interactions qui peuvent jouer un rôle dans la distribution, la dynamique et l'évolution de la biodiversité marine. Les données recueillies permettront également d'améliorer notre compréhension de l'évolution des grandes lignées du vivant, de reconstituer les mouvements ancestraux d'extinction, de radiation et de colonisation lors des grandes périodes géologiques. Enfin, les méthodes et protocoles mis au point dans ce projet nous permettront d'envisager l'utilisation de la voie molé-

culaire pour procéder de façon efficace, fiable et rapide à la description de l'état initial des écosystèmes ciblés par les futures exploitations minières des grands fonds, et de fournir des éléments de méthodologie pour la définition des états initiaux et l'évaluation et le suivi des impacts potentiels de ces exploitations.

Ce projet repose donc sur la caractérisation de l'ADN environnemental qui sera extrait des sédiments marins et de la couche d'eau affleurant le plancher océanique, et ce à différentes profondeurs et dans tous les océans, sans distinction entre les écosystèmes. Le projet a défini un protocole d'échantillonnage standardisé, reproductible et simple pour être en mesure de recueillir, d'analyser et de comparer les résultats à partir d'échantillons prélevés dans le monde entier. Pour ce faire, les équipes de l'Ifremer impliquées dans la réalisation de ce projet procéderont à des prélèvements systématiques d'eaux et de sédiments au cours des nombreuses campagnes d'exploration qui seront organisées dans les années à venir. Mais elles ont également sollicité leurs partenaires européens, américains et japonais afin de collecter des échantillons susceptibles de réunir la plus grande diversité géographique et écosystémique possible. Des échantillons prélevés dans la Méditerranée, dans les océans Atlantique et Arctique et dans des eaux japonaises sont d'ores déjà en cours d'analyse, et des campagnes d'échantillonnage devraient être réalisées d'ici à juillet 2017, en Alaska et dans le Pacifique.

Addressing the Financial Consequences of Unknown Environmental Impacts in Deep-Sea Mining

By Sarah P. HOYT

Independent Consultant

Linwood H. PENDLETON

Univ. Brest, Ifremer, CNRS, UMR 6308, AMURE, IUEM

Olivier THÉBAUD

Ifremer, Univ. Brest, CNRS, UMR 6308, AMURE, Unité d'Économie Maritime, IUEM

and Cindy Lee VAN DOVER

Duke University, Nicholas School of the Environment, Beaufort, USA

The emerging deep-sea mining industry faces an opportunity for tremendous economic gain through the commercial harvest of a variety of high-grade minerals found at great ocean depths around the world. A certain negative consequence of mining, and thus a potential flashpoint for social conflict, lies in the damage to deep-sea ecosystems that will result from these activities. To advance the conversation on managing the economic consequences of currently unknown environmental impacts of deep-sea mining, we develop a typology of potential environmental impacts. We draw on the literature from similar industries to show how others have implemented financial tools – specifically, environmental bonds, environmental insurance, and mutual insurance – to deal with each type of impact. We argue that proper planning is needed to specify and identify the most appropriate mechanism, or combination thereof, that provides adequate financial protection against unknown environmental impacts related to deep-sea mining.

Introduction

High-grade mineral deposits found on the ocean floor present an opportunity for tremendous economic benefit for the emerging deep-sea mining industry (SPC 2013, p. 47). The damage to deep-sea ecosystems that will result from mining on a commercial scale may spark social conflict. Indeed, the balance between economic gain and environmental loss is currently uncertain. It is quite unknown whether deep-sea mining can be both profitable and environmentally responsible, or whether such activities will generate positive net economic benefits to society when environmental consequences are considered. Differing perceptions and a lack of a clear understanding among regulators, industry actors, scientists, environmental advocates, and policymakers about the magnitude of these impacts and how to manage, mitigate, and compensate for environmental damages is one of the barriers

to the industry's transition from exploration to exploitation. Of particular concern is how to deal with the economic and financial consequences of unknown environmental impacts, and the associated liability regimes that could be implemented.

As stressed by Faure (2016), such liability regimes could pursue two broad objectives: (a) from a traditional legal perspective, to compensate society for the damages borne following the environmental impacts of a mining activity; and (b) from an economic point of view, to provide incentives for mining operations to achieve collectively efficient levels of impacts. While the former focuses on ex-post compensation, the latter, building on the economic analysis of accident law (SHAVELL, 1987), addresses how exposing economic agents to liability may provide incentives for accident prevention. According to Faure (2016), the importance of liability rules as an instrument of pre-

vention has been increasingly supported by empirical evidence. A key challenge, however, in designing such liability regimes is to address both the growing requirement for compensation of damages caused to marine ecosystems, and the degree of financial security required by industrial sectors. There must be a balance of financial liability such that compensation payments do not prohibit the development of industrial activity (HAY and THÉBAUD, 2006). To advance the conversation on managing the economic consequences of currently unknown environmental impacts of deep-sea mining, we develop a simple typology of potential environmental impacts and draw on the literature from terrestrial mining and maritime shipping industries to show how other sectors have dealt with these impacts. We apply the framework to three financial mechanisms that address both the economic and financial consequences of uncertainty in the environmental impacts of deep-sea mining – environmental bonds, mutual insurance, and private insurance – and discuss trade-offs of each.

Three types of environmental impact: A framework for understanding unknown environmental risks

The deep-sea can seem an alien and ecologically unique place, but the environmental impacts and regulatory challenges that need to be addressed by regulators and deep-sea mining firms are likely not. Chief among these challenges is how to deal with the consequences of both known and unknown environmental damages that could be caused by deep-sea mining and carry an associated financial cost borne by either the regulator (and hence, society) or the firm or a combination of both. To clarify our discussion, we define environmental impacts of mining as the direct and indirect effects of mining operations on ecosystem function and on the associated ecosystem services (MA 2005).

The uncertainty associated with potential environmental consequences and the associated penalties that mining firms may face determine the degree to which these impacts can be regulated *ex ante*. When environmental impacts are not known in advance, society, deep-sea mining firms, and the industry as a whole may be left bearing the burden of unforeseen environmental consequences. Firms need to be prepared to deal financially with such consequences, especially if they can be held accountable *post facto*. Regulators also may need to recognize that there are limits to the financial liability of deep-sea mining firms in relation to the environmental impacts of their activities. This need is perhaps made greater given the attention to the Deepwater Horizon accident (JOYE, 2015) and a history of mining-related pollution on land. While the financial risks from environmental damage are not unique to deep-sea mining, what is unique is the high level of uncertainty surrounding the potential environmental impacts of commercial-scale deep-sea mineral extraction.

A framework can be useful to systematically draw lessons learned in similar, established industries and demonstrate the need for a variety of financial mechanisms that may

help address the economic consequences of unknown environmental impacts from deep-sea mining projects. We divide environmental impacts into three types based on what is known and unknown about these impacts, and each is amenable to different environmental regulations and financial tools. The three types of environmental impact are: (1) known impacts with known consequences; (2) known impacts with only partially known or unknown consequences; and (3) unknown impacts with unknown consequences.

Type 1 environmental impacts include those that have been historically documented and have known consequences, including environmental impacts onsite as well as potential offsite impacts beyond the mining area. Type 1 impacts are those upon which environmental permitting is usually based, and the consequences could in principle be financially quantified and regulated through *ex ante* royalties, payments, or taxes. Such regulatory mechanisms may be considered *ex ante* because they anticipate impacts and collect funds or provisions up-front for the forecasted consequence, as opposed to other mechanisms which collect funds following an impact and an *ex post* understanding of the nature of its consequence. An assessment of the economic payments for environmental impacts in this first type requires scientific data and an agreement on the metrics by which impacts could be measured. Due to the limited scientific understanding of the environmental impacts to the seafloor, no environmental impacts associated with deep-sea mining currently fall in this category. Thus, *ex ante* taxes and royalties may not be appropriate regulatory mechanisms for seafloor mineral extraction at this time. If the science is accurate, financial regulation for type 1 impacts should take into account all the permitted impacts. Thus, the only reason that pre-determined limits on environmental impacts would be exceeded would be due to negligence or non-compliance with agreed-upon mitigation measures, triggering litigation actions.

Type 2 environmental impacts are more difficult to plan for, given their inherent uncertainty, and leave even the most careful and conscientious regulators and firms at risk. For deep-sea mining, type 2 impacts include those associated with light and sound pollution that are known to be a part of mining and cannot be easily controlled, but for which the extent and nature of the impact is uncertain (Global Ocean Commission, 2013). Other type 2 impacts include habitat destruction, resuspension of mineral compounds in the water column, and siltation (Global Ocean Commission, 2013). The compensation for type 2 impacts could be settled *ex ante* through a social negotiation to balance the precautionary concerns of society with realistic financial liability rules for deep-sea mining firms. For instance, a firm would be required to remit payment that is assessed *ex post* should it exceed agreed-upon levels of environmental damage. This social negotiation would be evident in an environmental permit that stipulates requirements for full remediation or compensation for unanticipated damages beyond pre-determined limits to environmental damages (IDELHAKKAR and HAMZA, 2010). Such *post facto* actions could however prove costly to firms, hence

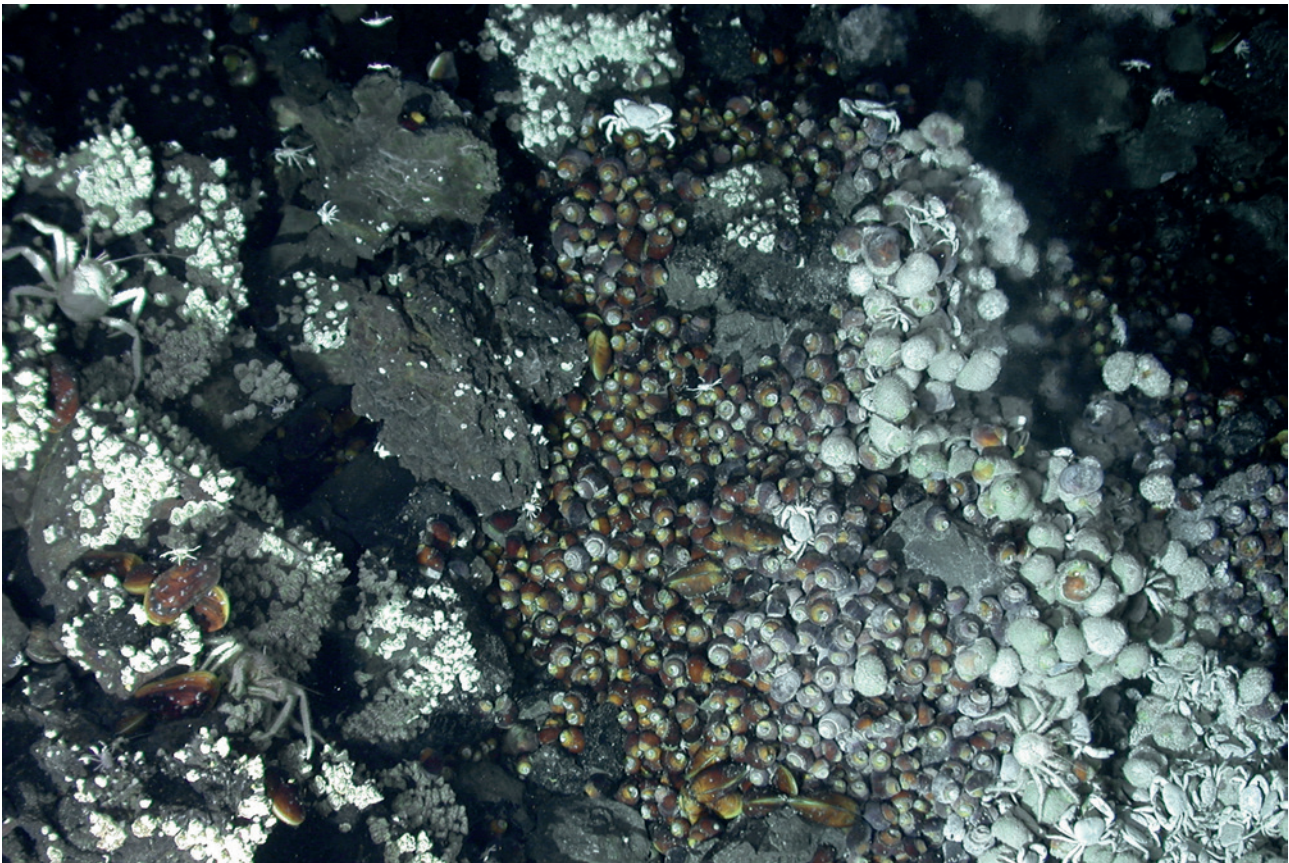


Figure 1 - An example of a habitat at risk if deep-sea mining were to take place at an active hydrothermal vent in the SW Pacific. Barncles, snails, mussels and crabs live in dense assemblages at depths of more than 2000 m (Photo courtesy of CL Van Dover and the Woods Hole Oceanographic).

creating a strong disincentive to invest in commercial mining operations.

The uncertainties associated with type 2 impacts will be resolved with experience and thus many type 2 impacts will become type 1 impacts as time progresses. As a result, environmental regulations, limits on acceptable impacts, and economic incentives for environmental compliance will likely have to be updated rapidly and continuously in the early years of mining. Any regulatory mechanism should consequently have an adaptive component until the impacts are better understood. Adaptive measures may argue for smaller areas of trial extraction while ensuring that monitoring systems are in place to enable improved measurement of environmental impacts. Scientific knowledge concerning these impacts from mining must also be simultaneously assessed and incorporated into regulation and management.

Finally, type 3 impacts include large-scale disasters, for which there is no precedent. The environmental consequences of the Deepwater Horizon disaster (JOYE, 2015) exemplify a type 3 impact. The inherent uncertainty associated with type 3 impacts imply difficulty in assessing an impact's consequence, including its magnitude and financial cost. Because these events are rare, by definition, regulators cannot learn by doing and thus will never be

able to set *ex ante* fees or charges. *Ex ante* environmental charges that may be appropriate for known environmental impacts with known consequences cannot be easily applied to type 3 impacts. As a result, firms may face the possibility of having to pay for costly remediation or compensation for unforeseen environmental damages.

If firms cannot or do not bear this burden, the regulator or society at large may be left with the burden of the economic, financial and environmental consequences associated with the impact either by suffering the loss of environmental quality or by paying for clean-up and remediation, as has been faced in the context of major oil spills (THÉBAUD *et al.*, 2006; HAY *et al.*, 2008). Much of the planning for and proposed regulation of deep-sea mining anticipates type 1 environmental impacts. If these represented the majority of environmental risks associated with mining, regulation would be a relatively straightforward process, involving multi-stakeholder negotiation and the design of adequate monitoring and enforcement systems. Instead, however, the current deep-sea mining sector is characterized by a preponderance of types 2 and 3 impacts that cannot be easily regulated and could be the source of very large economic and financial risks. Without mechanisms to deal with these risks, it is unlikely that deep-sea mining could proceed.

Three regulatory alternatives for managing types 2 and 3 environmental impacts

Terrestrial mining and maritime shipping have undertaken a variety of approaches to deal with the potential financial and economic consequences of types 2 and 3 environmental impacts. Taken in the context of established industries, we briefly describe how three such mechanisms – environmental bonds, private insurance, and mutual insurance – may be appropriate for deep-sea mining. Such an approach could guide the conversation of how to move forward with nascent seafloor mining operations in a dynamic way that would incorporate future scientific and environmental management advancements and would not necessarily create a liability gap or place undue burden on industry, regulators, or society at large.

Environmental bonds

Environmental bonds are based on the idea of strict liability in which the regulator would not need to prove a company liable for environmental damage, and the full or partial cost of environmental damage or remediation is delivered upfront. In some cases, there are provisions for funds to be returned to a mining entity in a pay-for-performance mechanism (sometimes known as performance bonds). Environmental bonds are prominent in the terrestrial mining industry, particularly for their use in setting aside funds to remediate environmental damage after a mine site is closed (WHITE *et al.*, 2012 ; SASSOON, 2008). The International Council on Mining and Metals (ICMM 2005) has published latest information on the difficulties of implementing this type of regulatory mechanism, particularly around estimating true financial cost of environmental remediation of closed mine sites.

Regulators may favor environmental bonds because this approach embeds processes for quickly accessing funds should an unforeseen environmental impact occur after mining has already begun. To fully cover all possible damages, environmental bonds may require an unfavorably high upfront payment on behalf of a firm. Such a bond would, however, provide an element of certainty around the coverage of potential costs for unknown environmental consequences (even if those impacts are not fully detected). To some firms, this certainty may be worth a potentially higher upfront fee that could be associated with a bond, while a high upfront fee may price other firms out of the market. Environmental bonds that emphasize flexibility in fit-for-purpose or context-driven solutions can provide time- and capital-sensitive support to accommodate for a variety of development plans and locations of deep-sea mining sites. For example, a phased or staged payment structure may help firms with fewer financial resources balance both economic and environmental responsibility needs. A flexible bond alternative also allows for incorporating the latest science as it becomes available.

For environmental bonds, if the unforeseen risk is underestimated, the regulator and thus society bear the burden of unforeseen environmental impacts that go beyond the scope of a bond. If risks are overestimated, then the

firm could end up paying more than is economically warranted. Performance bonds are a type of environmental bonds that would return funds to the firm if unforeseen environmental impacts are smaller or do not occur, thus reducing this risk to the firm, and if adequately set, providing an incentive for firms to limit the environmental impacts.

Private insurance

Private insurance is founded on a negligence-based system that relies on contracts to allocate risk (SCHÄFER and MÜLLER-LANGER, 2008, p. 23). Under these rules, insurance companies, a third party, would pay damages if their client, a deep-sea mining firm, is found responsible for environmental damage that occurs beyond permitted activities (FREEMAN and KUNREUTHER, 2003). While insurance is an *ex post* measure of remediation and negligence must be proven following an unanticipated (which may include accidental) environmental impact event, Boyer and Porrini (2008) argue that these measures, including *ex ante* premium payments and the monitoring required on the part of insurance companies, may likely stimulate upfront investment from the firm to minimize environmental impact and avoid having to pay *ex post*. In industries similar to deep-sea mining, such as terrestrial mining, environmental insurance is difficult to apply because the financial consequences of an impact are hard to quantify (SASSOON, 2008 ; KEMPTON *et al.*, 2010). Dechar JLT Mining (2014) argues that environmental liabilities are amplified in marine environments because the uncertain nature of the deep-sea mining industry and its impacts will likely attract few underwriters. Deep-sea mining firms may prefer to seek private insurance for type 2 impacts because of the minimal upfront financial burden; however, lack of historical data and economic values associated with deep-sea ecosystems may make insurers unwilling to underwrite such activities in the early stages. It may prove difficult to establish the *ex-ante* level of acceptable damages beyond which a firm's activity is deemed to be negligent, particularly in the case of type 2 environmental impacts. Moreover, it is unlikely that type 3 environmental impacts might be covered by a private insurance system, given the difficulty to assess the potential damages *ex ante*.

In the private insurance market, the risks are borne entirely by the insurer and the insured. If the firm overestimates environmental risk, then they may end up paying too much for insurance. On the other hand, if the private insurer underestimates risk, they bear the burden. The regulator and society at large do not bear a financial burden unless the private insurer fails to pay for damages, a situation which has been encountered in the case of oil spills at sea (see e.g. Hay and Thébaud, 2002 for an evaluation in the case of the Amoco Cadiz oil spill). The reason why insurers may fail to pay for damages can be related to the difficulty of establishing the actual level of damages caused by industrial activities. Such difficulty surrounds the measurement and ecological understanding of impacts on indirect use values and non-use values associated with marine ecosystem functioning (see Hay and Thébaud, 2006 for a discussion of this difficulty in the context of oil spills).

Mutual insurance

Mutual insurance is a form of co-managed, or mutual, insurance and is different from private insurance in that entities are co-insured. In maritime shipping, one vessel or ship owner contributes to an organization that insures the entire member group against a host of uncertain liabilities and is organized by a set of rules by which each member must abide (RONNEBERG, 1991; HAY *et al.*, 2008). In the event of damage, compensation payments that result from the activity of one of the group members can then be levied according to these pre-agreed rules. Also referred to as Protection & Indemnity Clubs, mutual insurance may align the incentives of deep-sea mining firms and regulators due to the pooling of financial resources and quick availability of funds following an impact. Asymmetry of information could exist in this scenario, however, where a single firm may withhold information about its environmental risk profile to the Protection & Indemnity Club that, in turn, would contribute to weaker regulatory oversight.

Mutual insurance may not be a long-term solution, however, if the environmental consequences of commercial-scale deep-sea mining turn out to be too costly and drain the mutual insurance plan too quickly. Indeed, within the international liability regime for damage caused by oil pollution from tankers, implementation of this type of liability system has been tightly linked with negotiations on maximum potential levels of financial compensation as well as the sharing of contributions to compensation payments between different stakeholders (namely ship owners in the P&I Clubs and cargo owners under the International Oil Pollution Compensation Fund). It has also involved detailed discussions on the nature of acceptable damages for compensation under the liability system (HAY *et al.*, 2008). Without agreement on such maximum potential levels, a large type 3 disaster could lead to the insolvency of the insurance pool for the entire industry. The conflict of interest inherent to industry-run programs could exacerbate tensions between economic solvency and environmental responsibility.

In mutual insurance, the financial burden of over- or underestimating potential risks is borne by the industry at large. This should encourage the transfer within the industry of technical knowledge about environmental mitigation methods and best practices. Society and the regulator only bear a financial burden if the mutual insurance fails to pay, or where maximum compensation limits are established that were under-estimated compared to actual impacts – an outcome that could threaten the viability of the industry as a whole.

Conclusion

While there is tremendous potential for economic gain by extracting mineral resources from deep-sea ecosystems, the lasting impacts to the environment may impose costs to many stakeholder groups. First to the firm in the case that *ex-ante* environmental payments negatively affect the profitability of a commercial-scale mining operation such that the industry does not develop. Second to regulators

and society should the financial responsibility of environmental risk management not fall appropriately with the firm and incentives for environmentally responsible operations prove ineffective.

Proper planning will be required in order to specify and identify the most appropriate financial mechanism, or combination of mechanisms, that provides adequate financial protection against unknown environmental impacts from deep-sea mining. A thorough study of how similar industries have implemented a variety of tools may be especially useful to regulators, such as the International Seabed Authority, as they deliberate a variety of enforcement mechanisms for exploitation regulations. Environmental managers, policymakers, and scientists may also find that studying the effectiveness of these regulations in successful environmental outcomes could contribute to environmental management guidelines. Firms, too, can learn from past experience in similar industries and incorporate these learnings into operational and environmental management planning.

Regulations must support both a profitable industry and ensure that ocean industrial development is managed for the benefit of future generations. This is a tall order, and in recognizing the existence of uncertainty, stakeholders can have a practical and structured discussion to develop dynamic financial and regulatory instruments that learn as we go and, over the long term, reduce a potential environmental liability gap and contribute to a sustainable blue economy.

Acknowledgement

We would like to thank Dr. Samantha Smith for her comments on an early draft and for her thought-leadership on the topics discussed in this paper.

Bibliography

- BOYER (M.) & PORRINI (D.), "The efficient liability sharing factor for environmental disasters: Lessons for optimal insurance regulation", *The Geneva Papers* 33, 2008, pp. 337-362. The International Association for the Study of Insurance Economics 1018-5895/08, www.palgrave-journals.com/gpp
- DECHAR (S.), *Deep-sea mining: The new frontier of mineral extraction*, JLT mining report 268849, 2014.
- FAURE (M.), "Attribution of liability: an economic analysis of various cases", *Chicago-Kent Law Review* 91 (2), 2016, pp. 603-635.
- FREEMAN (P. K.) & KUNREUTHER (H.), "Managing environmental risk through insurance", in: HENK FOLMER (T. T.) (ed), *Yearbook of environmental and resource economics*, Glos: Edward Elgar Publishing Limited, 2003, pp. 159-189.
- Global Ocean Commission, "Strengthening deep-seabed mining regulation", Policy options paper #5 of a series of papers on policy options, prepared for the third meeting of the Global Ocean Commission, November 2013. Retrieved

ved on 2016 November 28 from <http://eu-midas.net/sites/default/files/publications/GOC-paper05-seabed-mining.pdf>

HAY (J.) & THÉBAUD (O.), "Including ecological damage in the monetary valuation of oil spill impacts: an assessment of current practice", *Océanis* 32 (3/4), 2006, pp. 296-320.

HAY (J.), THÉBAUD (O.), PÉREZ (J.) & CARIOU (P.), *Les Enjeux économiques des marées noires*, Éditions Quae, Plouzané, 2008, 135 p.

HAY (J.) & THÉBAUD (O.), "Measuring the costs of oil pollution at sea: an analysis of the process of damage valuation and compensation following the Amoco Cadiz oil spill", in *Économie Appliquée* (4), 2002, pp. 159-195.

IDELHAKKAR (B.) & HAMZA (F.), "Oil/petrol shipment risk: Insurance contract between regulations and environmental policy", *Journal of Transportation Security* 3(4), 2010, pp. 245-256.

International Council on Mining and Metals (ICMM), Financial Assurance for Mine Closure and Reclamation. Published February 2005, by C. George Miller. Accessed on 22 February 2016 at <http://hub.icmm.com/document/282>

JOYE (S.), "Deepwater Horizon, 5 years on", *Science*, vol. 349, Issue 6248, 2015, pp. 592-593.

KEMPTON (H.), BLOOMFIELD (T. A.), HANSON (J. L.) & LIMERICK (P.), "Policy guidance for identifying and effectively managing perpetual environmental impacts from new hard rock mines", *Environmental Science & Policy* 13(6), 2010, pp. 558-566.

M.A. (Millennium Ecosystem Assessment) (2005), *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*, Island Press, Washington, DC.

RONNEBERG (N. J.), "An introduction to the protection & indemnity clubs and the marine insurance they provide",

University of San Francisco Maritime Law Journal 3:2, pp. (1-36), 1990-1991.

SASSOON, *Guidance notes for the implementation of financial surety for mine closure*, published by the World Bank Group Oil, Gas and Mining and Policy Division, 2008.

SCHÄFER (H. B.) & MÜLLER-LANGER (F.), *Strict liability versus negligence*. Published by Universität Hamburg Fachbereich Rechtswissenschaft, 2008, Retrieved on 2016 March 17 at http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2062787

SHAVELL (S.), *Economic analysis of accident law*, Cambridge (Massachusetts), London (England), Harvard University Press, 1987, 312 p.

BAKER (E.) & BEAUDOIN (Y.), SPC, *Deep-sea Minerals: Deep-sea Minerals and the Green Economy*, (Eds.), vol. 2 Secretariat of the Pacific Community, 2013.

THÉBAUD (O.), BAILLY (D.), HAY (J.) & PÉREZ-AGUNDEZ (J.), *The cost of oil pollution at sea: an analysis of the process of damage valuation and compensation following oil spills*, , 2006, In ALBINO PRADA BLANCO (E. M.) & XOSÉ VASQUEZ RODRIGUEZ (coord.) "Economic, social and environmental effects of the "Prestige" oil spill", *international scientific seminar, Santiago de Compostela, March 7-8th, 2003*, Consello da Cultura Galega, pp. 187-219.

IDELHAKKAR (B.) & HAMZA (F.), "Oil/petrol shipment risk: Insurance contract between regulations and environmental policy", *Journal of Transportation Security* 3(4) , 2010, pp. 245-256.

WHITE (B.), DOOLE (G. J.), PANNELL (D. J.) & FLOREC (V.), "Optimal environmental policy design for mine rehabilitation and pollution with a risk of non-compliance owing to firm insolvency", *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 56, 2012, pp. 280-301.

Les études d'impact de l'exploitation minière des grands fonds marins : une étape nécessaire, mais encore difficile

Par Jean-Damien BERGERON
Ronan LAUNAY
et Jean-Marc SORNIN
CREOCEAN

Outre le fait que la responsabilité éthique des exploitants de ressources minières en milieux profonds intacts soit engagée, les réglementations nationales (ZEE) et internationales (AIFM) leur imposent la rédaction d'études d'impact détaillées. Ces études doivent s'appuyer pour la description de l'état initial des sites sur des données fiables couvrant tous les compartiments de l'environnement marin (faune et flore, sédiments, colonne d'eau). Or, l'état des connaissances sur les grands fonds marins est encore très insuffisant.

L'évaluation des impacts d'une exploitation exige aussi d'avoir une bonne connaissance de ses *process* industriels, qui, pour la plupart, sont confidentiels et/ou sont en cours de développement. Les innovations en la matière doivent donc intégrer, dès l'origine, les préoccupations environnementales.

Les rares études d'impact disponibles sont tributaires de ces lacunes dans nos connaissances. Elles montrent bien la nécessité de recueillir un plus grand nombre de données environnementales et d'innover plus encore tant pour ce qui concerne les phases de prospection que les phases d'exploitation.

L'état de l'art

Alors que le potentiel des gisements profonds est l'objet d'un certain intérêt au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, certains États pionniers (États-Unis, Allemagne, Japon, Inde et un consortium européen) décident, dès les années 1970, de tenter d'évaluer les impacts environnementaux liés à l'exploitation de ces gisements (par exemple, le programme DOMES ⁽¹⁾ engagé en 1972 par la NOAA (États-Unis) et des opérations pilotes d'extraction minière dans le Pacifique nord-équatorial) ^{(1) (2)}. Ces études s'appliquent plus particulièrement à caractériser les panaches turbides et leurs incidences sur la faune benthique.

En 1994, l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) créée par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer commence à exercer ses prérogatives. Cette Autorité internationale a pour objectif de contrôler les activités

menées en haute mer et de préserver les grands fonds marins non soumis à une juridiction nationale. Bien que l'AIFM impose aux signataires de respecter des mesures d'évitement, de réduction et de gestion des pollutions pendant la phase exploratoire des gisements, aucune réglementation n'est encore clairement instaurée pour encadrer l'évaluation des impacts en phase d'exploitation commerciale ⁽³⁾.

En parallèle, une association de professionnels, l'*International Marine Minerals Society*, élabore (en 2001) un Code

(1) OZTURGUT (E.), LAVELLE (J. W.), STEFFIN (O.) & SWIFT (S. A.), Environmental Investigation During Manganese Nodule Mining Tests in the North Equatorial Pacific, 1980.

(2) SHARMA (R.), "Environmental Issues of Deep-Sea Mining", *Procedia Earth Planet Sci.* 11, 2015, pp. 204-211.

(3) MAHAPATRA (R.) & CHAKRAVARTY (A.), "Mining at deep sea", *Down to Earth* 1, 2014 : <http://www.downtoearth.org.in/coverage/mining-at-deep-sea-46049>

qu'elle propose à ses adhérents d'appliquer, sur la base du volontariat, à la gestion environnementale de leurs opérations minières marines ⁽⁴⁾. Ce Code est une initiative du PDG de la compagnie canadienne *Nautilus Minerals*, signataire d'un accord en 2014 avec la Papouasie-Nouvelle-Guinée pour procéder à la première extraction, sur de grands fonds marins, de minerais de cuivre, d'or et autres métaux précieux ⁽⁵⁾.

L'exploitation des ressources polymétalliques sous-marines devrait se heurter à des enjeux environnementaux majeurs. Les activités minières en milieu profond généreraient des impacts de différents niveaux sur l'environnement et sur la biodiversité, dont la destruction locale des habitats et des écosystèmes associés, ainsi que la perturbation du milieu (colonne d'eau et fonds) et de la diversité biologique sur une aire plus étendue et pour une durée bien supérieure à celle de l'exploitation proprement dite ⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾.

À ce jour, peu d'études d'impact traitant de l'ensemble des effets relatifs à l'exploitation de ressources minérales profondes ont été produites, ou lorsqu'elles existent, celles-ci ne sont pas encore accessibles au public. Dans la cadre du projet Solwara 1, une étude d'impact a été déposée en 2008 auprès du gouvernement de Papouasie-Nouvelle-Guinée conformément au *PNG Environment Act 2000* : elle est consultable librement ⁽⁸⁾.

La plupart des suivis de phases exploratoires sont eux aussi confidentiels ⁽⁹⁾.

Le contexte réglementaire

Les études d'impact dans la loi française

Le régime des études d'impact est encadré en France et dans sa zone économique exclusive (ZEE) par le Code de l'environnement. Après un premier ensemble de réformes opérées en 2011 sous l'impulsion du Grenelle de l'Environnement, le dispositif d'évaluation environnementale a été complété au cours de l'été 2016 par l'ordonnance n°2016-1058 du 3 août 2016. Outre le renforcement du contenu de l'étude d'impact (scénarios de référence, changement climatique, renforcement des mesures compensatoires...), cette réforme a également modifié le champ des projets et programmes soumis à une évaluation environnementale systématique ou à une évaluation réalisée au cas par cas. Apparaît ainsi, dans le tableau annexé à l'article R. 122-2 du Code précité (modifié par le décret n°2016-1110 du 11 août 2016), le cadrage de l'évaluation environnementale obligatoire pour les opérations d'extraction marine de minéraux : « 25° Extraction de minéraux par dragage marin ou fluvial – Projets soumis à évaluation environnementale – Extraction de minéraux par dragage marin : ouverture de travaux d'exploitation concernant les substances minérales ou fossiles contenues dans les fonds marins du domaine public, de la zone économique exclusive et du plateau continental. »

Les dispositions de ce décret modificatif s'appliqueront à tout projet soumis à évaluation environnementale, dont la première demande d'autorisation aura été déposée à compter du 16 mai 2017.

L'évaluation des impacts environnementaux hors ZEE

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) compte, parmi ses principales missions, celles de réglementer l'exploitation minière des grands fonds marins situés hors juridiction nationale (la région dite « la Zone », patrimoine commun de l'humanité) et de veiller à la préservation du milieu marin contre les effets nocifs des activités considérées, que ce soit au stade exploratoire ou à celui de l'exploitation. Elle y travaille par la mise en œuvre d'instruments juridiques, dont le Code d'exploitation minière, qui regroupe un ensemble détaillé de règles, de réglementations et de procédures élaborées par l'AIFM.

Inspirée de la notion fondamentale de protection du milieu marin énoncée par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, l'AIFM impose, dans le contrat qui la lie aux organismes souhaitant explorer ces grands fonds, un certain nombre de recommandations sur l'évaluation des impacts environnementaux de leurs activités. Ces recommandations sont publiées dans un document (ISBA/19/LTC/8 – voir la Figure 1 de la page suivante), dont la dernière version remonte à juillet 2013 (il a été produit à l'occasion de sa 19^{ème} session tenue à Kingston) ⁽⁹⁾.

Une liste des activités nécessitant une évaluation préalable de leurs impacts sur l'environnement a été établie, et la mise en œuvre d'un programme de surveillance pendant et après le déroulement de l'activité en question a été décidée ⁽⁹⁾. Deux décisions qui portent sur les points suivants :

- prélèvements à étudier à terre du point de vue de leur extraction et de leur traitement, si l'aire d'échantillonnage de chaque opération est supérieure à la limite fixée dans les recommandations propres à certaines ressources minérales ;
- utilisation de systèmes destinés à provoquer des perturbations au fond,
- essais des procédés et matériels de ramassage,
- activités de forage au moyen d'appareils de forage embarqués,
- échantillonnage de roches,
- prélèvements par traîneau, drague ou chalut épibenthique, à moins qu'ils ne soient autorisés pour des surfaces inférieures à la limite fixée dans les recommandations propres à certaines ressources minérales.

(4) *IMMS*, IMMS Code for Environmental Management of Marine Mining, 2011.

(5) *United Nations Environment Programme*, "Wealth in the Oceans: Deep sea mining on the horizon?", *Environ. Dev.* 12, 2014, pp. 50-61.

(6) *DYMENT (J.) & al.*, Les Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, *synthèse du rapport CNRS-Iframer*, juin 2014.

(7) *FOUQUET (Y.) & LACROIX (D.)*, Les Ressources minérales marines profondes. Étude prospective à l'horizon 2030, 2012.

(8) *Nautilus Cares. Solwara 1 Project*, Nautilus Cares 1, 2016 : <http://cares.nautilusminerals.com/irm/content/solwara-1-project.aspx?RID=339>

(9) *Commission juridique et technique de l'AIFM – Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des minéraux marins dans la Zone*, n°13-24714, 2013.



Commission juridique et technique

Distr. générale
1^{er} mars 2013
Français
Original : anglais

Dix-neuvième session
Kingston (Jamaïque)
15-26 juillet 2013

Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des minéraux marins dans la Zone

Émanant de la Commission juridique et technique

I. Introduction

1. Au cours de la prospection et de l'exploration des minéraux marins, l'Autorité internationale des fonds marins doit, entre autres tâches, établir et revoir périodiquement des règles, règlements et procédures en matière d'environnement afin de protéger efficacement le milieu marin des effets nocifs pouvant résulter d'activités menées dans la Zone; avec les États qui patronnent ces activités, elle leur

Figure 1 : Extrait du document ISBA/19/LTC/8 – Recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploration des minéraux marins dans la Zone ⁽⁹⁾.

Même si certains articles du document précité rappellent que les études menées pendant ces phases d'exploration devront alimenter l'évaluation des impacts de l'exploitation commerciale, cette deuxième phase souffre encore d'un manque de cadrage précis pour les zones hors ZEE.

Contenu de l'étude d'impact

Les exigences du Code de l'environnement sous réglementation française

Au sens de la réglementation française, le contenu de l'étude d'impact est encadré par l'article R.122-5 (modifié par le décret n°2016-1110) du Code de l'environnement. L'étude s'appuie principalement sur la construction et le renseignement de quatre grandes parties :

- la description du projet (nature des ouvrages, méthodologie des travaux, alternatives recherchées...),
- l'état initial du milieu : description des enjeux physiques, chimiques, biologiques et humains de l'environnement du projet,
- l'évaluation des impacts environnementaux : évaluation de la sensibilité du milieu et des impacts directs et indirects, à court comme à long terme, permanents et temporaires, positifs ou négatifs sur l'environnement du projet (notamment la population, la santé humaine, la biodiversité, les terres, le sol, l'eau, l'air, le climat, les biens matériels, le patrimoine culturel, y compris les aspects architecturaux et archéologiques, et le paysage),
- les mesures ERC (éviter, réduire, compenser) : préconisations de mesures d'évitement, de réduction et de

compensation, dès lors que l'évaluation préalable des impacts identifie des incidences probables liées au projet.

Suite au Grenelle de l'Environnement et, plus récemment, à la dernière ordonnance prise (celle de 2016), l'étude d'impact doit être complétée par de nouveaux éléments. Ainsi, par exemple, il est introduit une demande d'analyse comparative de l'évolution des aspects pertinents de l'environnement en condition de mise en œuvre du projet et en condition naturelle (c'est-à-dire sans réalisation du projet). L'approche de l'évaluation des incidences du projet sur le climat et de la vulnérabilité du projet au changement climatique apparaît également de manière explicite. Le cumul des incidences avec celles d'autres projets existants (ou seulement approuvés) doit être également examiné. Autre renforcement : depuis 2016, les mesures compensatoires doivent être détaillées et chiffrées, et leur impact mesuré. Les modalités de suivi des mesures et de leurs effets doivent également être définies.

Les préconisations de l'AIFM

Tout contractant auprès de l'AIFM doit intégrer dans son plan de travail concernant l'exploration de minéraux marins : a) des études pour la collecte de données de base, b) une surveillance afin d'éviter tout dommage à l'environnement et c) une surveillance pendant et après les essais des systèmes et des matériels de ramassage.

L'AIFM indique dans ses recommandations relatives à l'évaluation des effets en phase d'exploration ⁽⁹⁾ un ensemble d'impacts et de compartiments à considérer. Elle

rappelle notamment l'importance de procéder à l'évaluation des impacts sur l'environnement benthique, sur l'environnement pélagique et sur la couche d'interface benthique. Le périmètre d'étude est également étendu à une zone plus large que le périmètre d'exploration : « L'évaluation d'impact devra porter non seulement sur les zones directement touchées par l'extraction, mais aussi sur la région plus vaste touchée par les panaches à proximité du fond, le panache de rejets et les matières libérées par la remontée des minéraux à la surface de l'océan, en fonction de la technologie employée »⁽⁹⁾.

Le contractant doit également fournir à l'Autorité l'ensemble des éléments techniques (méthodologie) et le calendrier détaillé de son programme d'exploration. Il est également soumis à la définition d'une zone témoin d'impact et d'une zone témoin non impactée, où s'appliquent des mesures de surveillance afin de comparer l'impact des essais et les variations naturelles des conditions écologiques.

Les difficultés prévisibles

Confidentialité et propriété industrielle

Les informations techniques concernant les méthodes d'exploration sont à ce jour plus connues que ne le sont les techniques d'exploitation des ressources minérales profondes ; ces dernières restent en effet encore mal définies et dépendent notamment des informations communiquées par les entreprises et les États impliqués. La description du projet ou l'évaluation des solutions techniques alternatives peuvent dès lors s'avérer complexes en raison de la protection qui s'y attache en matière de propriété industrielle ou d'accords spécifiques de confidentialité. Une partie des acteurs clés de l'exploitation des ressources minières marines travaille à développer une certaine transparence en matière de données, que ce soit à l'initiative de l'AIFM, dans son travail actuel de cadrage réglementaire des opérations d'exploitation minière⁽¹⁰⁾, ou à celle de certains industriels⁽¹¹⁾.

Les lacunes dans les connaissances fondamentales et appliquées

Dans les écosystèmes profonds, la diversité des espèces associées aux ressources minérales est très grande et les compositions spécifiques varient fortement, en fonction des zones géographiques et de la nature de la ressource⁽¹²⁾. L'état des connaissances sur la biodiversité de ces écosystèmes s'est fortement amélioré ces vingt dernières années, grâce à de nouveaux moyens d'exploration⁽¹³⁾, mais il demeure encore très incomplet, et cela pose une difficulté majeure dans la description de l'état initial et des enjeux dans les études d'impact.

L'application de méthodes comparatives et/ou faisant appel à la simulation

Les activités minières en milieu profond entraîneront des impacts environnementaux dont l'aire incidente pourra varier en fonction de l'hydrodynamisme de la zone géographique (plaine abyssale, mont sous-marin ou ride médio-océanique), de la nature de la ressource minérale

(nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères ou amas sulfurés), des technologies utilisées pour l'exploration (outils de cartographie, d'imagerie acoustique du fond, de prélèvement) et pour l'exploitation (extraction du minerai, pompage, prétraitement, rejet des déchets miniers), ainsi qu'en fonction des écosystèmes en présence. Il est actuellement extrêmement difficile de simuler les relations/échanges pouvant exister entre ces différents compartiments.

Il n'est pas possible d'extrapoler les observations faites sur certains sites modèles à l'ensemble des écosystèmes concernés par l'exploitation, en particulier du fait des différences de temporalité entre les différents systèmes. Les méthodologies d'évaluation des conséquences écologiques et économiques des impacts environnementaux restent à mettre en place et à systématiser⁽¹³⁾.

L'identification de mesures préventives et le coût de leur mise en œuvre

L'identification et l'évaluation des mesures de protection, de préservation et de restauration des écosystèmes profonds impactés ne reposent sur aucune réglementation. La capacité de résilience des écosystèmes profonds est encore peu connue, mais certains suivis historiques réalisés le long de traces de chalutage ou d'extraction minière (par exemple) montrent une suppression presque totale de l'épifaune et un temps de recolonisation très lent⁽¹⁴⁾. Les mesures compensatoires actuellement envisagées sont majoritairement tournées vers la création d'aires marines protégées. Même si certaines propositions de mesures de restauration de sites hydrothermaux voient le jour⁽¹⁵⁾, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode définie de restauration écologique qui soit applicable à ces écosystèmes. L'aspect encore expérimental de l'approche de ces écosystèmes, les lacunes de nos connaissances à leur sujet et la variabilité des moyens à mettre en œuvre compliquent le chiffrage de ces mesures.

Les innovations à développer

L'exploitation des ressources minières des grands fonds fait émerger des enjeux technologiques forts.

Le développement de process industriels adaptés

Le développement des équipements et des techniques d'exploration et d'exploitation adaptés aux environne-

(10) ISA, Developing a Regulatory Framework for Mineral Exploitation in the Area, 2015.

(11) ECORYS, Study to investigate state of knowledge of Deep Sea Mining, 2014.

(12) RAMIREZ-LLODRA (E.) & al., "Deep, diverse and definitely different: Unique attributes of the world's largest ecosystem", *Biogeosciences* 7, 2010, pp. 2851-2899.

(13) DYMENT (J.) & al., Les Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, rapport CNRS-Ifremer, 2014.

(14) VANREUSEL (A.), HILARIO (A.), RIBEIRO (P. A.), MENOT (L.) & ARBIZU (P. M.), "Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna", *Sci. Rep.* 6-26 808, 2016.

(15) Coffey Natural Systems, Environmental Impact Statement: Nautilus Minerals Niugini Limited, Solwara 1 Project Volume A - Main Report. Nautilus Minerals Niugini, 2008.

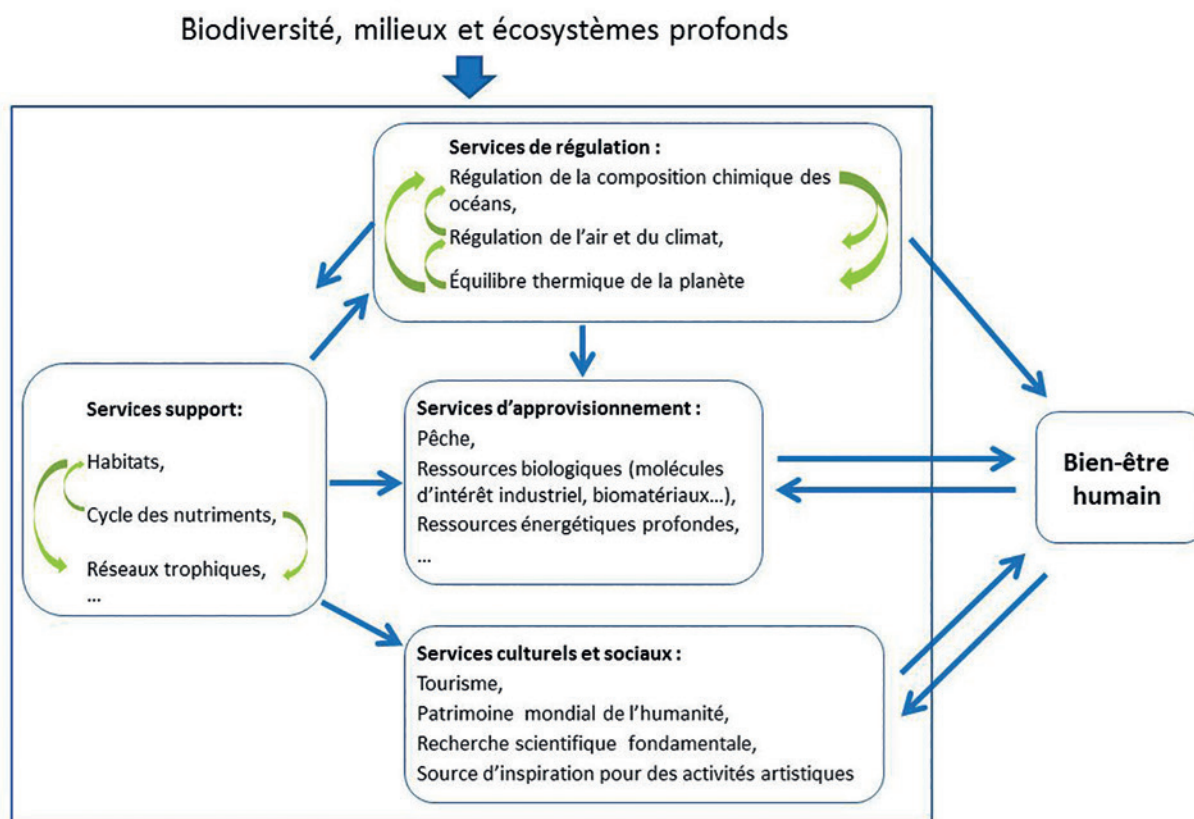


Figure 2 : Services écosystémiques rendus par la biodiversité, les milieux et les écosystèmes associés aux principales ressources minérales marines profondes et aux écosystèmes connexes – Source : Extrait du résumé exécutif du rapport d'expertise CNRS-Ifrremer, juin 2014 ⁽¹⁷⁾.

ments extrêmes des grands fonds est aujourd'hui une nécessité. Cependant, ce développement doit impérativement se dérouler en appliquant le principe de précaution environnementale nécessaire à la préservation de ces environnements sensibles et méconnus. Une évaluation des risques d'impact sur l'environnement doit donc être réalisée dès les premières phases de la conception des projets.

Outils et méthodes d'acquisition de données

La surveillance de l'impact environnemental de l'exploitation des ressources minières sous-marines implique le développement de techniques d'observation et de mesure ⁽⁷⁾.

De nouveaux outils permettant de conduire des stratégies d'exploration plus efficaces devront être mis au point, comme le développement de la détection acoustique et la marinisation de techniques géophysiques et d'analyses chimiques à réaliser *in situ*, à de grandes profondeurs et au plus près du fond. Certains de ces équipements, comme des sondes équipées de capteurs environnementaux basiques, devront être adaptés à des vecteurs, tels que les engins sous-marins autonomes (AUV) et les engins télé-opérés (ROV). Le projet MELODI (*Magnetic and ELectromagnetic Ore Detection*), porté par CREOCEAN, vise par exemple à développer des solutions efficaces d'exploration non intrusives et, de fait, garantes de l'intégrité

et de la préservation de l'environnement, tant à l'échelle régionale (détection) qu'à l'échelle locale (caractérisation), pour la localisation des amas sulfurés ⁽¹⁶⁾.

Ainsi, dans le cadre des technologies d'étude de sites et de l'évaluation des ressources et de la biodiversité, la bathymétrie, l'imagerie à ultra-haute résolution et les outils de forage carotté opérant directement sur le fond seront des outils de développement indispensables pour pouvoir affiner les explorations au niveau local et réaliser des prélèvements. Le développement des technologies de surveillance des environnements permettra de créer des outils spécifiques nécessaires pour établir des états de références biologiques et en suivre la variabilité temporelle.

Le développement de modèles numériques

Dans le système « Océan », les échanges entre les eaux de grandes profondeurs et le reste de l'océan sont encore mal connus. Les modélisations aux échelles locales

⁽¹⁶⁾ « Des meutes de drones sous-marins pour chercher des amas sulfurés », Mer et Marine – Toute l'actualité maritime 1, 2016 : <http://www.meretmarine.com/fr/content/des-meutes-de-drones-sous-marins-pour-chercher-les-amas-sulfures>

⁽¹⁷⁾ DYMENT (J.) & al., Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, résumé exécutif du rapport CNRS-Ifrremer, 2014.

et régionales ne sont pas fiables : elles sont pourtant nécessaires pour évaluer les impacts des perturbations tant à proximité du fond que dans la colonne d'eau. Le développement de modèles numériques intégrant les données acquises par les observatoires permettra de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes étudiés : il sera utile dans le cadre de la gestion, de la conservation et de la protection de ces écosystèmes ⁽¹³⁾.

Les évaluations écosystémiques

Les services écosystémiques (voir la Figure 2 de la page précédente) rendus par l'océan étant difficilement monétisables et les impacts environnementaux peu quantifiables, il est difficile de chiffrer les conséquences économiques

des impacts environnementaux. Les zones potentiellement affectées par l'extraction minière s'étendent du plancher océanique à la colonne d'eau jusqu'à la surface, et aussi à terre. Une méthodologie d'évaluation des conséquences économiques des impacts environnementaux reste donc à mettre en place et à systématiser.

Les services le plus susceptibles d'être impactés sont la pêche, à partir de - 400m de profondeur (rejet des déchets miniers en surface et dans la colonne d'eau) et le tourisme (observation des cétacés et des requins dans les zones à encroûtements ou à sulfures polymétalliques, tourisme d'aventure dans les grandes profondeurs, croisières au large d'îles proches de gisements miniers) ⁽¹³⁾.

La législation internationale encadrant l'accès aux ressources minérales marines

Par Élie JARMACHE

Chargé de mission au Secrétariat général de la Mer, membre de la commission juridique et technique de l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) ⁽¹⁾

Le droit minier international est d'abord maritime ; il se développe en mer, sur les fonds marins, là où aucune juridiction d'État ne s'exerce. Il existe donc un domaine minier maritime international relevant de la compétence d'une instance spécifique, l'Autorité internationale des fonds marins, dont la fonction principale – sinon exclusive – est de réglementer l'exploitation minière des grands fonds marins. Sont des opérateurs potentiels les États, des entreprises d'État, des sociétés privées, mais aussi une entité créée par le nouveau droit de la mer et dénommée l'Entreprise, qui est le prolongement commercial de l'Autorité. Les différentes phases de l'activité minière sont concernées : la prospection, l'exploration et l'exploitation. De même, à ce jour, trois types de ressources minérales font l'objet d'une réglementation internationale : les nodules et sulfures polymétalliques, et les encroûtements cobaltifères. S'il existe des points communs entre ce régime international et tout système de droit minier reconnu au plan national, il existe aussi des différences certaines, qui l'inscrivent dans une tout autre perspective.

L'accès aux ressources minérales marines repose sur un cadre juridique développé, voire sophistiqué, qui reproduit une hiérarchie de normes et de règles lui conférant une originalité qui mérite d'être relevée.

Au commencement, on trouve la mise en place des différents espaces maritimes qui voient se succéder la souveraineté des États, leurs droits souverains sur les ressources naturelles et sur toute activité à finalité économique, l'exercice de leur juridiction sur certaines activités (la recherche scientifique marine, par exemple). À l'énoncé de ces différentes compétences, on évoque ainsi la mer territoriale, la zone économique exclusive (ZEE) et le plateau continental. Puis l'on aborde le grand large, la haute mer, dont on a séparé les fonds marins internationaux pour lesquels on a créé un nouvel espace, la Zone, et un régime d'exception qui inaugure une forme d'appropriation internationale. Nul n'est propriétaire des ressources naturelles des fonds marins, mais cela ne signifie pas pour autant que le premier venu soit le premier à se servir. La liberté d'accès a vécu.

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) est le texte de base du régime juridique d'accès à ces ressources. La CNUDM comprend à cet égard une annexe III intitulée « Dispositions de base régissant la prospection, l'exploration et l'exploitation ». Cet

ensemble (la Convention et son annexe) doit être lu en tenant compte d'un acte intervenu en 1994, à quelques mois de l'entrée en vigueur de la CNUDM. En effet, à cette époque, une idée bien ancrée dans la communauté internationale était que cet accord de 1994, qui suspendait ou modifiait des pans entiers du régime minier international, était le prix politique à payer pour obtenir (enfin !) l'adhésion des États-Unis à la CNUDM. Il est vrai que l'intérêt américain s'est manifesté et exprimé à maintes reprises et de diverses façons, mais sans jamais aboutir à une adhésion formelle.

La Zone est définie dès l'article 1^{er} de la CNUDM : en trois paragraphes introductifs, le décor est planté. Les fonds marins et leur sous-sol, au-delà de la juridiction nationale, constituent la Zone. L'instance qui a en charge cet espace nouveau est désignée, l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM). Les activités menées dans cette Zone sont celles d'exploration et d'exploitation des ressources. Dès lors, tout le cadre juridique va devoir se déployer en tenant compte de cette introduction.

« La Zone et ses ressources sont le patrimoine commun de l'humanité », tel est le début du statut juridique

(1) Les opinions émises ici n'engagent que leur auteur.



Photo © UN photo/Milton Grant

Adoption par l'Assemblée générale des Nations Unies d'une résolution sur la participation universelle à la Convention sur le droit de la mer, le 6 décembre 1994.

« La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) est le texte de base du régime juridique d'accès aux ressources naturelles des fonds marins. »

(article 136). Il est précisé aussi que cette humanité, représentée par l'AIFM, est « investie de tous les droits sur les ressources de la Zone », étant ajouté que « ces ressources sont inaliénables ». Il y a lieu de retenir cette distinction opérée entre les ressources et les minéraux sur lesquels des droits sont reconnus : « le transfert des droits intervient lors de l'extraction » des minéraux (article 1, annexe III).

L'aliénation, entendue comme étant l'acquisition de droits sur les minéraux par un opérateur, est fortement liée au mécanisme par lequel l'accès aux ressources est rendu possible. C'est une procédure longue, comportant plusieurs étapes, qui débute par l'adoption de règlements spécifiques aux trois catégories de ressources minérales : le règlement « nodules polymétalliques » de juillet 2000, celui relatif aux sulfures, de juillet 2010, et celui qui est applicable aux encroûtements, daté de juillet 2012 (respectivement ISBA/6/A/18, ISBA/16/A/12 rev 1 et ISBA/18/A/11) ⁽²⁾. Ce qui est prescrit dans ces règlements est une déclinaison des dispositions de la CNUDM, de son annexe III et de l'accord de 1994 (qu'il convient de toujours lire ensemble).

La procédure débute par la présentation au Secrétaire général de l'AIFM d'un plan de travail portant sur une catégorie de ressource et ne concernant que sa phase

d'exploration. Le Secrétaire général en informe les États parties à la CNUDM (soit, à ce jour, 168 parties) et il transmet la demande à un organe spécialisé de l'AIFM, la Commission juridique et technique (CJT), qui est composée d'une trentaine de membres – des experts en droit, en économie et dans diverses disciplines scientifiques (la géologie, pour l'essentiel). Il y a des conditions habituelles que tout opérateur minier connaît bien, en particulier la nécessité de faire la preuve de sa capacité technique et financière à explorer les fonds marins.

Le programme de travail doit être assez explicite sur les moyens techniques : une description des équipements utilisés, l'indication du nombre de campagnes scientifiques en mer qui doivent permettre d'identifier la nature des données à recueillir et d'orienter les travaux d'exploration pour toute la durée de la mise en œuvre du plan, soit 15 ans. Dans la description de ses activités, le demandeur devra mettre l'accent sur la première période de 5 ans, et répéter cela pour les deux autres périodes quinquennales. Est prévue une clause de rendez-vous qui permet le contrôle de la bonne exécution du plan de travail. Mais ces mêmes rendez-vous peuvent jouer aussi au bénéfice

⁽²⁾ Les documents cités sont en ligne sur le site de l'AIFM : <https://www.isa.org.jm/mining-code/Regulations>

de l'opérateur, qui peut ajuster et adapter son plan initial, dès lors qu'il a de bonnes raisons de le faire.

Dans ces deux exemples, les équipements et les campagnes, les dépenses devront être présentées, ventilées, expliquées, car de cet exercice va dépendre la conviction de la CJT quant au sérieux du candidat à l'exploration, et donc sa décision de recommander ou non au Conseil de l'AIFM d'approuver le plan de travail. Lors de la présentation et de la défense de sa demande de plan de travail, le futur opérateur doit aussi indiquer la liste des personnels qui vont être impliqués dans la phase d'exploration. Cela doit permettre à la CJT de vérifier si, au-delà de la seule géologie ou de sa compétence technologique, l'équipe en charge de l'exécution du plan de travail comprend des experts en environnement capables d'assurer un suivi en ce domaine. Ce point-là s'est fortement imposé ces dernières années, et nul demandeur ne manque d'avoir dans sa liste des experts confirmés par leurs publications ou dirigeant des laboratoires au sein d'universités.

Une question s'est développée, au fil du temps, qui est devenue une obligation dont le respect est suivi de très près par la CJT, celle de la formation de candidats en provenance de pays en développement (des candidatures spontanées ou présentées par l'État pour ses ressortissants). Après une longue période de sommeil, durant laquelle la formation était restée *a minima*, les demandeurs ont su s'adapter à cette donnée et fournir une offre de formation diversifiée et de qualité. Le cas extrême est celui d'une entité offrant une bourse d'étude pluriannuelle du niveau du doctorat dans une université renommée de son pays. Le nombre de candidatures à la formation s'est accru de manière significative et la CJT a mis en place un groupe de travail pour en traiter. L'opérateur n'intervient pas dans le choix des candidats, sauf en amont en désignant les domaines dans lesquels il offre une formation. Il faut aussi souligner l'influence du système des Nations Unies, qui veut que la sélection des candidats tienne compte d'une répartition géographique équitable de ceux-ci (en respectant un équilibre entre les origines régionales des sélectionnés, par référence aux groupes régionaux onusiens).

La CNUDM a prévu le dispositif du plan de travail, dans son principe, à son article 153 intitulé « Système d'exploration et d'exploitation ». Est pertinent l'alinéa 3 de cet article, car, outre le fait qu'il indique que la demande doit être écrite et formelle et qu'il procède à un rappel du rôle de la CJT et de celui du Conseil, cet alinéa pose le principe que seule l'autorisation des activités donne une vie juridique à l'initiative d'un opérateur. Le plan de travail, une fois approuvé, devient un contrat d'exploration ou d'exploitation approuvé pour une durée de 15 ans. Ces deux phases sont bien distinctes. Et pour l'heure, seule l'exploration⁽³⁾ est concernée, du fait qu'aucune demande d'exploitation n'a été déposée à ce jour et que l'on reste en attente d'une réglementation relative à l'exploitation, qui prendra la forme d'un véritable Code minier, en cours d'élaboration⁽⁴⁾.

Au nombre des conditions requises pour déposer un plan de travail, avant son examen (en quelque sorte, des

conditions de sa recevabilité), le demandeur doit acquitter un droit fixe d'un montant de 500 000 dollars américains. L'examen du volet financier de toute demande peut aller assez loin ; ainsi, un demandeur qui indiquerait qu'il a recours à l'emprunt pour financer son plan de travail aura à produire une déclaration sur le montant et le taux d'intérêt de l'emprunt, ainsi que l'échéancier des remboursements.

Il devra aussi faire la preuve qu'il bénéficie du patronage de son État de nationalité ou de contrôle. Cette dernière condition est vérifiée scrupuleusement dès lors que le patronage comporte l'assurance des capacités financières du futur opérateur : il est l'amorce du régime de la responsabilité (au sens générique du terme) encourue en cas de dommage occasionné au milieu marin. Après quelques années de relative indifférence, et parce que l'on a constaté un accroissement des demandes patronnées par de petits États insulaires en développement, l'AIFM a demandé un avis juridique à la chambre spécialisée du Tribunal international du droit de la mer. Une des questions posées portait, précisément, sur le rôle de l'État de patronage et sur sa responsabilité.

Il s'agissait, certes, d'un avis consultatif, mais parce qu'il est le premier à avoir été rendu (le 1^{er} février 2011), cet avis a de fortes chances de produire des effets comme ayant dit le droit, ayant servi à le clarifier et à le fixer. Il précise les conditions qu'un État de patronage doit remplir dans son système juridique national pour être à jour de son obligation de contrôle⁽⁵⁾. Cette clarification apportée par l'avis permet de mesurer la portée des dispositions de la CNUDM elle-même sur ce thème (les articles 139 et 153, dont le § 4 dit que « les États aident l'Autorité en prenant toutes les mesures nécessaires pour assurer le respect des textes – convention, annexe, règlements, plan de travail »). Et, depuis cette date, l'AIFM a inscrit à son ordre du jour annuel, comme un sujet récurrent, la nécessité de faire le point sur les législations nationales des États relatives aux activités dans les fonds marins.

La question de l'État de patronage et de sa présence à l'exécution du futur contrat est loin d'être anodine. Outre le volet de sa responsabilité éventuelle, elle souligne ce en quoi le système international se distingue des modèles nationaux de réglementation de l'accès aux ressources

(3) Définie dans les règlements déjà mentionnés comme étant la recherche faisant l'objet de droits exclusifs et ayant pour but l'analyse du potentiel des gisements de ressources minérales, l'essai des procédés et des matériels en permettant l'exploitation et l'étude des facteurs économiques, environnementaux, techniques, commerciaux et autres. Le critère de différenciation est le passage à l'extraction, en vue de la phase commerciale.

(4) L'opération se révèle fort complexe ; elle doit être plus qu'un simple décalque des règles d'exploration, puisqu'il s'agit de saisir la période qui conduit de l'exploration à l'exploitation, cette dernière phase étant elle-même susceptible de comporter une phase d'extraction suivie de celle de la commercialisation, dans un contexte juridique et fiscal qui n'est pas celui des systèmes miniers nationaux.

(5) Pour la France, cela a conduit à insérer dans une ordonnance sur les espaces maritimes adoptée le 7 décembre 2016 un article prévoyant cette obligation de contrôle.

minérales. En fait, on voit ici à l'œuvre un système de cogestion des ressources minérales impliquant non seulement l'AIFM, mais aussi la communauté des États parties, et en particulier ceux dont l'un des opérateurs est un ressortissant ou qui est placé sous son contrôle effectif (tout changement de nationalité ou de modalité de contrôle doit être signalé à l'AIFM).

Pour bien saisir quel est l'enjeu de cet accès aux ressources minérales à travers des conditions que l'on pourrait trouver tatillonnes et bureaucratiques, il est recommandé de lire l'article 150 de la CNUDM intitulé « Politique générale relative aux activités menées dans la Zone », dont l'exégèse va bien au-delà des limites de notre analyse. Cet article 150 s'ouvre sur l'énoncé d'un objectif assez clair : favoriser le développement harmonieux de l'économie mondiale, la promotion de la coopération internationale et avoir le souci du développement des pays en développement.

Pour se persuader d'être face à ce qui s'appellerait de nos jours « gouvernance », l'article 151 décrit ce que devrait être une politique en matière de production. La tonalité plutôt planificatrice et dirigiste des dispositions de cet article, entre autres choses, a été neutralisée par l'accord d'application de la CNUDM de 1994. Sa section 6, qui porte le même titre (« Politique en matière de production »), déclare les § 1 à 7 et 9 de l'article 151 non applicables. Dans le même mouvement, il est indiqué que s'appliquent les accords du GATT et ceux qui lui ont succédé (OMC), entraînant une interdiction des subventions pour les activités conduites dans la Zone : « La mise en valeur des ressources de la Zone doit se faire conformément aux principes d'une saine gestion commerciale ». C'est ainsi que s'ouvre cette section 6. C'est quasiment une réécriture de la CNUDM, qui aura son importance quand le projet de Code minier abordera la phase commerciale correspondant à l'exploitation.

Sans chercher à être exhaustif, dans le cadre restreint de cet article, il convient néanmoins de signaler une particularité de ce droit minier international : l'existence de secteurs dits réservés constitués de secteurs résultant de la division en deux du périmètre d'origine, une division opérée par l'opérateur sur la base d'une valeur estimative commerciale suffisante pour permettre deux opérations d'extraction. Le choix entre les deux parties ainsi constituées n'est pas entre les mains de l'opérateur, il est le fait de la CJT, qui recommande au Conseil le secteur qu'il faut attribuer au demandeur et celui qui aura le statut de secteur réservé.

En effet, il s'agit bien d'un statut, au sens juridique de ce terme. La superficie ainsi soustraite à la demande d'origine n'est pas réintégrée à la Zone. Elle est destinée à satisfaire une demande à venir de l'Entreprise et, en cas de renoncement de cette dernière, celle d'un État en développement. Certains opérateurs ont su trouver le moyen de contourner cette règle en incitant un État en développement à présenter un plan de travail sur le secteur réservé qu'ils venaient d'abandonner, contraints par la règle, tout en encadrant de très près cet État. Cela n'est pas

passé inaperçu lors de l'examen par la CJT du dossier portant sur le secteur réservé présenté par un État en développement. Elle n'a pu que marquer son impuissance à refuser le plan, mais n'a pas manqué de signaler cette novation dans son rapport au Conseil. Pour clore sur une note plus positive : si, après 15 ans, un secteur réservé est toujours en jachère, l'opérateur qui était à l'origine de sa constitution serait alors en situation de l'inclure dans un nouveau plan de travail en matière d'exploration ⁽⁶⁾.

Ainsi est brossé dans ses grandes lignes le cadre de l'accès aux ressources minérales des fonds marins internationaux. Le plan de travail, une fois approuvé, se transforme en un contrat d'une durée de 15 ans, signé entre l'opérateur et l'AIFM (représentée par son Secrétaire général).

Le contrat confère un titre par lequel le titulaire bénéficie de la garantie de droits exclusifs d'exploration pour une catégorie de ressource et pour un secteur géographique bien définis. Il est ainsi protégé contre tout empiètement sur ce secteur par un autre opérateur (dont une demande ultérieure portant sur le même espace, mais sur une autre catégorie de ressource, ne saurait être examinée). Le contractant a dès lors l'obligation d'exécuter de bonne foi son plan de travail, tel qu'il a été présenté à la CJT et approuvé par le Conseil. Pour s'en assurer, l'AIFM impose une obligation, elle aussi connue du monde minier, celle de l'élaboration d'un rapport annuel ⁽⁷⁾. Dans les méthodes de travail de la CJT et dans son ordre du jour, cet exercice annuel est devenu l'occasion de vérifier, de manière attentive, le niveau des dépenses annuelles (lesquelles doivent être certifiées par un agent comptable), la réalité des essais et des campagnes en mer, la conduite de tests miniers, l'adoption de mesures de protection du milieu marin et les actions de formation réalisées.

Tant que le nombre des contractants restait peu élevé, la charge de travail était supportable. Mais l'augmentation sensible, en quelques années, du nombre de contrats (27, au dernier recensement) ⁽⁸⁾ a conduit l'AIFM à instaurer une taxe qui correspond aux frais généraux d'administration et de supervision des contrats d'exploration, ainsi qu'aux coûts de cet examen annuel, une taxe dont le montant est fixé à 47 000 dollars (US) ⁽⁹⁾. Cette taxe est due chaque année lorsque le contractant adresse son rapport annuel à l'AIFM.

En 2015-2016, l'AIFM a connu une fin de cycle « historique », puisque les contrats de première génération por-

(6) Le mécanisme des secteurs réservés se retrouve, dans son principe, dans les trois règlements, mais avec des différences dans sa mise en œuvre ; si le demandeur opte pour une participation au capital d'une entreprise conjointe participant de manière effective à la phase de l'exploitation, alors il n'y a pas de recours au secteur réservé (règlement Cobalt).

(7) À ce rapport annuel s'ajoute l'obligation de fournir un rapport à l'issue de la période de 5 ans qui vient de s'achever, un rapport qui comporte aussi l'annonce de ce qui sera entrepris au cours des 5 années suivantes.

(8) On trouvera en annexe une liste des contractants répartis par ressource, avec l'indication des aires maritimes correspondant à l'emplacement des sites.

(9) ISBA/19/A/12 du 25 juillet 2013.

tant sur les nodules sont arrivés à expiration au bout de 15 ans. La suite logique attendue était de voir des contractants impatients se déclarer prêts à passer à l'exploitation. Ce fut tout le contraire, chaque contractant exprimant de bonne foi son incapacité à le faire dès lors que les circonstances économiques et l'état du marché des métaux ne se prêtaient pas à ce passage. Les contractants ont fort logiquement demandé la prorogation de leurs contrats d'exploration. Cela fut accordé, non sans donner lieu à de longs débats, pour une période de 5 ans, avec le même cortège de conditions : le certificat de l'État de patronage, l'obligation d'une offre renouvelée de la formation, le plan de travail revu et mis à jour.

On ne saurait conclure cette présentation, nécessairement incomplète tant la matière est riche, complexe et détaillée, avec un droit minier se situant aux confins de l'appréciation politique, sans évoquer l'effort sans précédent en droit positif engagé par l'AIFM pour établir des règles de protection de l'environnement. Parce qu'elle traite d'exploration aujourd'hui et qu'elle traitera, le mo-

ment venu, d'exploitation, l'action et l'image de l'AIFM sont méconnues et brouillées. Les ONG qui ont le procès facile dès lors que l'on parle de mines, surtout marines, à explorer puis à exploiter, devraient se pencher sur tous les textes produits par l'AIFM et sur la façon dont elle cherche à en assurer le respect. Ce faisant, l'AIFM enrichit le droit minier international par une dimension environnementale certaine que beaucoup d'autres organisations peuvent lui envier.

On peut lui rendre justice, en reprenant à son propos ce qui se disait sur la réforme du Code minier français : « si la question est celle de savoir si le Code minier est soumis au droit de l'environnement, la réponse est, incontestablement : oui ! »⁽¹⁰⁾.

(10) TUOT (Thierry), « La Réforme du Code minier », interview, Droit de l'environnement, n°212, mai 2013, p. 163.

ANNEXES

A – Contrats d'exploration des nodules polymétalliques

	Contractant	Date d'entrée en vigueur	État(s) patronnant(s)	Emplacement général de la zone d'exploration	Date d'échéance
1	Organisation mixte Interoceanmetal	29 mars 2001	Bulgarie, Cuba, Fédération de Russie, Pologne, République tchèque et Slovaquie	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	28 mars 2016
2	Yuzhmoregeologiya			Zone de fracture de Clarion-Clipperton	28 mars 2016
3	Gouvernement de la République de Corée			Zone de fracture de Clarion-Clipperton	
4	Association chinoise de recherche/développement concernant les ressources minérales des fonds marins	22 mai 2001	Chine	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	21 mai 2016
5	Deep Ocean Resources Development	20 juin 2001	Japon	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	19 juin 2016
6	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	20 juin 2001	France	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	19 juin 2016
7	Gouvernement indien	25 mars 2002		Bassin central de l'océan Indien	24 mars 2017
8	Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles	19 juillet 2006	Allemagne	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	18 juillet 2021

	Contractant	Date d'entrée en vigueur	État(s) patronnant(s)	Emplacement général de la zone d'exploration	Date d'échéance
9	Nauru Ocean Resources Inc.	22 juillet 2011	Nauru	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	21 juillet 2026
10	Tonga Offshore Mining Limited	11 janvier 2012	Tonga	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	10 janvier 2027
11	Global Sea Mineral Resources NV	14 janvier 2013	Belgique	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	13 janvier 2028
12	UK Seabed Resources Ltd.	8 février 2013	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	7 février 2028
13	Marawa Research and Exploration Ltd.	19 janvier 2015	Kiribati	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	18 janvier 2030
14	Ocean Mineral Singapore Pte Ltd.	Signé à Kingston le 15 janvier 2015 et à Singapour le 22 janvier 2015	Singapour	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	21 janvier 2030
15	UK Seabed Resources Ltd.	29 mars 2016	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	28 mars 2031
16	Cook Islands Investment Corporation	15 juillet 2016	Iles Cook	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	14 juillet 2031
17	China Minmetals Corporation	Signature imminente (fin 2016 ou début 2017)	Chine	Zone de fracture de Clarion-Clipperton	

B – Contrats d'exploration de sulfures polymétalliques

	Contractant	Date d'entrée en vigueur	État(s) patronnant(s)	Emplacement général de la zone d'exploration	Date d'échéance
1	Association chinoise de recherche/développement concernant les ressources minérales des fonds marins	18 novembre 2001	Chine	Dorsale sud-ouest indienne	17 novembre 2026
2	Gouvernement de la Fédération de Russie	29 octobre 2012		Dorsale médio-atlantique	28 octobre 2027
3	Gouvernement de la République de Corée	24 juin 2014		Dorsale centrale indienne	23 juin 2029
4	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	18 novembre 2014	France	Dorsale médio-atlantique	17 novembre 2029
5	Gouvernement indien	26 septembre 2016		Dorsale indienne	25 septembre 2031
6	Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles	6 mai 2015	Allemagne	Dorsale centrale indienne et dorsale sud-est indienne	5 mai 2030

C – Contrats d'exploration des encroûtements cobaltifères riches en ferromanganèse

	Contractant	Date d'entrée en vigueur	État(s) patronnant(s)	Emplacement général de la zone d'exploration	Date d'échéance
1	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation	27 janvier 2014	Japon	Océan Pacifique occidental	26 janvier 2029
2	Association chinoise de recherche/ développement concernant les ressources minérales des fonds marins	29 avril 2014	Chine	Océan Pacifique occidental	28 avril 2029
3	Ministère russe des Ressources naturelles et de l'environnement	10 mars 2015		Monts Magellan (océan Pacifique)	9 mars 2030
4	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais S.A.	9 novembre 2015	Brésil	Seuil du Rio Grande (océan Atlantique Sud)	8 novembre 2030

EXTRAPLAC : les enjeux, pour la France, de son plateau continental

Par Walter R. ROEST

Ifremer et membre de la Commission des limites du plateau continental ⁽¹⁾

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, adoptée en 1982 et ratifiée par la France en 1996, attribue aux États côtiers des droits souverains s'étendant en mer jusqu'à 200 milles nautiques (M) des côtes (environ 370 km), c'est la Zone économique exclusive. L'article 76 de la Convention stipule que si le prolongement naturel du territoire terrestre d'un État s'étend au-delà de cette limite, ledit État peut revendiquer une extension de son plateau continental jusqu'à 350 M, voire au-delà dans certaines conditions. Mais encore faut-il être en mesure de prouver que le plateau continental s'étend aussi loin. Pour cela, la France a mis en place, en 2002, le programme national EXTRAPLAC (EXTension RAisonnée du PLATEAU Continental), qui est chargé de constituer les dossiers scientifiques et techniques démontrant cette extension au large des territoires de la métropole et des collectivités de l'Outre-mer, et de les soutenir voire de les défendre devant la Commission des limites du plateau continental, auprès de l'ONU (à New York). À travers ce programme, la France répond aux importants enjeux de l'extension de son plateau continental, dont, entre autres, l'accès aux ressources naturelles, la protection de l'environnement, la recherche scientifique et la stratégie géopolitique. Bien que s'inscrivant dans un contexte juridique et diplomatique, la démarche du programme EXTRAPLAC reste avant tout scientifique.

Introduction

Les océans couvrent plus de 70 % de la surface de notre planète bleue. Savoir à qui appartiennent les océans – et surtout à qui appartiennent les ressources naturelles qui se trouvent dans l'eau, sur les fonds marins et dans leurs sous-sols – est donc un enjeu important. Jusqu'au XX^e siècle, c'est le principe de la liberté qui prédominait sur les océans, ce qui favorisait les États les plus forts, ceux qui avaient la capacité de se défendre et d'en exploiter les ressources. Au sortir de la Seconde guerre mondiale, les choses ont évolué de manière significative, notamment avec la Déclaration Truman ⁽²⁾ proclamée en 1945 par le président des États-Unis de l'époque, Harry S. Truman. Cette déclaration a introduit la notion de droits souverains sur les ressources naturelles du plateau continental contigu aux côtes des États-Unis, en considérant que ce plateau continental constitue l'extension de la masse terrestre de ce pays.

De la Déclaration Truman à la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer

Au-delà de la notion de prolongement naturel du territoire terrestre, que l'on retrouvera plus tard dans l'article 76 de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, la

Déclaration Truman mérite également qu'on lui accorde une attention particulière, car elle introduit l'obligation pour l'État côtier de conserver et d'utiliser avec prudence les ressources naturelles de son plateau continental.

Pour rédiger ce texte, Truman est parti d'un certain nombre de postulats. On notera tout d'abord que le gouvernement des États-Unis d'Amérique, conscient de la nécessité de garantir à son pays un accès durable aux nouvelles sources de pétrole et d'autres minéraux, estime, au sortir de la Seconde guerre mondiale, que les efforts visant à découvrir et à constituer de nouvelles réserves devraient être encouragés.

À l'époque, les experts compétents sollicités par Truman indiquent que ces ressources se trouvent en grande partie sur et sous le plateau continental, au large des côtes des États-Unis d'Amérique. Bien que les progrès

(1) Les opinions exprimées sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les vues de la Commission des limites du plateau continental.

(2) Citation : Harry S. Truman : "Proclamation 2667 – Policy of the United States With Respect to the Natural Resources of the Subsoil and Sea Bed of the Continental Shelf", September 28, 1945. Online by Gerhard Peters and John T. Woolley, The American Presidency Project: <http://www.presidency.ucsb.edu/ws/?pid=12332>

Photo © RUE DES ARCHIVES/Everett



Portrait de Harry Truman réalisé par Greta Kempton ; portrait qui servit à la réalisation de l'affiche officielle de la campagne présidentielle de 1948, qui vit la réélection de Harry Truman à la présidence des États-Unis.

« La déclaration du président des États-Unis, Harry S. Truman, en 1945, introduit la notion de droits souverains sur les ressources naturelles du plateau continental contigu aux côtes des États-Unis ; une déclaration qui fait évoluer de manière significative un droit des ressources marines jusqu'alors dominé par le principe de la liberté d'exploitation. »

technologiques ne permettent pas encore leur utilisation, ils estiment que l'exploitation de ces ressources devrait pouvoir être possible dans un futur proche. Le droit souverain des États-Unis sur ces ressources est considéré comme nécessaire dans l'intérêt de leur conservation et de leur utilisation prudente, dès lors que leur exploration et leur exploitation deviennent une réalité.

Enfin, selon le gouvernement des États-Unis, l'exercice de la juridiction sur les ressources naturelles du sol et sous-sol du plateau continental par la nation contiguë est raisonnable et juste, et ce pour plusieurs raisons :

- l'efficacité des mesures d'utilisation ou de conservation de ces ressources serait subordonnée à la coopération et à la protection depuis la côte ;
- le plateau continental peut être considéré comme une extension de la masse terrestre de la nation côtière, et s'y rattache donc naturellement ;
- ces ressources forment souvent un prolongement en mer des ressources trouvées sur le territoire terrestre ;
- enfin, la nation côtière, pour se protéger, doit aussi effectuer une surveillance étroite des activités d'exploitation de ces ressources au large de ses côtes.

Sur la base de ces constats, la Déclaration Truman indique : « Ayant le souci de l'urgence de la conservation et de l'utilisation prudente de ces ressources naturelles, le gouvernement des États-Unis considère les ressources naturelles du sol et du sous-sol du plateau continental [situés] sous la haute mer, mais contigus aux côtes des États-Unis, comme appartenant aux États-Unis et soumises à sa juridiction et à son contrôle ».

Dans les cas où le plateau continental s'étend sur les rives d'un autre État, ou s'il est partagé avec un État voisin, la limite est déterminée par les États-Unis et par l'État concerné conformément à des principes équitables. Le caractère de haute mer des eaux se trouvant au-dessus du plateau continental et le droit d'y naviguer librement et sans entrave ne sont de ce fait en aucune façon affectée.

Dès lors, des États commencent à se doter d'une zone protégée afin d'assurer la protection des ressources naturelles de leur plateau continental. Ainsi, en 1950, le Pérou et le Chili affirment des revendications territoriales sur le Pacifique, dont ils sont riverains, et ce, jusqu'à 200 milles de leurs côtes. La CEE (la future Union européenne) adoptera, quant à elle, en 1977, une zone de pêche exclusive de 200 milles. D'autres pays suivront, avec leurs propres déclarations.

Pour mettre de l'ordre dans ces revendications et dans les conflits qu'elles ont pu engendrer, un nouveau régime juridique est instauré après de longues négociations par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (dite Convention de Montego Bay) du 10 décembre 1982. Elle est entrée en vigueur le 16 novembre 1994 et a été ratifiée, à ce jour, par près de 170 pays, dont la France. Elle est également reconnue comme exprimant le droit international coutumier par beaucoup des États non signataires. Ironie du sort, les États-Unis figurent parmi les États non signataires.

Le plateau continental

L'article 76 de la Convention définit le plateau continental ainsi : « Le plateau continental d'un État côtier comprend les fonds marins et leur sous-sol au-delà de sa mer territoriale, sur toute l'étendue du prolongement naturel du territoire terrestre de cet État jusqu'au rebord externe de la marge continentale, ou jusqu'à 200 M des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, lorsque le rebord externe de la marge continentale se trouve à une distance inférieure ».

La définition juridique du plateau continental recouvre ainsi une double notion : soit son étendue est basée sur un simple critère de distance (200 M) à partir des côtes, soit elle peut aller au-delà des 200 M en se fondant sur la notion de prolongement naturel de terres émergées. Au-delà des plateaux continentaux des États côtiers commence la Zone internationale, dont les ressources du sol et du sous-sol constituent le patrimoine commun de l'humanité, lequel est géré par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM).

Mais encore faut-il prouver que le plateau continental s'étend bien au-delà des 200 M. Une commission *ad hoc*,

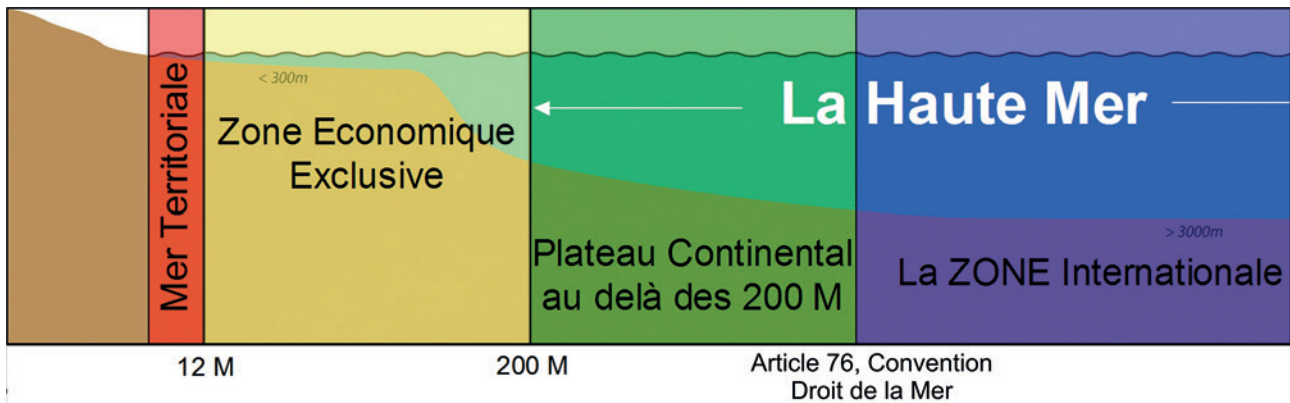


Figure 1 : Les différentes zones définies par la Convention mises en évidence sur une coupe montrant le relief depuis la terre (à gauche, au dessus du niveau de la mer qui est à 0 m d'altitude) jusqu'aux grands fonds. La mer territoriale s'étend jusqu'à 12 milles marins (M) des côtes, la zone économique exclusive jusqu'à 200 M et la limite extérieure du plateau continental au-delà des 200 M doit, quant à elle, être établie conformément à l'article 76 de la Convention.

la Commission des limites du plateau continental ⁽³⁾ a été créée auprès de l'ONU pour examiner les preuves fournies par les États, lesquelles peuvent être de nature scientifique et/ou technique.

Afin de répondre aux exigences de la Convention, la France a lancé, en 2002, le programme EXTRAPLAC (EXTension RAisonnée du PLATEAU Continental) ⁽⁴⁾.

Le but de ce programme est d'acquérir des données scientifiques et techniques en soutien des dossiers portant sur toutes les zones françaises où le plateau continental peut s'étendre au-delà de 200 milles marins à partir des côtes et de déposer et de défendre ces dossiers auprès de la Commission (cela devait être fait au plus tard en mai 2009).

Le budget global du programme était établi à 18 millions d'euros pour la période de 2002 à 2009, lequel a été complété par un important apport en nature des partenaires de l'État. En 2009, 4 millions d'euros supplémentaires ont été accordés afin de poursuivre la présentation et la défense des dossiers devant la Commission, à New York, et ce, jusqu'en 2018.

Le programme EXTRAPLAC est piloté par un Comité de pilotage, dont les travaux sont coordonnés par le Secrétariat général de la Mer. Ce comité comprend des représentants des ministères concernés. Un groupe de projet est chargé de la maîtrise d'œuvre. Ce groupe, dont la direction a été confiée à l'Ifremer, comprend des représentants de cet organisme, du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) qui assure la gestion de la ligne budgétaire de financement du programme), le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) et les Instituts IFP Énergies Nouvelles (IFPEN) et IPEV (Institut polaire français Paul-Émile Victor).

Afin de démontrer le prolongement naturel depuis le territoire terrestre, le programme EXTRAPLAC a effectué une vingtaine de campagnes d'acquisition de données en mer avec les navires de la flotte océanographique fran-

çaise, accumulant ainsi plus de 360 jours de présence en mer, dans tous les océans. Les données nécessaires à la démonstration du prolongement naturel sont de nature bathymétrique (la profondeur de l'eau), géophysique (caractère et évolution géodynamique des fonds marins et du sous-sol) ou encore géologique (échantillonnage des roches pour en déterminer la composition et l'âge).

Lorsque le contexte s'y prêtait, les travaux ont été réalisés en collaboration étroite avec les États voisins. Cela a été notamment le cas avec l'Afrique du Sud pour le dossier concernant l'archipel de Crozet, dans l'Océan Indien. Une déclaration conjointe est venue concrétiser la volonté des deux pays ⁽⁵⁾ de renforcer leur coopération scientifique et technique sur la question du plateau continental :

« Comme exemple de cette volonté, la France et l'Afrique du Sud prépareront, puis déposeront une demande conjointe d'extension de leur plateau continental respectif au large des îles sud-africaines de Marion et Prince Edouard et de l'archipel français de Crozet, auprès de la Commission des limites du plateau continental, conformément à l'article 76 de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer. Si cette démarche conjointe aboutit, l'Afrique du Sud et la France deviendront des pays voisins disposant d'une frontière maritime commune ».

Suite à plusieurs campagnes d'acquisition de données en mer réalisées par une équipe conjointe, la demande commune d'extension de leur plateau continental respectif était déposée par les deux pays en 2009 (l'examen de cette demande par la Commission précitée est en cours).

Depuis 2006, la France a déposé dix dossiers d'extension auprès de la Commission, dont trois dossiers conjoints avec des États voisins. À ce jour, elle a reçu cinq recom-

(3) http://www.un.org/depts/los/clcs_new/clcs_home.htm

(4) <http://www.extraplac.fr/>

(5) Déclaration conjointe du 28 février 2008, des présidents Nicolas Sarkozy et Thabo Mbeki après leur entretien lors de la visite d'État du président français en République d'Afrique du Sud.



L'un des quatre navires océanographique hauturiers de l'Ifremer, L'Atalante, dans le port de Papeete (Tahiti, Polynésie française) en 2015.

mandations de la Commission. Quatre décrets (n°1180 à 1183) publiés le 25 septembre 2015 fixent les limites extérieures du plateau continental de la France en application de l'article 76 de la Convention, au large des territoires de la Martinique et de la Guadeloupe, de la Guyane, des îles Kerguelen et de la Nouvelle-Calédonie.

L'examen par la Commission de trois dossiers est actuellement en cours, et deux dossiers restent en attente d'examen. Un dernier dossier, le onzième, concernant le plateau continental au large de la Polynésie, sera soumis à la Commission début 2017. En prévision de l'adoption du nouveau statut juridique et politique particulier de l'Antarctique, la France se réserve le droit de déposer ultérieurement une demande d'extension de son plateau continental au large de la Terre Adélie. La surface totale du plateau continental au-delà des 200 M pourra un jour atteindre plus d'un million de km², soit deux fois la superficie de la France métropolitaine.

Les enjeux pour la France de l'extension de son plateau continental

Sur son plateau continental, l'État côtier est souverain pour l'exploitation des ressources du sol et du sous-sol : minéraux, hydrocarbures et espèces vivantes sur le fond. En deçà des 200 M, dans sa Zone économique exclusive, un État est également souverain en ce qui concerne les ressources de la colonne d'eau. En revanche, les droits sur le plateau continental au-delà des 200 M sont limités au sol et au sous-sol, et, par voie de conséquence, la pêche n'est pas concernée. Outre ces droits souverains, l'État a également des obligations, dont le partage des richesses issues de l'exploitation des ressources du plateau continental au-delà des 200 M avec, notamment, les pays ne

disposant pas d'un accès à la mer et/ou en voie de développement.

Le plateau continental constitue la projection en mer de la puissance d'un État et exprime la capacité de celui-ci à accéder de manière exclusive aux ressources naturelles s'y trouvant, surtout minérales. Les enjeux sont certes économiques, mais ils sont aussi environnementaux.

Pour la France, la dimension géopolitique est particulièrement importante, puisque les extensions, à l'exception de celle du plateau continental dans le Golfe de Gascogne, concernent les plateaux continentaux de ses collectivités de l'Outre-mer.

Toute extension du plateau continental constitue une extension de la juridiction nationale et correspond donc à un renforcement de la position de l'État côtier dans la région et dans le monde. Ainsi, une revendication est toujours susceptible d'avoir une influence sur les relations avec l'État (ou les États), dont les côtes sont adjacentes ou font face à celles de l'État côtier qui dépose un dossier, qu'il y ait d'ailleurs recouvrement ou non des zones revendiquées. Des coopérations nouvelles sont possibles, comme dans le cas de l'Afrique du Sud. Des travaux de délimitation maritime non achevés avec des pays voisins peuvent donc reprendre dans un contexte renouvelé. La conduite de recherches scientifiques marines à des fins pacifiques et le partage des connaissances sont également des enjeux importants qu'a identifiés la Convention.

Il reste important de rappeler que l'extension du plateau continental en tant que processus est un long chemin, dont le résultat est aléatoire du point de vue des superficies à gagner pour l'exercice de nos droits souverains. Il faut garder à l'esprit que les ressources ainsi placées sous

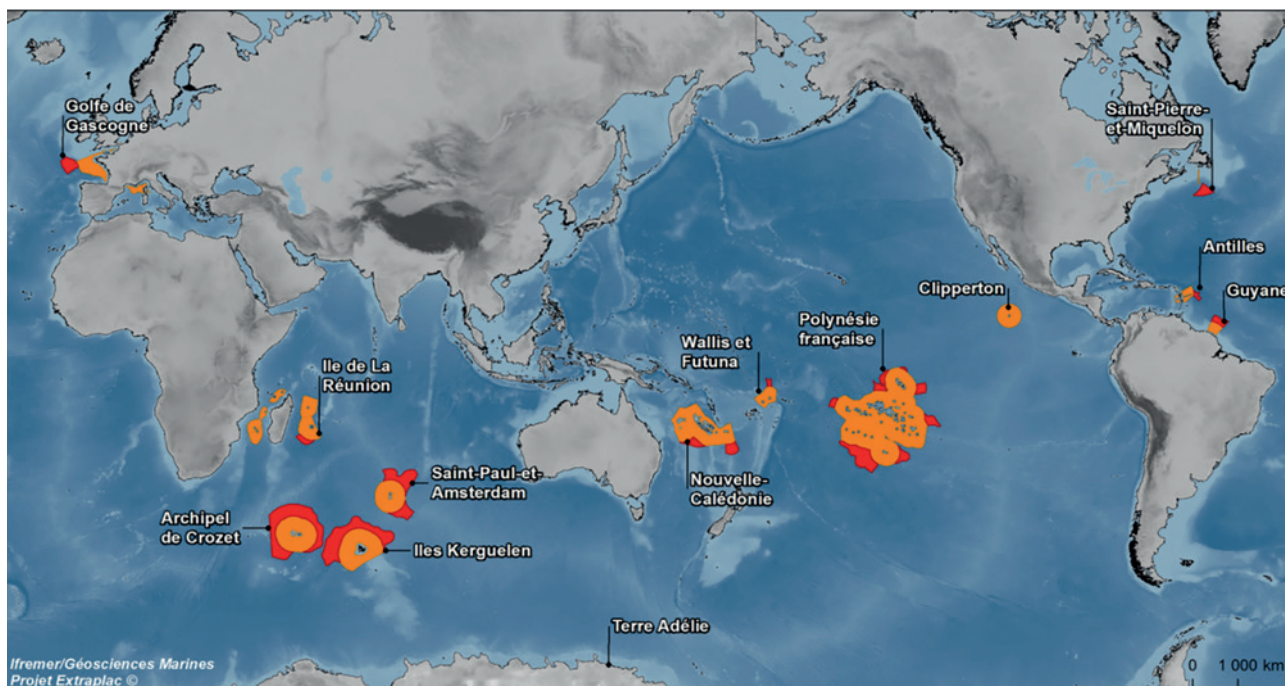


Figure 2 : Carte des différentes zones du plateau continental français. Indiquées, en orange, la zone économique exclusive et, en rouge, la partie du plateau continental se situant au-delà des 200 milles nautiques, telle que revendiquée par la France.

la juridiction de la France sont en fait un pari sur l'avenir, car elles ne seront probablement pas exploitables à court terme. Par définition, ces zones se trouvent loin des côtes et les profondeurs d'eau y sont en règle générale importantes (supérieures à - 3 000 mètres). De plus, il n'existe, à ce jour, aucune analyse approfondie de l'importance des gisements et de la valeur économique des ressources potentielles qui sont susceptibles de s'y trouver.

Au-delà des ressources, d'autres préoccupations relatives à la protection de l'environnement, par exemple, devront être prises en compte dans toute décision d'exploitation des ressources marines. La recherche scientifique marine servira à améliorer nos connaissances de ce milieu naturel, avant d'imaginer *une utilisation prudente* de ses ressources, pour reprendre les mots de Truman.

Le Secrétaire général de la Mer, acteur de la politique de recherche dans les grands fonds marins

Par Vincent BOUVIER
Secrétaire général de la Mer

En matière d'exploration et d'exploitation des grands fonds marins, le Secrétaire général de la Mer joue un rôle essentiel qui recouvre trois aspects principaux : la définition d'une stratégie, l'accompagnement des projets et leur insertion dans l'environnement international.

Au-delà des limites des zones économiques exclusives, la haute mer constitue un espace de liberté : un espace de navigation, bien entendu, de survol, de pêche..., mais encore de recherche scientifique. Un espace partagé, car elle est ouverte à tous : la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (de 1982) prévoit expressément que les États sont libres d'y poser câbles et pipelines sous-marins, d'y construire des îles artificielles, des plates-formes pétrolières et autres ouvrages autorisés par le droit international, sous réserve toutefois d'avoir obtenu l'accord de l'État côtier lorsque ces installations concernent son plateau continental.

Les grands fonds marins ont un régime qui est dissocié de celui de la haute mer. En effet, deux espaces maritimes coexistent, que la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, plus communément dénommée Convention de Montego Bay, a parfaitement distingués. D'un côté, celui des zones économiques exclusives (ZEE) s'étend jusqu'à 200 milles de la côte et, de l'autre, celui de la haute mer commence à partir de cette même limite et ne relève pas de la juridiction des États (hormis le plateau continental sur lequel, dans une limite de 350 milles marins, les États côtiers peuvent détenir des droits souverains).

À cheval sur ces deux espaces, les grands fonds représentent aujourd'hui une source potentielle de richesses absolument considérable pour l'humanité tout entière, des richesses sans commune mesure avec les richesses terrestres.

Nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères, sulfures hydrothermaux (plus communément dénommés amas sulfurés) : ces ressources minérales n'évoquent pas grand-chose pour le grand public. Mais il suffit d'évoquer le fer, le manganèse, le cobalt, le cuivre, le nickel, le zinc, l'or ou l'argent pour mieux comprendre le trésor potentiel que représentent les fonds des océans.

Il s'agit donc d'aller à leur rencontre, de les explorer, de les exploiter – sans nuire à un environnement extrêmement fragile, afin que tout un chacun puisse profiter de ce bien commun.

S'agissant de l'exploration et de l'exploitation des grands fonds marins, le rôle joué par le Secrétaire général de la Mer comprend trois aspects principaux : la définition d'une stratégie, l'accompagnement des projets et leur insertion dans l'environnement international.

La définition d'une stratégie

Le Secrétaire général de la Mer est placé au cœur du dispositif français de politique maritime. Au près du Premier ministre, il exerce trois missions essentielles : l'animation de la fonction « garde-côtes » et de l'action de l'État en mer, la coordination des politiques maritimes et l'évaluation et la prospective dans l'ensemble des domaines concernés, tant régaliens qu'économiques ou environnementaux.

Il est à ce titre en capacité de contribuer significativement à l'élaboration des politiques publiques concernant la mer et le littoral. Dans la conduite de la politique maritime française, l'un des moments essentiels est constitué par la tenue du Comité interministériel de la Mer, sous la présidence du Premier ministre, cette instance réunit l'ensemble des ministres intéressés par le domaine. C'est le Secrétaire général de la Mer qui prépare les délibérations du Comité interministériel de la Mer (CIMER) et veille à l'exécution des décisions prises. Au-delà des questions d'arbitrage et de règlement de dossiers souvent complexes, ce Comité constitue pour le Secrétaire général et sous l'égide du chef du Gouvernement, un moment privilégié pour remobiliser les énergies, donner une impulsion supplémentaire et annoncer des perspectives nouvelles.

Dans ce contexte, les thématiques économique (la Croissance bleue) et environnementale ont pris ces dernières années une dimension particulièrement importante. L'exploration et la valorisation des grands fonds marins sont parties intégrantes de cette évolution. Il s'agit aujourd'hui de concilier développement et préservation de l'environnement, recherche et protection du patrimoine. Les défis posés par la défense de l'environnement constituent autant de véritables chances de croissance, dès lors que l'ensemble des différents acteurs du monde maritime sont prêts à l'innovation et au progrès technologique.

L'intérêt de la France pour les ressources minérales du sous-sol marin ne date pas d'aujourd'hui. Depuis plus de quarante années, notre pays a, en effet, pris de nombreuses initiatives en faveur de la connaissance et de l'accès aux ressources minières des océans. Ainsi, dès les années 1970, la France a manifesté son intérêt pour l'exploitation des ressources des océans. Elle est, à juste titre, reconnue dans ce domaine dans lequel elle dispose de nombreux atouts, en particulier des droits sur des espaces maritimes recelant ces ressources et l'existence de grands groupes industriels et miniers capables d'exploiter, à terme, les grandes profondeurs (le pétrole *off-shore* en est aujourd'hui un exemple parlant). La France possède des droits souverains sur de vastes espaces sous-marins, tout particulièrement dans ses départements et territoires d'Outre-mer. Ainsi, avec plus de onze millions de kilomètres carrés de plateau continental répartis sur l'ensemble des océans, le potentiel national en gisements minéraux est conséquent.

Il reste qu'à ce jour, les conditions d'une exploitation prochaine des grands fonds marins ne sont pas encore totalement réunies. Plusieurs étapes, en effet, doivent encore être franchies, telles celles de l'amélioration de la connaissance géologique et environnementale des grands fonds, du développement de nouvelles technologies d'exploration et d'exploitation et, enfin, de la mise en place de cadres administratifs et juridiques pertinents. En dépit d'échéances de mise en œuvre encore relativement lointaines, l'intérêt stratégique de la recherche dans le domaine des grands fonds apparaît clairement pour notre pays, qu'il s'agisse de ses eaux internationales ou bien de la valorisation de sa zone économique exclusive.

C'est pourquoi la définition d'une stratégie de long terme s'est avérée rapidement indispensable afin que la France soit au rendez-vous de ce nouvel enjeu.

La stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minière des grands fonds marins a été adoptée le 22 octobre 2015, en Comité interministériel de la Mer, à la suite d'un important travail de préparation et de coordination ministérielle accompli par le Secrétariat général de la Mer.

Cette stratégie vise à favoriser l'atteinte par la France de plusieurs objectifs : valoriser ses atouts dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation minières des grands fonds marins ; contribuer à l'émergence d'une filière industrielle d'excellence créatrice de richesse, d'innovations technologiques et d'emplois ; préserver, pour l'avenir, un élément clé de son indépendance stratégique en métaux

et de son développement économique, tout en assurant la prise en compte des dimensions environnementale et sociétale. Désormais, l'État français dispose d'une vision à long terme afin, d'un côté, d'améliorer l'efficacité et l'efficience de sa politique maritime et, de l'autre, de mieux préciser le rôle de chaque acteur, qu'il soit public ou privé.

L'accompagnement des projets

Les attentes en matière d'exploration des grands fonds marins sont fortes. Pour nous, il s'agit donc, aujourd'hui, d'organiser le processus pour qu'elles se concrétisent.

L'État n'est pas la seule partie prenante dans ce domaine, mais c'est à lui qu'il revient de veiller à garantir l'accès à ces ressources. D'une part, en ce qui concerne celles du plateau continental, il va poursuivre les actions relatives à l'extension de cet accès – communément dénommées programme EXTRAPLAC (dont nous reparlerons ci-après) – et à la sécurisation de nos droits souverains sur les ressources naturelles, au travers d'un plan d'action en matière de délimitations maritimes.

En parallèle, l'État doit anticiper les demandes futures d'exploration et d'exploitation que ne manqueront pas de formuler les industriels, acteurs essentiels s'il en est, en s'assurant que tous les espaces concernés disposent bien d'un cadre juridique adapté et en sécurisant la mise en œuvre de ses compétences et de celles des collectivités d'Outre-mer. Enfin, pour ce qui concerne le fond des océans constituant la Zone (c'est-à-dire, selon la définition de la Convention de Montego Bay, les sols et sous-sols marins hors juridiction des États, non comprise la colonne d'eau surjacente), la France a décidé de se limiter aux deux seuls contrats internationaux qu'elle détient aujourd'hui dans les secteurs de « Clarion-Clipperton » et de la « dorsale médio-atlantique ».

À près de 1 300 kilomètres du Mexique et de 4 000 kilomètres de la Polynésie, la zone de l'île de la Passion (autre nom de l'île de Clipperton) est la seule possession de la République française dans l'hémisphère nord. La zone dans laquelle elle se situe est considérée comme extrêmement riche en nodules polymétalliques. Parallèlement à l'élaboration du document de stratégie précité, le Secrétaire général de la Mer a assuré l'instruction du dossier de prorogation du contrat nodules détenu, pour la France, par l'Ifremer dans cette zone de Clarion-Clipperton. Ce contrat, d'une durée de quinze ans, arrivait à échéance en 2016 et ses conditions de procédure exigeaient qu'une décision d'extension soit prise six mois avant l'arrivée à échéance. Après coordination des travaux avec les ministères, puis avec les industriels et l'Ifremer, le Secrétaire général de la Mer a pu proposer à l'arbitrage du Premier ministre une prolongation pour une durée de cinq ans. Toutefois, l'exploitation des nodules en est toujours à l'état expérimental, dans la mesure où elle n'est possible qu'en pleine mer, c'est-à-dire très loin des côtes. Le second contrat d'exploration français concerne les sulfures. Signé le 18 novembre 2014, toujours par l'Ifremer et pour une durée de quinze ans, il porte sur la dorsale médio-atlantique, dans les eaux internationales.



Photo © Ifremer

Pince du robot téléopéré Victor 6000 contenant une bouchée d'hydrate de gaz (qui, sous certaines conditions de température et de pression, forme des affleurements ayant l'apparence de la glace) lors d'une campagne de prélèvements sur le site de la dépression REGAB par 3 200 mètres de profondeur dans le Golfe de Guinée (océan Atlantique).

« L'un des deux contrats d'exploration détenus par la France concerne les sulfures de la dorsale médio-atlantique, dans les eaux internationales, et il a été signé par l'Ifremer en 2014 pour une durée de quinze ans. »

L'État va apporter tout son soutien au respect des obligations contractuelles de l'Ifremer au titre de ses deux contrats conclus avec l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM). Concentrer son action sur ces deux permis, telle est la conception qui prévaut à présent, car ces deux contrats apparaissent suffisants au regard des technologies disponibles et des nécessités d'approvisionnement.

Enfin, le troisième volet de l'action du Secrétaire général de la Mer en faveur de l'exploration des grands fonds marins concerne les îles de Wallis-et-Futuna. Plusieurs campagnes d'exploration des fonds environnants de ces terres lointaines ont déjà été menées depuis 2010. Mais une difficulté réglementaire ayant été mise au jour – la non applicabilité du Code minier à Wallis-et-Futuna – une demande de permis exclusif de recherche n'avait pu être introduite. En lien avec le ministère des Outre-mer, le Secrétaire général a coordonné la tenue de plusieurs réunions afin d'avancer sur ce point de droit. À ce stade, l'envoi d'une mission d'expertise scientifique à Wallis-et-Futuna

est envisagé à brève échéance. Elle sera conduite par l'Institut de recherche pour le développement.

L'insertion des projets d'exploitation minière dans l'environnement international

Dans le cadre de ses missions et toujours en lien avec la stratégie, le Secrétariat général de la Mer travaille activement sur la dimension internationale des grands fonds marins. Fort de ses compétences en matière maritime et de sa mission de coordination, il a toute la latitude nécessaire pour faire de ce domaine océanique un axe primordial de la politique maritime internationale. Dans cette optique, il associe à ses travaux et à l'orientation de ses projets, en particulier les contrats avec l'AIFM, des consortiums privés, tels que le Cluster Maritime Français, cette organisation qui regroupe les professionnels du monde maritime. Par ailleurs, si la recherche de partenariats internationaux ressortit à la compétence du ministère des Affaires étrangères et du Développement international

(MAEDI), le Secrétariat général est en mesure de contribuer à leur création et à leur développement.

Enfin, le Secrétaire général de la Mer s'investit largement auprès de l'Autorité internationale des fonds marins afin que les intérêts français soient pris en compte pour ce qui concerne les grands fonds marins situés au-delà du plateau continental de notre pays. Dans le même temps, il veille à la rédaction du futur Code minier (celle-ci est en cours, sous l'égide de l'AIFM) afin que ce document corresponde le plus possible à nos attentes dans ce domaine.

Il a également pour mission de faire reconnaître l'existence d'un plateau continental étendu à Saint-Pierre-et-Miquelon, tout en participant, avec les services des Affaires étrangères, au maintien du haut niveau des relations diplomatiques nouées avec le Canada.

D'autres demandes d'extension du plateau continental sont d'ailleurs également en cours. Elles concernent les zones de Wallis-et-Futuna, Saint-Paul et Amsterdam, La Réunion et l'archipel de Crozet (pour cette dernière, la requête est d'ailleurs faite en collaboration avec l'Afrique du Sud (îles du Prince Edward), sous la forme d'une demande conjointe). Ces différentes initiatives s'intègrent dans le cadre du programme français d'extension du plateau continental – l'EXTRAPLAC –, dont les travaux du Comité de pilotage sont coordonnés par le représentant du Secrétariat général de la Mer.

Celui-ci assure également la direction de la délégation française auprès de la Commission des limites du plateau continental (CLPC), dont le siège est à New York. Ce

programme nécessite l'intervention de plusieurs institutions nationales, tels l'Ifremer ou le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine), et requiert une coordination par le Secrétariat général des différents services concernés. Fort de son organisation interministérielle, EXTRAPLAC a d'ailleurs récemment prouvé son efficacité : en date du 25 septembre 2015, quatre décrets ont rendu publique la liste des coordonnées fixant la limite extérieure du plateau continental au-delà des 200 milles marins. Cette publication, prolongée par une information adressée à la division du droit de la mer des Nations Unies, a confirmé la fin de la procédure pour les espaces suivants : la Guyane, les Antilles, Kerguelen et la partie ouest de la Nouvelle-Calédonie, soit une extension d'un peu plus de 578 000 kilomètres carrés du plateau continental.

Porter avec vigueur les ambitions de la France en matière de recherche et d'exploration maritimes, telle est bien l'une des missions essentielles du Secrétaire général de la Mer. Dans un contexte extrêmement concurrentiel, la France doit rester une grande nation maritime. Si, autrefois, nos rivaux s'appelaient l'Angleterre, l'Espagne, le Portugal ou les Pays-Bas, les plus impliqués sont aujourd'hui les États-Unis, la Russie, l'Allemagne, la Corée du Sud, mais aussi la Chine, l'Inde et, encore et toujours, le Royaume-Uni. Le Secrétaire général ambitionne donc de coordonner, dans ce domaine, une politique maritime nationale visant, en particulier, une exploitation raisonnable des océans, qui soit respectueuse de l'environnement et consciente que les richesses de notre Terre reposent bien au fond de la mer.

Quels sont aujourd'hui les atouts de la filière française de prospection et d'exploitation minières des grands fonds marins ?

Par Francis VALLAT

Président fondateur du Cluster Maritime Français et président de l'association « SOS Méditerranée »

Les richesses minérales des grands fonds marins sont une chance pour l'humanité, sous réserve de protéger l'environnement. Il s'agit d'un domaine où la France a de sérieux atouts : une économie maritime dynamique, une industrie dense et diversifiée (de grands groupes, mais aussi des PME et TPE), des capacités de recherche adaptées, des champions reconnus comme étant parmi les meilleurs du monde pour chaque étape, de l'exploration à la production, et, enfin, un État qui semble se réveiller et réaliser que le pays a une chance de voir émerger une filière industrielle majeure comparable à la filière nucléaire ou aéronautique. Mais elle souffre aussi de handicaps, notamment un État exsangue et qui bouge lentement, et une Europe confuse et contradictoire mesurant mal les moyens à mettre en œuvre.

Deux des pays les plus actifs dans ce domaine se sont rapprochés des professionnels français, l'Allemagne et le Japon. Le choix de notre industrie est fait : il nous faut avancer avec l'Allemagne, avec laquelle de premiers pas ont été accomplis.

La récente démarche de l'Inde, le dernier pays à avoir obtenu de l'Autorité internationale des grands fonds un permis d'exploration (le 25^{ème} !), démontre une nouvelle fois, s'il en était besoin, les convoitises que suscitent les énormes gisements minéraux des fonds marins, en particulier les mélanges sulfurés riches en métaux indispensables à nombre d'activités humaines, mais dont certains sont contrôlés majoritairement par un seul pays (par exemple, par la Chine pour les terres rares ou par la République du Congo pour le cobalt). À vrai dire, l'exploitation durable de ces richesses pourrait révolutionner les marchés et apporter des solutions au problème de l'épuisement des ressources terrestres traditionnelles, cela d'autant plus que la concentration des métaux y est beaucoup plus importante que dans les gisements traditionnels (par exemple, de l'ordre de 25 à 30 % pour le cuivre, au lieu de 2 %) et que fort probablement l'exploitation des grands fonds serait nettement moins destructrice de l'environnement que ne l'est toute exploitation terrestre (beaucoup moins de roches à « bouger » et à concasser, de déchets à rejeter, pas de déforestation, pas d'énormes trous ou fosses...).

Or, la France industrielle et maritime, elle aussi concernée par ce challenge, occupe une position particulière, à bien

des égards privilégiée sans pour autant être exempte de lourds handicaps...

L'économie maritime de notre pays s'inscrit certes aujourd'hui, au moins partiellement, dans le contexte et dans le cadre d'une économie générale affaiblie et n'arrivant pas véritablement à (re)décoller depuis la crise économique de 2008/2009. Néanmoins, notre secteur maritime a prouvé plus que les autres sa forte capacité de résilience, voire son aptitude à rebondir. Il a en particulier réussi à maintenir le niveau de ses emplois directs (300 000, hors tourisme littoral et industries portuaires), et ce, non seulement en dépit d'une crise qui a frappé notre pays plus durablement que le reste de l'Europe, mais aussi malgré la contraction du commerce mondial, dont il dépend directement en raison de son ouverture totale à l'international. Un constat d'autant plus remarquable que notre pays a simultanément augmenté sa productivité (avec actuellement près de 70 milliards d'euros de valeur de production, contre un peu plus de 50 milliards il y a de cela quelques années).

Tout aussi remarquable est – à côté des grands groupes que chacun connaît – le foisonnement des TPE ou PME, hyperdynamiques et innovantes dans nombre de

sous-secteurs rattachés à ce que l'on appelle communément la « nouvelle industrie de la mer » (biotechnologies et bio-ressources, nouvelles énergies, aquaculture, navires du futur et, surtout, exploitation des fonds marins !).

Et puis, il y a la qualité de notre recherche maritime, scientifique et industrielle, illustrée aussi bien par de grands acteurs comme l'Ifremer, l'IRD (Institut de recherche pour le développement), le CNRS et le Cedre, que par l'effervescence de centaines d'entités labellisées chaque année par ces pôles mer d'envergure mondiale, que sont le Pôle Bretagne-Atlantique et le Pôle Med, ou encore la floraison d'Instituts (d'excellence et autres) gravitant essentiellement dans nos régions maritimes et commençant à se constituer en réseau, y compris avec un Outremer français qui fait lui-même preuve en général d'une formidable motivation. Un constat global qui ne laisse pas indifférent, lorsqu'il s'agit de « peser » les chances françaises face aux défis que pose l'exploitation des grands fonds marins.

À côté de ces acteurs toniques de l'économie maritime, qui de surcroît s'organisent de plus en plus depuis une dizaine d'années et n'hésitent pas à afficher et à jouer de leurs solidarités (ce qui était encore impensable naguère, mais qui trouve aujourd'hui son incarnation dans la multiplication des *clusters* et autres réseaux scientifiques, industriels, géographiques, à commencer par le Cluster Maritime Français), il y a, bien sûr, l'État.

Un État dont le rôle est essentiel à plusieurs titres, non pas comme un artificiel chevalier blanc volant au secours d'industriels ne voulant pas investir eux-mêmes, mais comme un incitateur à tous égards et comme un soutien d'entrepreneurs de qualité. Cela peut ou devrait aller de l'État « accompagnateur » et « capital-risqueur » (comme il le fut jadis pour l'aéronautique ou pour le nucléaire) à l'État régulateur (seul, ou avec d'autres États lorsqu'il s'agit d'élaborer des règles mondiales dans les enceintes internationales dont c'est la mission), le pouvoir étatique fixant alors le cadre et les règles du jeu que sont, par exemple, les normes environnementales ou les régimes légal, fiscal et social nécessaires au développement de toute filière nouvelle.

La question se pose, aussi, de savoir, si, d'une part, – et tout particulièrement aujourd'hui dans le contexte de rigueur que nous connaissons –, l'État a ou peut avoir les moyens financiers d'une telle stratégie (ou comment il pourrait les avoir ?) et si, d'autre part, il est lui-même conscient des énormes enjeux qui se dessinent à court ou moyen terme. Par exemple, avec la maritimisation du monde et ses conséquences, dont, en l'occurrence, la chance énorme que peuvent offrir à la terre épuisée, et donc à l'humanité, les richesses minérales marines profondes, sous réserve, naturellement, de pouvoir contrôler qu'elles sont celles qui sont et seront exploitées dans le respect scrupuleux de l'environnement et des écosystèmes marins.

Or, c'est un fait : l'État avance, au moins dans la prise de conscience des possibilités offertes par ces ressources nouvelles. Très et même trop lentement, bien sûr, mais enfin, il avance...

Les professionnels du maritime se souviennent d'avoir participé au rapport Poséidon en 2007, au Livre bleu pour une stratégie maritime nationale en 2009-2010 et au Plan « Métaux stratégiques » en 2010. Et ils savent que la Stratégie nationale pour les grands fonds marins, qui a été publiée en 2015, doit beaucoup aux travaux effectués en commun (pour les professionnels dans le cadre de la structure *ad hoc* du Cluster Maritime Français et, pour l'État, *via* la coordination assurée par le Secrétariat général de la Mer entre les ministères concernés).

Mais nous sommes, depuis un certain temps déjà, arrivés à un stade où l'on peut s'interroger sur le côté « gesticulation » de ces textes, voire sur leur fiabilité, tant il est vrai que leur contenu (ou la décision de les rédiger) ne devrait pas dépendre de l'alternance politique (ce qui fut le cas du Livre bleu). Et surtout, ces textes ne signifient rien sans un minimum d'engagements et de moyens, et sans leur mise en œuvre efficace, courageuse... et, naturellement, cohérente avec les intentions affichées.

Or, sur le plan financier, notre État exsangue fait probablement ce qu'il peut (création du concours mondial de l'innovation, octroi de certains avantages fiscaux), mais à un niveau qui reste tout à fait insuffisant. Il devrait donc d'autant plus se saisir des opportunités de la mise en commun des efforts de chacun dans un esprit de partenariat public/privé, comme ce fut le cas en 2010 pour les premières campagnes d'exploration minière dans les eaux de Wallis-et-Futuna. Il pourrait s'agir, pour lui, de soutenir et de valoriser la recherche publique, par exemple en encourageant l'Ifremer à participer non seulement à des projets académiques, mais aussi à des projets scientifico-industriels. Une participation qui pourrait alors être considérée comme un apport de l'État en matière industrielle au capital de l'aventure commune, à côté des apports des industriels.

Le rôle de l'État doit ou devrait aussi être de lutter contre les blocages politiques et administratifs, en plus naturellement de son devoir d'apporter de la visibilité et de porter courageusement une politique sur la durée en ne se contentant pas de rédiger de temps à autre de beaux textes affichant des objectifs non quantifiés ou décrivant des méthodes sans en prévoir vraiment l'application (voir ci-dessus). Il est ainsi évident, pour être concret, que l'État doit porter sa part de responsabilité dans l'instruction efficace des dossiers de demandes de permis (le projet Wallis-et-Futuna est à cet égard exemplaire, avec les premières campagnes d'exploration menées en 2010, 2011 et 2012, le dépôt du permis en 2013, mais depuis... toujours rien de fait au moins jusqu'à courant 2017 !).

Reste, enfin, le niveau européen, où, là aussi, les déclarations se multiplient, mais où le cap paraît de plus en plus confus, dans un parallèle parfois décourageant avec certains manques au niveau national. Citons le programme H2020, qui n'est manifestement pas à la hauteur des enjeux, ou les atermoiements contradictoires dans les décisions d'affectation des quelques financements mis en place.

On peut également mentionner la décision prise d'accorder des financements pour les nodules polymétalliques au



Photo © Ifremer-Olivier Dugornay / Campagne Phare 2002

Le poste de télécommande du Victor 6000, à bord de L'Atalante.

« La France est le seul pays à pouvoir proposer aux autres pays intéressés la panoplie complète des services industriels nécessaires à l'exploitation des gisements. »

moment même où une autre direction de la Commission alertait sur l'impossibilité de prévoir un jour la rentabilité de cette voie (voir ci-dessous).

Citons, enfin, la difficulté – si ce n'est l'impossibilité – d'adapter les projets « Ressources minérales profondes » aux critères du Plan Juncker.

Une des questions essentielles est en effet de savoir, au regard des coûts énormes d'exploration, de recherche et, ultérieurement, d'exploitation (au total, des centaines de millions d'euros d'investissement pour un site en production, et autour d'une centaine de millions pour un « simple » démonstrateur), de quelle manière orienter prioritairement les efforts et, en premier lieu, vers quel type de minerai ?

Or, contrairement à ce que pourraient laisser penser aussi bien des décisions européennes prises récemment dans le cadre du programme H2020 (qui consacrent donc quelques financements aux nodules) que la réaffirmation par le gouvernement français de son intérêt pour la zone de Clarion-Clipperton, les nodules ne sont plus incontestablement le « premier choix ». D'ailleurs, la France s'est engagée *a minima* à Clipperton (en faisant savoir clairement qu'elle n'effectuerait pas la moindre campagne supplémentaire, rejoignant sur ce point la position exprimée par le Japon), alors que, de son côté, la Commission – *via* la DG Mare (la direction générale des Affaires maritimes et

de la Pêche) – écrivait dans un rapport récent : *"tentative calculations have been made on the economic viability of deep sea mining, showing that SMS mining [les mélanges sulfurés] appears to have the strongest commercial viability, whereas no positive cash-flow over period can be obtained for nodules mining"*.

Il est toutefois à noter que la France et l'Allemagne – dont les industriels compétents, en particulier français, considèrent eux aussi que les mélanges sulfurés sont la meilleure chance – se sont rapprochées pour constituer une filiale spécialisée dans ce type de minerai à la fois nouvelle et respectueuse du développement durable.

Mais, dans les faits, c'est la France, particulièrement bien positionnée, qui a été sollicitée par l'Allemagne et qui a donc l'initiative.

Avec l'Ifremer (si cet Institut arrive à avoir la visibilité et les moyens nécessaires, au-delà de ses priorités minimales que constitue la zone dorsale atlantique réservée par la France auprès de l'AIFM) et des sociétés comme Technip, CGG, Bourbon, Comex, Total, Eramet, Louis-Dreyfus Armateurs, DCNS, Créocéan, Alcatel-Lucent Submarine Networks, mais aussi Dassault Systèmes et plus d'une vingtaine d'autres acteurs, l'industrie maritime de la France est en effet la seule au monde à posséder des leaders internationaux pour les dix phases de travaux identifiées par le groupe de travail *ad hoc* du Cluster Ma-

ritime Français, depuis l'exploration jusqu'à la valorisation des futurs gisements.

De ce fait, la France est le seul pays à pouvoir proposer aux autres pays intéressés (tels la Chine, la Russie, le Japon, la Corée, et d'autres encore ; si, bien entendu, certains de ces pays disposent eux aussi de champions, aucun d'eux n'est en mesure d'assurer les dix phases de travaux précitées) la panoplie complète des services industriels nécessaires à l'exploitation des gisements.

Une situation favorable qui devrait être pour nous une source majeure de développement économique et social dans l'avenir. Notre pays possède en outre le second espace maritime mondial, et son immense zone économique exclusive (de 11 millions de km², sans compter les surfaces supplémentaires devant résulter bientôt des négociations dites Extraplac) regorge de potentialités en matière d'exploitation sous-marine. C'est le cas, en particulier, dans cette zone pionnière (déjà mentionnée plus haut) que devrait être Wallis-et-Futuna, où les industriels français souhaitent mener très vite une (troisième) campagne d'exploration pour mieux identifier les ressources des sols en amas sulfurés, et déterminer les conditions du respect de l'environnement marin (un projet pour lequel nos professionnels sont prêts à engager la moitié des 22 millions d'euros nécessaires).

Ce sont là autant d'atouts en termes de technologie, d'expertise et de géographie, mais aussi de chances d'obtenir des permis qui n'ont pas échappé à l'Allemagne.

À Berlin, on a bien compris que les grands fonds marins constituaient un potentiel d'activité et de richesses considérable pour les années à venir (à l'horizon des dix, voire des vingt ans).

Pragmatiques, les Allemands ont recherché une coopération avec les Français. Car, s'ils ne bénéficient pas d'un domaine maritime comparable à celui de la France, ni de l'expertise globale de nos champions tricolores, ils disposent d'une industrie navale et maritime puissante, à même de prendre sa part – aux côtés des Français et sous réserve d'apporter de légitimes contreparties, notamment en termes de financement – dans la conception et la fabrication des futurs outils industriels nécessaires à une

exploitation des gisements. Leur intérêt est très marqué, comme l'ont prouvé les visites à Paris de deux ministres fédéraux venus y rencontrer nos professionnels dans les bureaux du Cluster Maritime Français.

Dans le même temps, les pouvoirs publics français (très attentistes ces dernières années, comme on l'a vu, même si l'on peut porter à leur crédit l'adoption des documents stratégiques évoqués précédemment, les trois CIMER qui se sont tenus depuis 2011 et la recommandation de la Commission d'inscrire les « grands fonds » parmi les sept ambitions stratégiques prioritaires pour la France) semblent être – enfin ! – intéressés par les énormes perspectives qu'offrirait une filière nouvelle sous *leadership* national.

Il faudrait aujourd'hui que les choses bougent pour que soit enfin mise en œuvre l'ambition commune affichée dans la récente feuille de route étatique : « La France poursuit un triple objectif : valoriser ses atouts dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation minières des grands fonds marins ; contribuer à l'émergence d'une filière industrielle d'excellence créatrice de richesses, d'innovations technologiques et d'emplois, tout en préservant les écosystèmes marins de grands fonds ; préserver, pour l'avenir, un élément clé de notre indépendance stratégique en métaux et de notre développement économique ». Et ce même, s'il apparaît, comme on l'a vu, qu'une participation de fonds publics reste problématique, comme l'est d'ailleurs la résolution des conflits de compétence entre l'État et les pouvoirs locaux dans nos territoires d'Outre-mer les plus prometteurs !

C'est en tout cas dans cette perspective que la France et l'Allemagne ont officiellement signé deux accords, le 20 octobre 2015, à Bremerhaven (en Allemagne) : une déclaration d'intention entre les gouvernements, mais aussi, et surtout, un *Memorandum of Understanding* liant le Cluster Maritime Français et la *Deep Sea Mining Alliance* allemande. Et c'est le 2 février que s'est tenue, dans les locaux du Cluster, à Paris, la première réunion de travail destinée à étudier les modalités d'une coopération profitable pour deux pays qui aimeraient avancer avec l'Union européenne (ou sans elle, s'il le faut !).

Un état de l'art de l'exploitation minière sous-marine

Par Julien DENÈGRE

Chargé du développement commercial au sein de Forsys Subsea

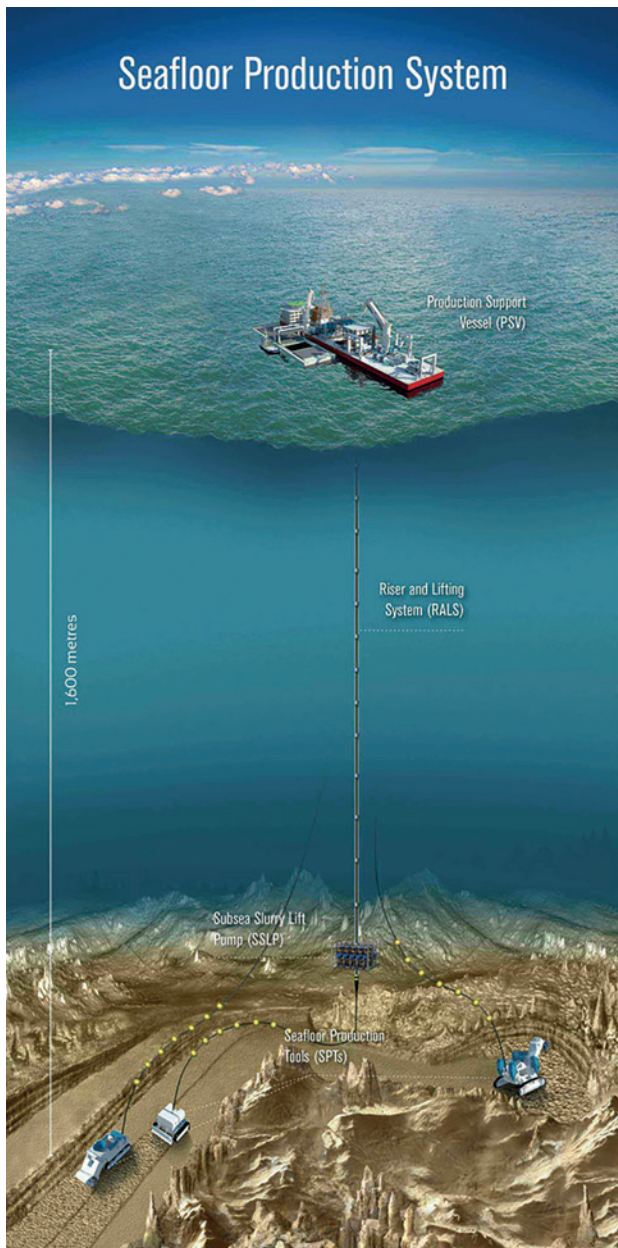
À l'exception de l'exploitation de diamants par 150 mètres de profondeur, aucune opération de longue durée n'a encore été menée à bien en matière de collecte à des fins commerciales de minéraux solides à des profondeurs supérieures à - 200 mètres. La compagnie canadienne Nautilus Minerals a obtenu sa première concession minière en janvier 2011 pour des gisements de sulfures polymétalliques, en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Elle travaille à la mise au point d'un système d'exploitation de ces gisements, dont les premiers essais devraient avoir lieu en 2019. La France dispose par ailleurs d'un ensemble cohérent d'atouts, de ressources, de compétences et d'expertises uniques au monde en matière de fonds sous-marins et d'exploitation minière. Ces acteurs sont regroupés au sein d'un groupe de travail dédié du Cluster Maritime Français (CMF). L'État a mis en place un concours mondial de l'innovation consacré à la valorisation des richesses marines, qui a permis de financer les projets les plus innovants et de fédérer plusieurs industriels français autour des deux consortiums (MELODI et FONASURF) dédiés aux développements d'outils d'exploration et d'exploitation.

À l'exception de l'exploitation de diamants en Namibie par la société sud-africaine De Beers Marine, par 150 mètres de profondeur, aucune opération de longue durée n'a été menée à bien en matière de collecte à des fins commerciales de minéraux solides à des profondeurs supérieures à - 200 mètres. Mais les essais effectués dans les années 1980 avec des systèmes de ramassage de nodules polymétalliques à des profondeurs de - 5 000 mètres (à des profondeurs où les nodules se détachent sans difficulté du plancher marin) montrent que l'exploitation de ces gisements ou de gisements analogues est possible, à condition de résoudre certaines problématiques techniques.

Il n'est en effet pas certain que les techniques d'exploitation pétrolière ou de dragage puissent être mises en œuvre dans des gisements de matériaux durs et abrasifs, tels que les sulfures hydrothermaux. Il est probable que l'exploitation de ces derniers consistera essentiellement en des systèmes de pompage ou de remontée en continu équipés de têtes d'injection d'air ou de boue, la pulpe de minerai étant remontée au moyen d'une conduite flexible, même si de nombreux points restent à valider. Au cœur des incertitudes techniques se situe la résistance des équipements à une abrasion intense. Mais tant que les différents gisements n'auront pas été caractérisés de façon plus précise, l'efficacité réelle de ces systèmes restera du domaine des hypothèses.

La compagnie canadienne Nautilus Minerals a obtenu sa première concession minière sous-marine en janvier 2011 pour exploiter des gisements de sulfures polymétalliques dans le champ dit Solwara 1, qui est situé dans les eaux territoriales de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Nautilus Minerals travaille actuellement à la mise au point d'une liaison rigide fond-surface (RALS), dont les premiers essais devraient avoir lieu en 2018-2019. Ce système conçu par Technip pour la Mer de Bismark comprend une pompe sous-marine à diaphragme (fournie par GE Oil & Gas), une conduite rigide verticale droite, un système de maintenance en surface et des équipements auxiliaires permettant de séparer les débris de roches de l'eau (avant une réinjection à grande profondeur). Nautilus a un objectif de production de 1,2 à 1,6 tonne métrique par an de sulfures contenant du cuivre et de l'or.

L'excavation et la collecte de minerai ont été scindées en trois tâches individuelles, chacune étant effectuée par un outil de production différent : l'*Auxiliary Cutter* (AC), le *Bulk Cutter* (BC) et la *Collection Machine* (CM). L'AC et le BC découpent le minerai de façon continue. L'AC prépare le fond marin afin de permettre le passage du BC. Le BC a une plus grande capacité de découpe, car il dispose d'un large rouleau d'excavation, mais il ne peut travailler que sur les zones préparées par l'AC. Le troisième outil, le CM, permet de recueillir le minerai en le pompant et en l'introduisant à travers un tuyau flexible vers le système de remontée (RALS). L'AC est le premier des trois outils



de production des fonds marins à avoir été achevé (il pèse environ 250 tonnes).

En attendant l'ouverture de cette première mine sous-marine au monde, ces trois engins miniers automatisés construits par Soil Machine Dynamics, à Newcastle, ont quitté le Royaume-Uni pour le port omanais de Duqm. Ils y seront testés en immersion, puis stockés par United Engineering Services, une filiale de MB Holding (l'actionnaire principal de Nautilus Minerals), jusqu'à leur embarquement sur le navire de Nautilus Minerals, en 2017.

La situation en France

D'après l'Insee et l'Observatoire national de la mer et du littoral (ONML), le socle de l'économie maritime comptait environ 450 000 emplois en 2012, soit 1,7 % de l'emploi total en France et plus de 8 % des emplois maritimes de l'Union européenne. L'Institut français pour l'exploitation de la mer (Ifremer) estimait, quant à lui, la valeur ajoutée maritime à près de 30 milliards d'euros en 2011.

La France dispose par ailleurs d'un ensemble cohérent d'atouts, de ressources, de compétences et d'expertises uniques au monde en matière de fonds sous-marins et d'exploitation minière : Ifremer et BRGM pour la recherche, Technip, CGG, Louis Dreyfus Armateurs ou Bourbon pour les services, STX France, DCNS pour la construction navale, Eramet, Areva pour l'opération minière et la métallurgie. Ces acteurs nationaux sont regroupés au sein d'un groupe de travail dédié du Cluster Maritime Français (CMF), qui contribue activement aux réflexions prospectives sur la thématique des grands fonds marins.

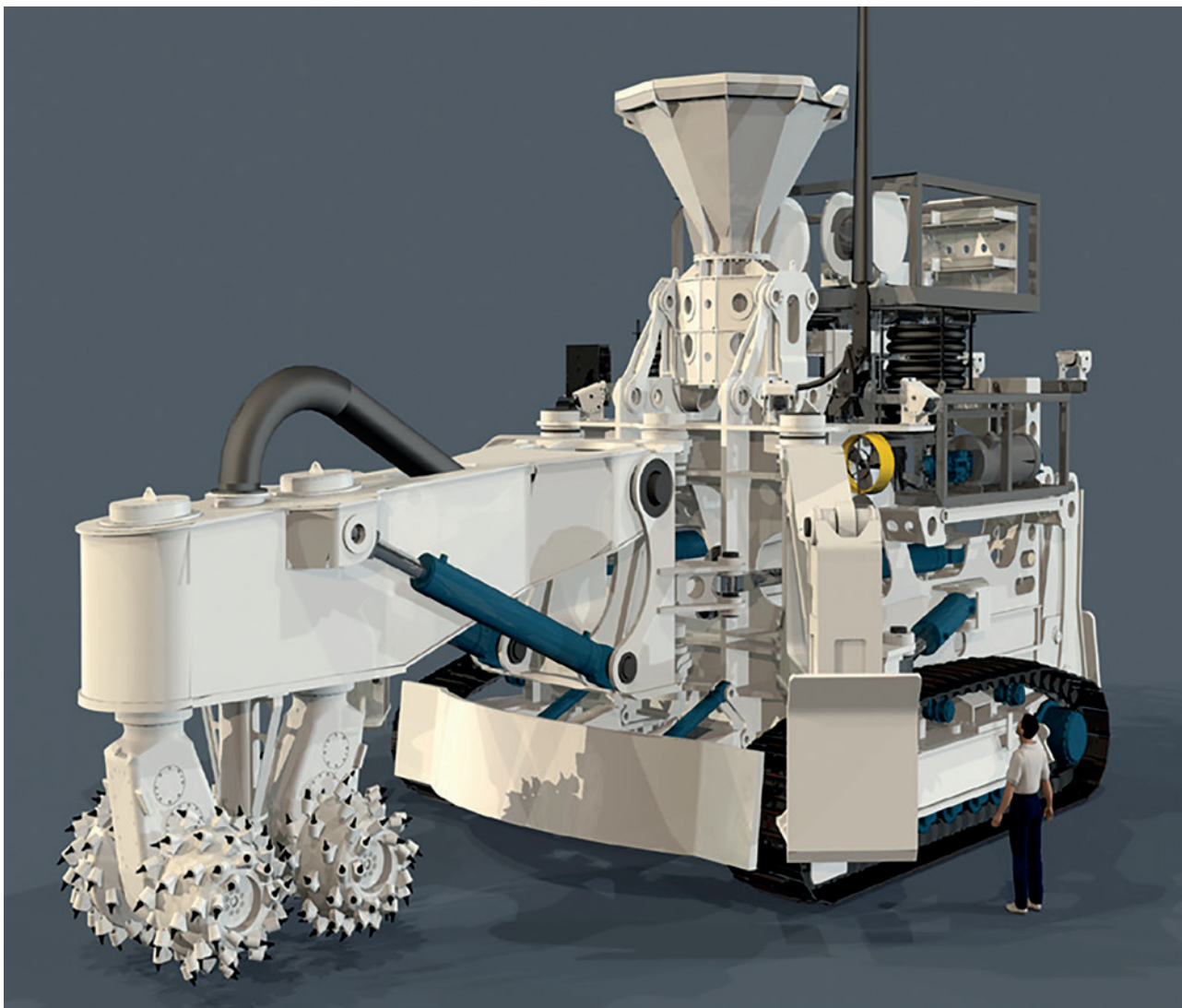
Le développement de ces nouvelles technologies suppose le transfert de concepts et de connaissances de la recherche conceptuelle vers la production industrielle. La « preuve de concept », étape-clé du processus d'innovation, comporte des coûts et des risques importants. Pour permettre le décollage de ces nouvelles solutions, l'État a mis en place le Concours mondial de l'innovation (CMI), qui a permis de financer les projets les plus innovants et a fédéré, en phase 2, plusieurs industriels français autour des deux consortiums dédiés aux développements d'équipements d'exploration et d'exploitation, respectivement MELODI et FONASURF.

Le consortium MELODI

L'objectif du projet MELODI est d'aboutir à moyen terme à la conception d'un pilote industriel pour l'exploration des amas sulfurés hydrothermaux inactifs en eaux profondes. L'estimation des ressources minérales des grands fonds océaniques se heurte, en l'état actuel des techniques d'exploration, à des verrous d'ordres technologique, méthodologique et financier. L'estimation des ressources nécessite deux étapes : la détection des cibles et leur caractérisation. Le projet MELODI (*Magnetic and Electromagnetic Ore Detection*) ambitionne de lever ces verrous en proposant des techniques d'exploration innovantes à l'échelle régionale (détection par une flotte de drones sous-marins équipés de capteurs magnétiques) et locale (caractérisation par un drone sous-marin autonome (AUV) équipé d'un capteur électromagnétique) compatibles avec un objectif industriel d'exploration minérale efficace des fonds océaniques.

Le projet MELODI est animé par l'entreprise CREOCEAN réunie en consortium avec ECA Group, DCNS et RTSys. Il s'agit d'un projet de recherche collaboratif issu de trois projets lauréats de la phase 1 du CMI : « Messidor », « Doremi » et « Docking ». Ce consortium fait également appel aux compétences de trois sous-traitants spécialisés dans les moyens de mesure sous-marine : MAPPEM, CADDEN et l'IPGP.

Spécialisé dans la gestion de projets et l'environnement marin, CREOCEAN (dont le capital est détenu par le groupe indépendant KERAN) est une société de services et de conseils entièrement consacrée à l'océanographie et aux aménagements côtiers et *off-shore*. L'étendue de ses compétences pluridisciplinaires donne à CREOCEAN une capacité à réaliser des études, depuis l'acquisition de données en mer jusqu'à la prescription détaillée des pro-



Un modèle de Bull Cutter.

jets, des procédures à mettre en œuvre jusqu'à la conception et la maîtrise d'œuvre des projets. Une forte implication en R&D (25 % de son chiffre d'affaires est éligible au crédit d'impôt recherche) lui permet de développer des projets très innovants.

Le consortium FONASURF

FONASURF vise le rapprochement des trois projets lauréats de la phase 1 : « SEAMEX », « SISCA » et « FLEXSEAMINING », portés respectivement par COMEX, DCNS et Technip.

L'objectif du projet est le développement à moyen terme d'un système minier sous-marin fiable, intelligent et respectueux de l'environnement afin de réaliser les étapes allant de l'excavation à la remontée des minerais des profondeurs jusqu'à la surface de l'océan. Les lauréats de la phase 1 sont complémentaires les uns des autres et sont essentiels au succès du système complet. La gestion des interfaces, qui est une problématique essentielle des grands projets complexes, ne peut plus être dissociée de la planification opérationnelle du projet. Il s'agit de s'assurer que les liens entre les tâches d'un projet puissent

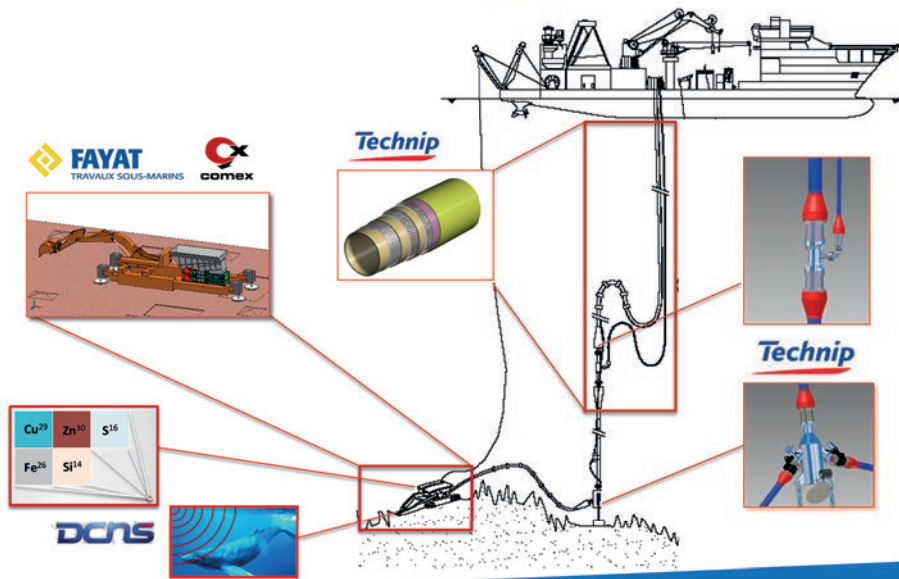
s'implémenter sans mettre en péril les dates de fin du projet. C'est pourquoi Technip, DCNS et COMEX réalisent le projet FONASURF en commun. Cela de manière non seulement à réduire les interfaces (et donc les risques d'inadéquation d'une brique avec une autre), mais aussi à maximiser les chances de succès du système global.

Des essais réussis de ramassage de nodules polymétalliques ont prouvé une certaine faisabilité technique, mais ils ont aussi mis en évidence les barrières techniques faisant obstacle à une exploitation minière sous-marine viable et rentable.

Le projet FONASURF vise à lever les verrous technologiques et à être ainsi à même de réaliser plusieurs équipements :

- un engin minier autonome capable de se déplacer sur un fond océanique très accidenté, qui soit relativement silencieux et limite au maximum la majorité des impacts de l'excavation du minerai sur l'écosystème,
- un système de détection performant capable de caractériser en temps réel la nature des sols prélevés, de manière à optimiser le temps machine sur le plancher océanique et à garantir un taux de production optimal,

Innovation



« Le consortium FONASURF vise le rapprochement des trois projets lauréats de la phase 1 : “SEAMEX”, “SISCA” et “FLEXSEAMINING”, portés respectivement par COMEX, DCNS et Technip. »

- une liaison fond-surface capable de connecter aux installations de surface les engins miniers d'extraction opérant sur le fond. Cette liaison doit résister à une pression hydrostatique de 200 bars (pour un gisement situé à - 2 000 m de profondeur) – et davantage si l'on tient compte de la pression interne du système de pompage – et à la fatigue liée aux mouvements constants du navire et des engins miniers. Cette liaison doit aussi résister sur une longue durée aux phénomènes d'usure intense du mélange eau + minerai circulant dans la conduite (composée de sections verticales, de sections horizontales et de sections courbées).

L'un des objectifs à atteindre par FONASURF consiste donc en la mise au point d'une liaison fond-surface flexible universelle, qui soit capable de s'adapter à tout système de pompage, à toutes conditions de mer et, surtout, qui soit capable de résister à l'usure intense de la circulation du mélange eau + minerai. En 1985, les tests GEMONOD/Ifremer ont bien utilisé une liaison fond-surface comportant des conduites flexibles pour récupérer des nodules à - 5 000 m de profondeur, mais les technologies des conduites flexibles de l'époque ne permettaient que de très petits diamètres (inférieurs à 10 cm et donc très loin des 25 cm de diamètre nécessaires pour une production économiquement rentable).

Technip est le leader mondial de la conception et de la fabrication des conduites flexibles. Grâce à ses unités de production localisées en France, au Brésil et en Malaisie, ce groupe est le principal fabricant mondial de systèmes de conduites flexibles nécessaires au développement des champs pétroliers et gaziers. Technip a été l'initiateur de la technologie de la conduite flexible au début des années

1970 et a invariablement fourni à ses clients des produits à très haut niveau de fiabilité et de qualité, et ce quelles que soient l'inhospitalité et les profondeurs d'eau des environnements *offshore*. Technip est fortement mobilisé pour maintenir son *leadership* technologique *via* ses unités de recherche et de développement spécialisées dans chacune de ses lignes de produits. FONASURF représentera une nouvelle application technologique majeure ouvrant de nouvelles possibilités d'utilisation de la technologie des conduites flexibles.

La situation en Europe

Les travaux menés depuis plus de quatre ans par le groupe synergique « Grands fonds marins » à l'initiative du CMF ont conduit à la signature (le 20 octobre 2015, à Bremerhaven, en Allemagne) de deux accords destinés à prolonger et approfondir la coopération franco-allemande dans le domaine de la mise en valeur durable des richesses des grands fonds marins.

Le premier est intergouvernemental et annonce le renforcement du dialogue bilatéral entre les deux États sur cette thématique.

Le deuxième, conclu entre la *Deepsea Mining Alliance* et le Cluster Maritime Français, définit plus concrètement l'esprit, le champ et les étapes d'une possible coopération entre les industriels et les acteurs économiques français et allemands (Geomar, BAUER Maschinen GmbH, Harren Shipyard...). Cet important accord est le point de départ de nouvelles réflexions, et potentiellement de coopérations, tant en matière de développements technologiques communs que de campagnes d'exploration partagées.

À titre d'exemple, la société BAUER Maschinen GmbH a développé, en 1976, la BG 7, sa première machine de forage. En matière de travaux publics spécialisés, les machines de forage sont essentielles, par exemple, pour construire les fondations d'une installation éolienne en pleine mer. BAUER Maschinen GmbH est aujourd'hui leader mondial dans le secteur des appareils de forage profond. Son nouvel outil, baptisé MEBO, comprend deux parties. Tout d'abord, un guide, qui se présente sous la forme d'un trépied avec une mise à niveau automatique à l'aide de vérins, puis la foreuse proprement dite, qui se glisse dans le guide une fois ce dernier installé. Elle comporte une tête rotative de 75 mm de diamètre qui tourne à l'aide d'un circuit hydraulique. Ce système dispose d'un autre atout : tout peut être mis en œuvre à l'aide d'un bateau rudimentaire muni d'une petite grue ; il n'est pas nécessaire de mobiliser un ponton pour eaux profondes, voire un bâtiment conçu spécialement pour cette opération (comme c'est parfois le cas pour les forages pétroliers en eaux profondes, à - 1 000 m et au-delà).

En Europe, de nombreuses organisations mènent des activités liées à l'exploitation minière des fonds marins, qu'il s'agisse de fournisseurs de technologies ou d'exploitants de gisements.

Malgré sa taille modeste, ce secteur pourrait contribuer à une croissance durable et à la création d'emplois pour les prochaines générations. Mais nous manquons de connaissances sur les grands fonds marins ; la prudence est donc de mise. C'est pourquoi la Commission européenne a lancé plusieurs études et projets visant à examiner les avantages et les inconvénients de ce type d'exploitation minière, ainsi qu'à approfondir nos connaissances sur le sujet.

Lancé en 2014, le projet Midas aborde cette thématique au niveau européen, avec pour objectifs : d'identifier l'échelle, la nature et la durée des impacts potentiels de l'exploitation des ressources sur les écosystèmes profonds, de proposer des solutions pratiques et des codes de bonne conduite pour une exploitation raisonnée des points de vue environnemental et sociétal et de développer des technologies financièrement abordables permettant l'évaluation et le suivi de l'impact environnemental de l'exploitation minière sous-marine, ainsi que la restauration des écosystèmes qui seraient endommagés.

DEVELOPPER LES TALENTS POUR UN MIX ÉNERGÉTIQUE DURABLE.



Établissement public d'enseignement supérieur et de formation professionnelle continue, l'INSTN développe et entretient les compétences des acteurs de l'énergie décarbonée.

Institut du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) depuis 60 ans, l'INSTN bénéficie de ressources scientifiques et technologiques d'exception.

NOTRE OFFRE

Energie nucléaire et
applications industrielles
et médicales

Energies alternatives

Pilotage des projets
énergétiques

23
Mentions
de master

1 400
Experts
du monde
de l'énergie

Une expertise unique
au service des entreprises



Une offre complète
dans l'accompagnement
des projets



Des ressources
et moyens d'exception



85 %
Insertion
professionnelle

Une approche partenariale
au plus près des enjeux
opérationnels



instn

Un atout dans
la conquête de marchés
à l'international



6 400
stagiaires en
formation
continue

Bilan énergétique de la France pour 2015

Sous-direction des statistiques de l'énergie, CGDD, MEEM

Avant-propos

Le bilan de l'énergie est un document comptable élaboré selon des normes définies par l'Union européenne, l'Agence internationale de l'énergie et l'Organisation des Nations Unies. Il donne une vision d'ensemble du circuit d'approvisionnement et d'utilisation par secteur de chaque source d'énergie : charbon, pétrole, gaz, électricité, énergies renouvelables thermiques et déchets. Il fournit des éléments sur l'efficacité énergétique, sur la dépendance vis-à-vis des autres pays en matière d'approvisionnement et sur les émissions de dioxyde de carbone du pays.

Le bilan énergétique de la France, qui existe sous sa forme actuelle depuis 1982, est cette année enrichi notamment par la réalisation de nouveaux bilans énergétiques en Outre-mer, pour les filières charbon et produits pétroliers.

Comme les années précédentes, les *Annales des Mines* ont fait le choix de ne procéder, dans ce numéro de *Responsabilité et environnement*, qu'à une reproduction partielle de cette volumineuse référence statistique (de 150 pages) qu'est le bilan de l'énergie 2015.

Un bilan qui est consultable sur le site du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, à l'adresse suivante :

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1080/bilan-energetique-france-2015.html>

Quel contexte économique et climatique en 2015 ?

En raison notamment du ralentissement de la croissance économique mondiale, la demande de pétrole croît moins vite que l'offre en 2015. L'excédent d'offre qui en résulte se traduit par un effondrement du prix du pétrole.

La France connaît, quant à elle, une reprise économique modérée. 2015 est par ailleurs la troisième année la plus chaude jamais enregistrée en France, derrière 2014 et 2011.

Une croissance économique mondiale ralentie et un marché du pétrole toujours excédentaire en 2015

En 2015, le produit intérieur brut (PIB) mondial augmente de 3,1 %, soit à un rythme légèrement moins élevé qu'en 2014 (+3,4 %).

La zone euro bénéficie, en 2015, d'une croissance plus soutenue qu'en 2014 (+1,6 %, après +0,9 %) et plus ho-

mogène sur l'ensemble des États membres. L'Allemagne connaît une croissance proche de celle de 2014 (+1,5 %). La situation s'améliore sensiblement en France, où le PIB s'accroît de 1,1 %, après +0,2 % en 2014. En Espagne, la croissance dépasse 3 %. L'Italie renoue avec la croissance (+0,8 %). Le Royaume-Uni enregistre une hausse de son PIB plus faible qu'en 2014, mais celle-ci reste supérieure à celle de la zone euro.

Aux États-Unis, la croissance de 2015 est équivalente à celle de 2014, en dépit d'un net ralentissement au dernier trimestre. Celui-ci s'explique notamment par une faiblesse des exportations, ainsi que par une demande intérieure moins soutenue que prévu.

Le Japon retrouve une légère croissance après une stagnation de son économie en 2014. Celle-ci est néanmoins faible du fait d'une consommation privée peu soutenue.

Poursuivant la tendance observée depuis plusieurs années, les pays émergents et en développement affichent globalement une croissance économique supérieure à la moyenne mondiale, mais plutôt moins bonne qu'en 2014. La croissance se situe autour de 7 % en Chine et en Inde. En 2015, les pays MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) enregistrent une hausse de leur PIB de 2,3%, elle est légèrement inférieure à celle de 2014.

Le volume du commerce mondial s'accroît, mais à l'image de l'ensemble de l'économie, la progression est moins forte qu'en 2014. La croissance du commerce a été particulièrement faible par rapport à la croissance du PIB en 2015 dans les pays émergents et les pays en développement.

Un marché du pétrole de nouveau excédentaire en 2015

La demande mondiale de pétrole progresse de 2,0 % en 2015, après +1,0 % en 2014. Elle s'établit à 94,7 millions de barils/jour (Mbl/j).

Comme les années précédentes, la demande mondiale est tirée par les pays hors OCDE (+3,0 %). Toutefois, en 2015, et contrairement à 2014, la demande de pétrole augmente également dans les pays de l'OCDE (+1,1 %).

La demande des pays hors OCDE continue de progresser à un rythme proche de celui des années passées. En Chine, la demande augmente à un rythme deux fois supérieur à celui de 2014. Dans les autres pays d'Asie hors OCDE, la demande progresse également fortement (+4,1 %).

La situation plus favorable dans l'OCDE en 2015 s'explique par le redressement de la demande européenne

(+1,9%) après trois années consécutives de baisse. La demande nord-américaine repart légèrement à la hausse après avoir stagné en 2014. Le bilan s'améliore également pour la zone OCDE Asie, mais la demande de pétrole y recule encore légèrement (-0,4 %).

Au total, l'offre globale de pétrole atteint 96,4 Mbl/j, progressant à un rythme quasi identique à celui de 2014, et plus rapidement que la demande. L'excédent de l'offre par rapport à la demande augmente et avoisine 2 Mbl/j. Le redressement de la demande ne suffit pas à absorber la hausse de l'offre.

De ce fait, les cours ont confirmé leur mouvement de chute entamé en 2014 : la baisse du baril de pétrole en dollars a atteint 47,2 % en 2015.

Figure 1 : Indicateurs économiques mondiaux.

Evolution annuelle	2014	2015
PIB* mondial à prix constants	3,4	3,1
Pays avancés	1,8	1,9
dont Etats-Unis	2,4	2,4
Zone euro	0,9	1,6
dont : Allemagne	1,6	1,5
France	0,2	1,1
Pays émergents et en développement	4,6	4,0
Volume du commerce mondial	3,5	2,8
Cours du pétrole	-7,5	-47,2

* Produit intérieur brut.

Source : FMI, avril 2016.

Figure 2 : Offre et demande mondiales de pétrole.

	2012	2013	2014	2015	Evolution 2014-2015 (en %)
Demande OCDE	45,9	46,0	45,7	46,2	1,1
Demande non-OCDE	44,8	45,9	47,1	48,5	3,0
dont Chine	9,9	10,3	10,6	11,3	6,6
autre Asie	11,4	11,8	12,1	12,6	4,1
Moyen-Orient	7,8	7,9	8,0	8,2	2,5
Demande totale	90,7	91,9	92,8	94,7	2,0
Offre totale	90,9	91,4	93,7	96,4	2,9
écart offre-demande	0,2	-0,5	0,9	1,7	

En millions barils/jour

Source : AIE Oil Market Report, 14 avril 2016.

La croissance du PIB s'accélère

En 2015, la croissance de l'économie française s'affermi : le produit intérieur brut (PIB) a crû de 1,3 % en euros constants, après + 0,6 % en 2013 et 2014. La consommation des ménages accélère et les dépenses d'investissement rebondissent.

La production industrielle en volume se redresse nettement en 2015 (+ 1,7 %, après, - 0,3 %). Elle demeure cependant inférieure de 8,5 % à son plus haut niveau, atteint en 2007. La production manufacturière accélère (+ 1,7 %, après + 0,6 % en 2014). La production de gaz et d'électricité rebondit nettement (+ 2,9 %). La production des branches de services principalement marchands se raffermi (+ 1,9 %, après +1,4 %). En revanche, dans la construction, la production diminue de nouveau (- 2,1 %, après - 2,7 % en 2014).

Les dépenses de consommation des ménages augmentent en 2015 (+ 1,5 % en euros constants, après + 0,7 % en 2014). Le rebond de la consommation en biens ma-

nufacturés (+ 2,1 %, après + 0,5 %) s'explique principalement par les achats d'automobiles (+ 4,4 %, après - 0,1 %) et les dépenses en produits agroalimentaires (+ 1,5 %, après - 0,4 % en 2014).

Les dépenses de services progressent au même rythme qu'en 2014 (+ 1,0 %). Les dépenses en énergie-eau-déchets se redressent en 2015 (+ 2,2 %, après - 9,0 %), du fait notamment de besoins en chauffage accrus, les températures hivernales ayant été un peu moins élevées qu'en 2014.

La formation brute de capital fixe (FBCF) – ou investissement de l'ensemble des agents économiques – se redresse après deux années de baisse (+ 1,0 %, après - 0,3 % en 2014 et - 0,8 % en 2013). Son niveau reste cependant inférieur de 5,2 % à celui de 2008. Ce rebond en 2015 est imputable à une accélération de la FBCF des entreprises ainsi qu'à un moindre recul de la FBCF des ménages et des administrations. L'investissement des ménages diminue en effet de façon beaucoup moins marquée que l'année précédente (- 0,8 %, après - 3,5 % en 2014), grâce à une reprise des transactions immobilières.

L'accélération de l'investissement des entreprises non financières (+ 2,8 %, après + 1,6 %) est particulièrement marquée dans les activités scientifiques et techniques (+ 3,6 %, après + 1,6 %) et les services d'information-communication (+ 5,1 %, après + 4,2 %), tandis que la baisse s'atténue dans la construction (- 0,3 %, après - 1,7 %).

Les décisions des entreprises influent également sur l'activité *via* leur comportement de stockage. Les entreprises, qui avaient fortement accru leurs stocks en 2014, continuent de stocker en 2015, mais dans une bien moindre mesure. Ainsi, les stocks contribuent positivement à la croissance du PIB, à hauteur de 0,1 point. Au total, en 2015, l'investissement des entreprises et le stockage contribuent à hauteur de + 0,5 point à la croissance du PIB, après + 0,9 point en 2014.

En 2015, les importations en volume continuent de progresser (+ 6,6 %, après + 4,7 %), et ce plus fortement que les exportations (+ 6,1 %, après + 3,3 %) ; il en résulte une contribution négative à l'activité, à hauteur de - 0,3 point de PIB, après - 0,5 point en 2014. Cette augmentation des importations concerne principalement les hydrocarbures, les biens d'équipement, les automobiles et les autres biens manufacturés, notamment les produits chimiques. Les exportations doivent leur dynamisme accru principalement aux produits pétroliers raffinés, aux biens d'équipement, aux matériels de transport et aux autres biens manufacturés, notamment l'habillement. Le solde des échanges extérieurs en valeur s'améliore, quant à lui, très sensiblement (+ 12,5 milliards d'euros, soit + 0,6 point de PIB) à la faveur du repli des prix des hydrocarbures.

En 2015, le revenu disponible brut des ménages progresse de 1,4 % en valeur, après + 0,8 % l'année précédente. Parallèlement, le prix de la dépense de consommation finale diminue pour la première fois depuis 2009 (- 0,2 % contre + 0,1 % en 2014), du fait notamment des baisses des prix des produits pétroliers, financiers et agroalimentaires.

Figure 3 : Évolution des principaux agrégats nationaux.

En %

	2011	2012	2013	2014	2015
PIB	2,1	0,2	0,6	0,6	1,3
Dépenses de consommation finale	0,5	0,3	0,6	0,7	1,2
Formation brute de capital fixe	0,5	0,1	-0,2	-0,1	0,2
Exportations	6,9	2,5	1,9	3,3	6,1
Importations	6,3	0,7	2,1	4,7	6,6

Ménages et administrations publiques.

Source : INSEE, comptes nationaux, base 2010.

Le pouvoir d'achat du revenu disponible augmente donc plus vite que le revenu disponible (+ 1,6 %, après + 0,7 % en 2014). Cette évolution est mesurée sur l'ensemble des ménages. Compte tenu de la croissance de la population, le pouvoir d'achat au niveau individuel (pouvoir d'achat par unité de consommation) progresse de 1,1 % en 2015, après avoir stagné en 2014 et surtout diminué les trois années précédentes.

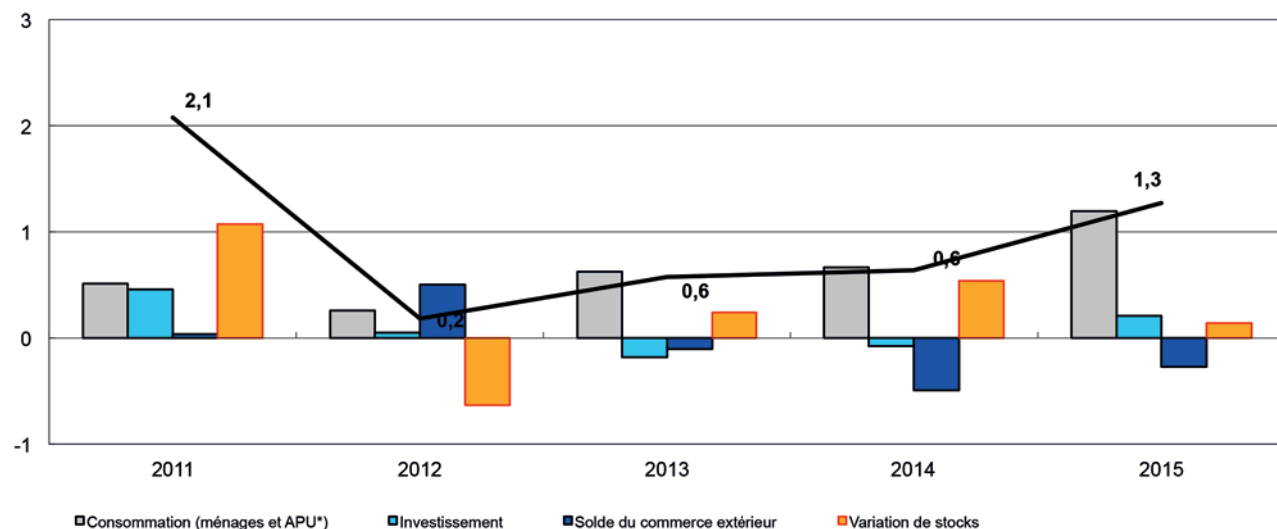
Climat en 2015 : troisième année la plus chaude depuis 1900, pluviométrie déficitaire et ensoleillement supérieur à la normale

À l'échelle mondiale, l'année 2015 est la plus chaude de l'ère industrielle, battant le précédent record établi en 2014. En France métropolitaine, avec une température moyenne de 13,1°C sur l'année, soit 1,0°C de plus que celle de la période de référence (1986-2015), il s'agit de la troisième année la plus chaude depuis 1900, juste derrière 2014 (13,3°C) et 2011 (13,2°C). Sur les cinq dernières années, seules 2012 et 2013 n'ont pas présenté de caractère exceptionnel, avec des températures proches de celles de la période de référence.

La France a toutefois connu quelques épisodes de froid en 2015, avec des températures moyennes inférieures aux normales mensuelles en février, septembre et octobre. A *contrario*, le début de l'été a été particulièrement chaud, avec deux épisodes caniculaires en juillet. Mais le fait le plus notable réside dans le climat exceptionnellement doux des deux derniers mois de l'année. La température moyenne observée en décembre a notamment atteint un record, dépassant de plus de 4°C celle de la période de référence.

Contrairement aux deux années précédentes, durant lesquelles les précipitations étaient importantes, l'année 2015 s'est avérée beaucoup moins pluvieuse et s'est même achevée par le mois de décembre le plus sec observé sur la période 1959-2015. En moyenne, la pluviométrie a été inférieure de plus de 15 % par rapport à la normale (mesurée sur la période 1981-2010), selon Météo-France. Si la quasi totalité du territoire est affectée par ce déficit de précipitations, certaines régions sont cependant plus touchées que d'autres ; c'est le cas notamment des départements s'étendant du nord de l'Aquitaine au nord-

Figure 4 : Évolution du PIB en volume et contributions à cette évolution.

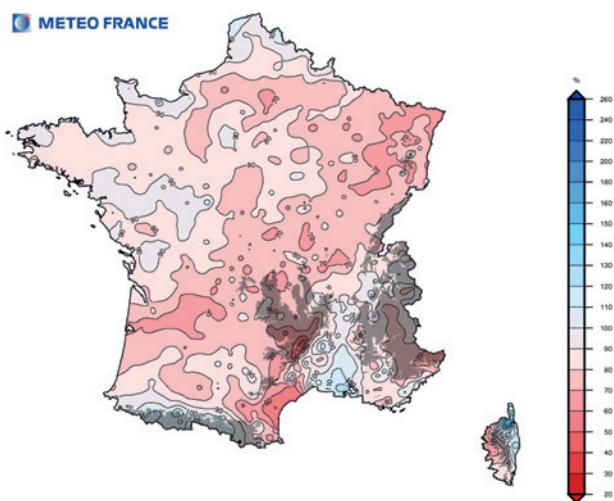


Administrations publiques.

Source : INSEE, comptes nationaux, base 2010.

Figure 5 : Cumul des précipitations en 2015 - Rapport à la moyenne de référence (1981-2010)

En %



Source : Météo-France.

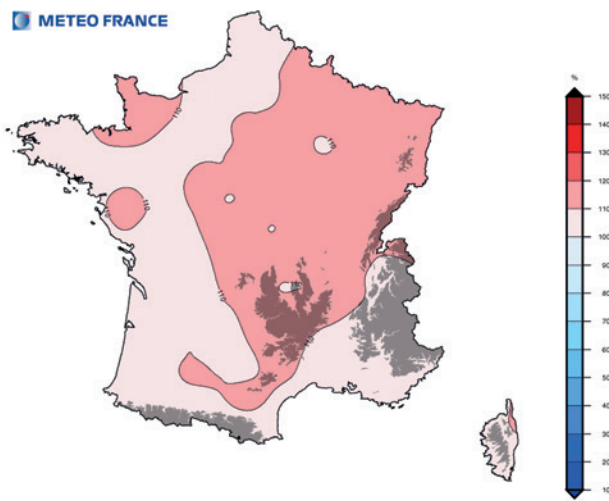
est de la France, du massif des Cévennes ou encore de l'Hérault et de l'Aude, qui accusent des déficits en précipitations de plus de 20 %, voire de plus de 30 % dans certaines zones (voir la Figure 5).

Toujours selon Météo-France, la durée annuelle d'ensoleillement a été supérieure à la normale sur l'ensemble du territoire (mesurée sur la période 1991-2010), avec un excédent de plus de 10 % sur un gros quart nord-est du pays, le Massif Central ainsi qu'au nord de la Vendée et en Basse-Normandie (voir la Figure 6).

En 2015, les besoins en énergie pour le chauffage ont été inférieurs à la moyenne. En effet, l'énergie consommée pour le chauffage au cours d'une journée est considérée comme proportionnelle au nombre de « degrés-jours », c'est-à-dire

Figure 6 : Durée d'ensoleillement en 2015 - Rapport à la moyenne de référence (1991-2010)

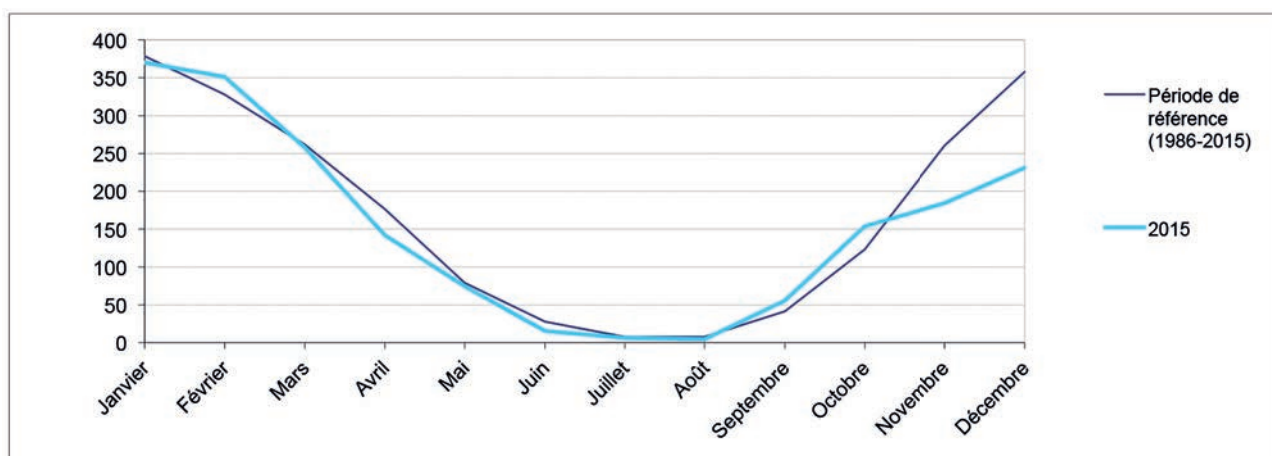
En %



à l'écart entre la température moyenne de la journée et une température de confort thermique minimale, lorsque la première température est inférieure à cette dernière.

Le SOeS, comme d'autres organismes, fixe cette température de confort thermique minimale déclenchant le chauffage à 17°C. Par rapport à la référence, qui est la moyenne sur la période 1986-2015, l'année 2015 a compté 10,0 % de degrés-jours de moins que la moyenne et 10,2 % en s'intéressant à la seule « saison de chauffe », période de l'année qui va de janvier à mai et d'octobre à décembre inclus (voir la Figure 7). Ainsi, la consommation évitée suite à un moindre recours au chauffage est évaluée, selon la méthode de correction climatique du SOeS, à 3,3 Mtep par rapport à la période de référence.

Figure 7 : Nombre de degrés-jours mensuels.



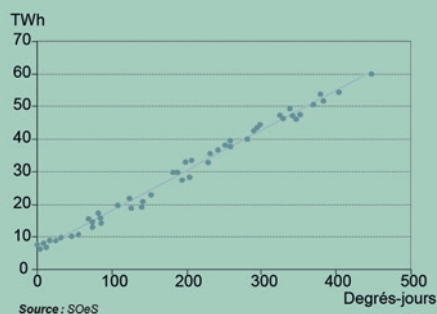
Note : plus le nombre de degrés-jours est élevé, plus le climat est rude.

Source : Météo-France.

Températures et consommation d'énergie : la correction des variations climatiques – l'exemple du gaz

La consommation de gaz des clients reliés au réseau de distribution est consacrée pour l'essentiel au chauffage. Une petite part est utilisée pour la cuisson et une part très faible est utilisée pour un processus de production (les gros consommateurs sont raccordés directement au réseau de transport).

Quantité de gaz distribué en fonction des degrés jours du mois entre 2011 et 2015



Le graphique ci-contre met en évidence, sur un exemple particulier, le lien entre les températures mensuelles (exprimées en degrés-jours) et la consommation de gaz. Il présente pour ces cinq dernières années la consommation de gaz distribué (en ordonnées) en fonction des degrés-jours (en abscisses). La proportionnalité est presque parfaite sur cet exemple. Elle permet de conclure qu'un degré-jour de plus, c'est-à-dire une baisse d'un degré pendant un jour où il fait moins de 17° C, entraîne une augmentation de la consommation de gaz de 123 GWh.

Cette relation illustre l'intérêt du calcul de données « corrigées des variations climatiques », qui consiste à calculer ce qu'auraient été les consommations si les températures avaient été « normales », c'est-à-dire égales à celles d'une période de référence. Des séries de consommation qui rendent mieux compte de la seule évolution des comportements des consommateurs sont ainsi obtenues.

Quel est le poids de l'énergie dans l'économie et la société françaises ?

La chute du prix du pétrole brut, quasiment divisé par deux, permet à la France d'abaisser sa facture énergétique en dessous de 40 milliards d'euros. Cette baisse se répercute sur les dépenses énergétiques des ménages, en diminution en moyenne de 2,9 % par rapport à 2014, le recul des prix des carburants faisant plus que compenser la légère hausse de consommation dans le logement.

Prix de l'énergie sur les marchés internationaux et européens en 2015 : un prix du pétrole divisé par deux

Prix des produits pétroliers

En moyenne sur l'année 2015, le Brent s'établit légèrement au-dessus de la barre des 50 \$, à 52,4 \$ le baril (bl) précisément. Alors qu'il s'élevait encore à près de 100 \$/bl en moyenne en 2014, il cède ainsi près de la moitié de sa valeur en l'espace d'un an (- 47,2 %) pour retrouver un niveau comparable à celui observé en 2005. Mesuré en euros, le recul du prix du baril de Brent sur un an est moindre (- 36,4 %), du fait du renchérissement du dollar vis-à-vis de la monnaie européenne, celui-ci s'échangeant à 0,901 € en moyenne en 2015, contre 0,754 € l'année précédente.

Après avoir excédé les 100 \$ quasi continûment depuis début 2011, le cours du baril de Brent a dégringolé au second semestre 2014 pour tomber à 47,7 \$ en janvier 2015. Il a ensuite connu un léger rebond au premier semestre 2015, flirtant avec la barre des 60 \$ de février à avril, puis en dépassant celle-ci les deux mois suivants. Cependant, dès le début de l'été, il chute de nouveau jusqu'en fin

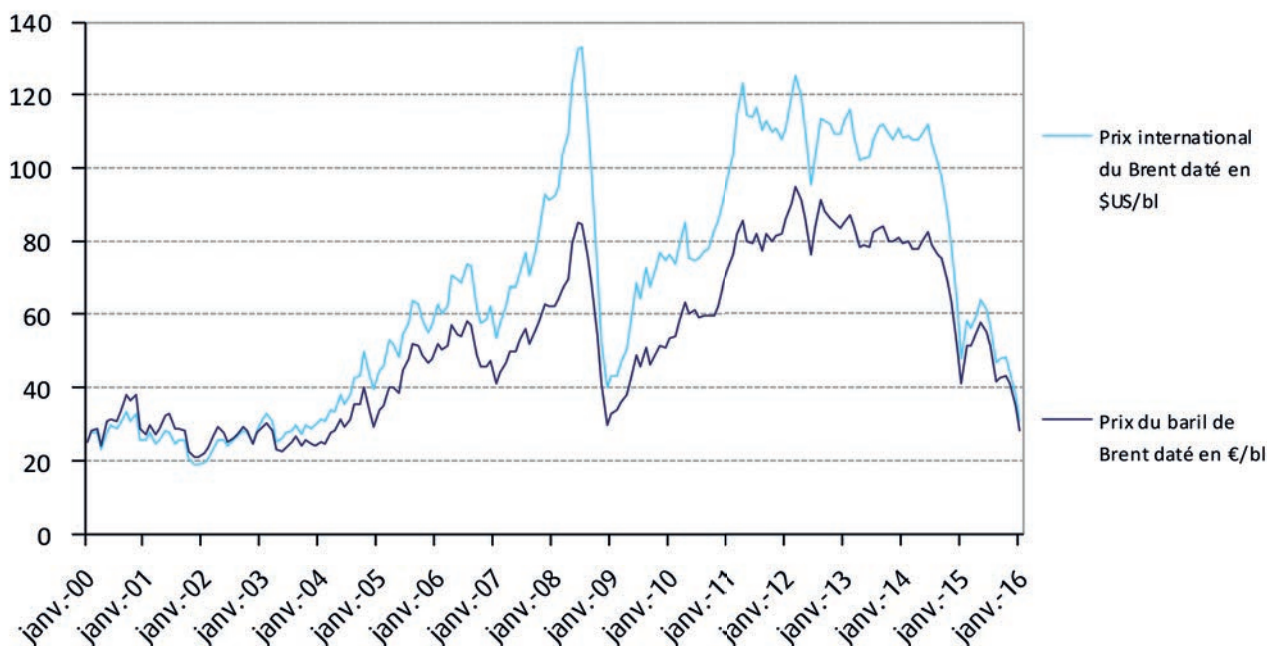
d'année, cédant 38 % de sa valeur en six mois pour s'établir à 38,1 \$ en décembre 2015. Il tombe même à 30,7 \$ en janvier 2016, soit à un niveau inférieur à celui observé fin 2008 au plus fort de la crise et à un niveau proche de celui qui se rencontrait au début des années 2000, mais très loin de son record enregistré le 3 juillet 2008, à 145 \$/bl.

La forte baisse observée entre la mi-2014 et début 2016 s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs. D'une part, la demande mondiale s'est affaiblie, grevée notamment par le ralentissement de l'économie chinoise. D'autre part, l'offre sur le marché mondial s'est maintenue à un niveau excédentaire face à la demande, une offre alimentée par l'afflux de pétrole de schiste américain, qui lui a plutôt bien résisté au recul des prix, ainsi que par la décision des pays de l'Opep prise à la fin novembre 2014, puis confirmée en juin et de nouveau en novembre 2015, de maintenir inchangés les quotas de production de l'organisation, à 30 millions de barils par jour. La perspective du retour de l'Iran sur le marché pétrolier, concrétisée par la levée des sanctions internationales prises à l'encontre de ce pays à la mi-janvier 2016, a également contribué à tirer les cours vers le bas. Ces effets l'ont globalement emporté face aux fortes tensions géopolitiques affectant certains pays producteurs, tensions qui, ajoutées à un regain temporaire de la demande mondiale en début d'année 2015, expliquent le léger rebond des prix au premier semestre (voir la Figure 9).

Le prix du charbon vapeur

En moyenne sur 2015, le prix spot du charbon vapeur sur le marché d'Anvers-Rotterdam-Amsterdam (ARA) s'établit à 56,7 \$/t, chutant fortement, de 24,6 %, par rapport à 2014. Hormis quelques légers sursauts en février, juillet et novembre, le prix a décliné régulièrement durant l'année pour se situer, en décembre, à un niveau plancher se situant en-dessous des 50 \$/t, à 48,2 \$/t précisément

Figure 9 : Cotations moyennes mensuelles du Brent daté.



Sources : Reuters, DGEC.

(voir la Figure 10). Tout comme pour les cours du pétrole, la dépréciation sensible de l'euro face au dollar atténue la baisse du prix spot du charbon vapeur mesuré en euros, qui demeure toutefois significative (- 9,8 %). Celui-ci s'établit à 51,1 €/t Coût, assurance et fret (CAF) en 2015 contre 56,7 €/t en 2014.

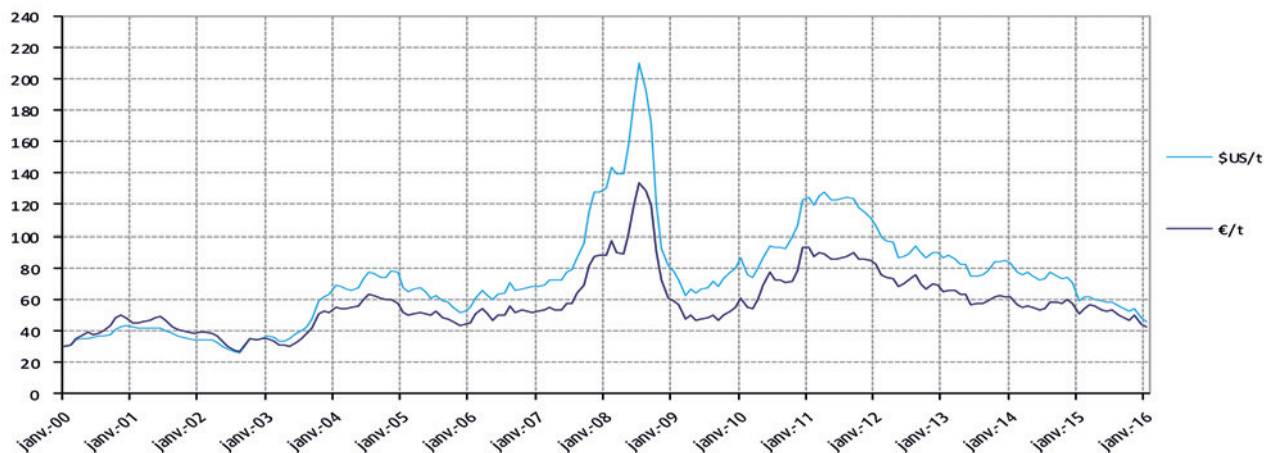
Le prix du charbon se rapproche ainsi de son niveau du début des années 2000, mais reste très loin de son maximum de juillet 2008, soit une évolution similaire à celle du prix du pétrole. Toutefois, la baisse du prix du charbon s'inscrit dans une tendance plus longue (entamée en 2011) que celle du prix du pétrole. Elle est notamment liée au développement de l'exploitation du gaz de schiste aux États-Unis et à son utilisation pour la production électrique

au détriment du charbon, ainsi qu'au repli de la demande de charbon en Chine. Outre le ralentissement de la croissance économique, ce recul s'explique également par une modification de la structure de l'économie chinoise, avec une baisse de la part de l'industrie lourde au profit des services, et par l'instauration de politiques s'orientant progressivement en faveur de l'efficacité énergétique et de l'environnement.

Prix de gros du gaz naturel

Le prix du gaz naturel sur le marché National Balancing Point (NBP) à Londres (prix de référence pour le marché continental européen) s'établit à 6,5 \$/MBtu en moyenne sur l'année 2015. Pénalisé par la faiblesse des prix des

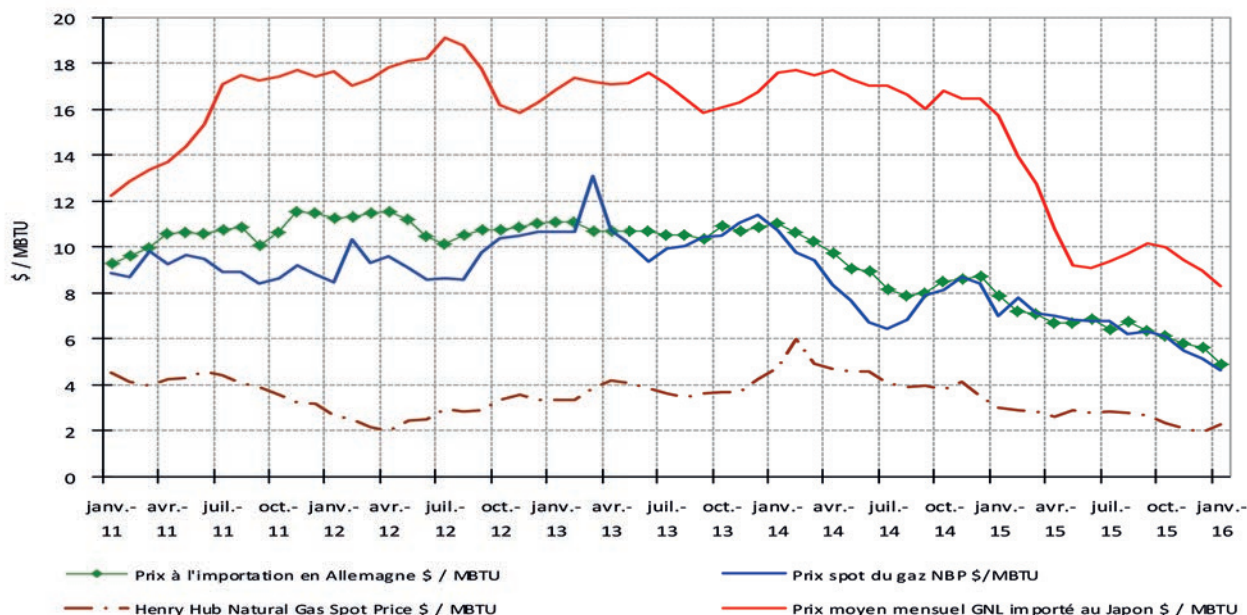
Figure 10 : Prix spot du charbon vapeur sur le marché Anvers-Rotterdam-Amsterdam.



Source : Mc Closkey, North West steam coal marker.

Figure 11 : Prix moyen à l'importation du gaz en Allemagne et du gaz naturel liquéfié (GNL) au Japon, prix spot du gaz sur le marché National Balancing Point (NBP) de Londres et sur le marché Henry Hub américain.

En dollars/million de British thermal unit (MBtu)



Sources : Deutsches Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ; U.S. Energy Information Administration ; National Balancing Point à un mois ; Japanese Ministry of Finance.

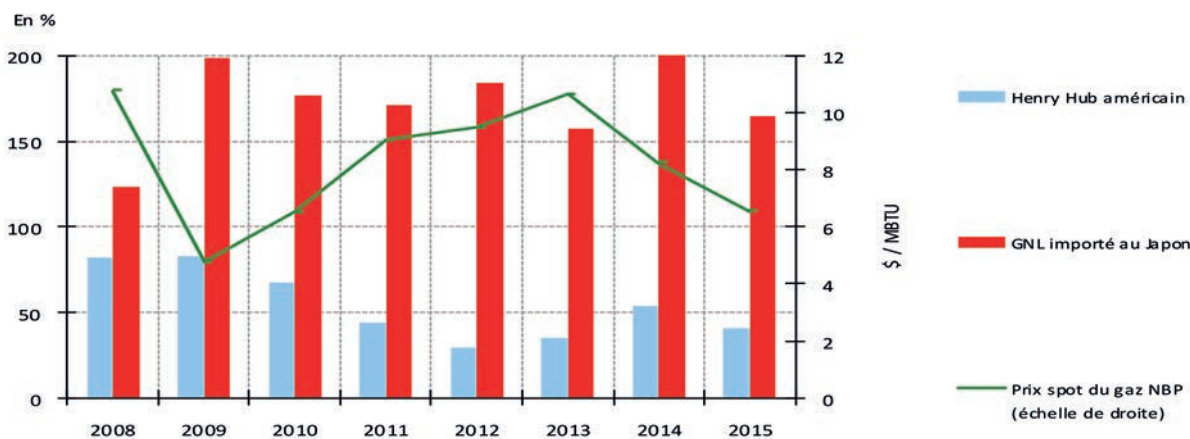
énergies fossiles concurrentes que sont le pétrole et le charbon, d'une part, et par la douceur du climat, d'autre part, il recule de près de 21 % par rapport à 2014, alors qu'il avait déjà connu une baisse d'un même ordre de grandeur l'an dernier. Mesuré en euros par mégawatt-heure, il se replie d'un peu plus de 5 % en 2015, à 20,1€/MWh.

Hormis un rebond à l'automne 2014, la baisse a été continue tout au long de ces deux dernières années, le prix spot NBP chutant à 5,1 \$/MBtu en décembre 2015 et passant sous la barre des 5 \$/MBtu en début 2016.

Les prix de gros du gaz sur les trois grandes zones de marché que sont l'Europe occidentale, l'Amérique du

Nord et l'Asie-Pacifique ont considérablement divergé depuis le début de la décennie, en raison notamment de l'essor du gaz naturel non-conventionnel aux États-Unis. Celui-ci a exercé une forte pression à la baisse sur le prix de gros du gaz sur le marché Henry Hub américain, un prix qui a été deux fois et demi moins élevé que le prix NBP en moyenne en 2015. À l'inverse, le gaz reste significativement plus cher en zone Asie-Pacifique qu'en Europe, même si la chute des cours du pétrole, sur lesquels sont indexés la plupart des contrats de long terme d'approvisionnement en gaz, atténue l'écart entre les deux zones en 2015 par rapport à 2014.

Figure 12 : Rapport entre les prix Henry Hub aux États-Unis et « gaz naturel liquéfié (GNL) importé, au Japon » avec le prix « National Balancing Point (NBP) à Londres ».



Sources : U.S. Energy Information Administration ; National Balancing Point à un mois ; Japanese Ministry of Finance.

Note : En 2015, le prix Henry Hub représente 40 % du prix NBP, le prix du GNL importé se situe à 165 %.

Les approvisionnements en France restent largement dominés par les contrats de long terme. Si la part des achats sur contrat à court terme (deux ans au plus) a fortement progressé entre 2010 et 2012 en raison notamment du développement du commerce du GNL, la captation par l'Asie de l'essentiel des cargaisons de GNL en 2013 a mécaniquement induit une baisse de la part des contrats à court terme. La baisse des prix spot et la poursuite de l'ouverture du marché à la concurrence ont favorisé depuis 2014 les importations sur contrats de court terme. La part de ces dernières dans l'ensemble des importations françaises de gaz naturel a ainsi bondi de plus de 7 points en 2014, à 21,9 %, avant de refluer légèrement en 2015, à 20,9 %, en raison de la reprise des importations sur contrats de moyen terme (voir la Figure 13).

Figure 13 : Répartition des importations françaises selon le type de contrat.

En %	2011	2012	2013	2014	2015
> 10 ans	80,4	80,3	83,8	76,8	75,0
> 2 ans et ≤ 10 ans	5,2	4,0	1,8	1,3	4,1
≤ 2 ans	14,4	15,7	14,4	21,9	20,9
Total	100	100	100	100	100

Source : SOeS, enquête mensuelle de conjoncture gazière.

Le prix de gros de l'électricité

L'électricité peut s'échanger de gré à gré ou sur des bourses. Epex Spot (European Power Exchange) est la bourse du marché spot français (ainsi que des marchés allemand, autrichien, suisse, luxembourgeois et, depuis le printemps 2015, des marchés néerlandais, belge et britannique). Sur le marché français, les volumes traités à court terme *via* Epex Spot se sont considérablement accrus en l'espace d'un an (+ 54,9 %) pour s'élever à 110 TWh, en raison notamment de la baisse du recours à « l'accès régulé à l'électricité nucléaire historique » (Arenh) par les fournisseurs alternatifs. Les produits à terme peuvent, quant à eux, s'échanger sur la bourse EEX Power Derivatives.

En moyenne sur 2015, le prix spot sur le marché Epex (voir la Figure 14) de l'électricité livrable en France s'établit à 38,5 €/MWh, contre 34,6 €/MWh en 2014. Ce léger rebond fait suite à trois années consécutives de baisse, alors que le prix spot de l'électricité avait atteint, en 2011, son plus haut niveau depuis la crise économique de la fin des années 2000, à 48,9 €/MWh. Toutefois, il reflète surtout le fait que le climat a été globalement moins doux en 2015 qu'en 2014 (à l'exception notamment du mois de décembre). Les prix à terme de l'électricité, insensibles aux variations climatiques conjoncturelles, décroissent quant à eux sensiblement en 2015. Le prix du produit « base 2016 » est ainsi tombé de 40 €/MWh fin 2014 à 33,5 €/MWh fin 2015 (source : EEX Power Derivatives). Cette tendance a été générale en Europe du Centre Ouest. La France, exportatrice nette d'électricité, demeure l'un des pays les moins chers sur le marché de gros de l'électricité, derrière l'Allemagne toutefois ⁽¹⁾.

La facture énergétique recule de 28 % en 2015

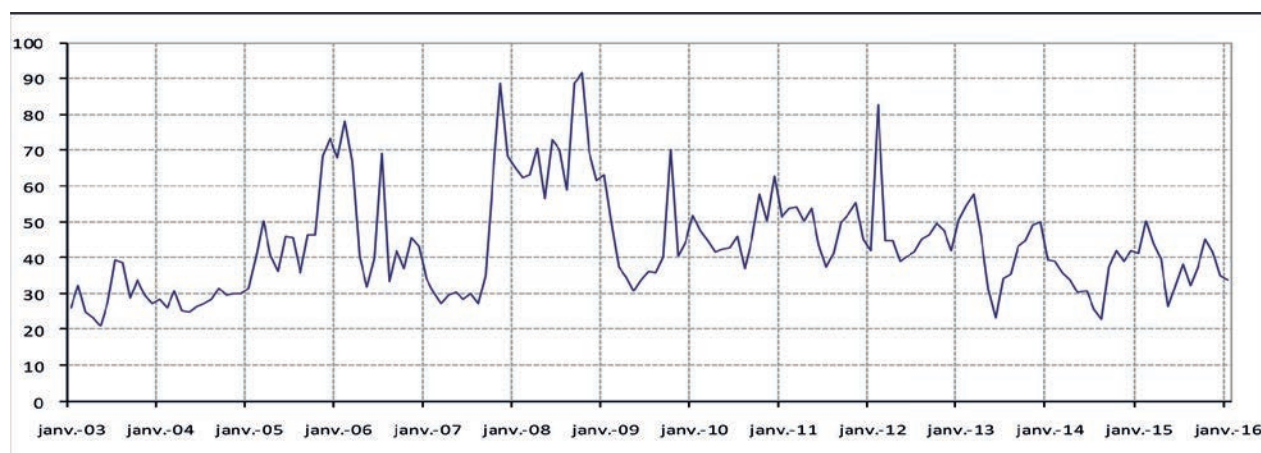
La réduction de la facture énergétique de la France (voir l'Encadré), initiée depuis 2012, s'accélère en 2015, conséquence directe de la baisse générale du prix des énergies et, plus particulièrement, de la chute des cours du pétrole depuis l'été 2014.

Chutant de près de 28 % en l'espace d'un an, la facture énergétique s'établit à 39,7 milliards d'euros (Md€) d'après les Douanes, loin de son niveau record de 2012, à 69,0 Md€. Elle équivaut désormais à 1,8 % du produit intérieur brut, contre 2,6 % en 2014 et plus de 3 % entre 2011 et 2013, et représente un peu plus d'un mois de recettes tirées des exportations totales de la France. Si cela représente environ quatorze jours de moins qu'en

(1) Les pays européens peuvent avoir des prix différents en raison des capacités d'interconnexion, qui constituent une limite physique aux flux d'électricité, le renforcement des interconnexions permettant une meilleure convergence des prix.

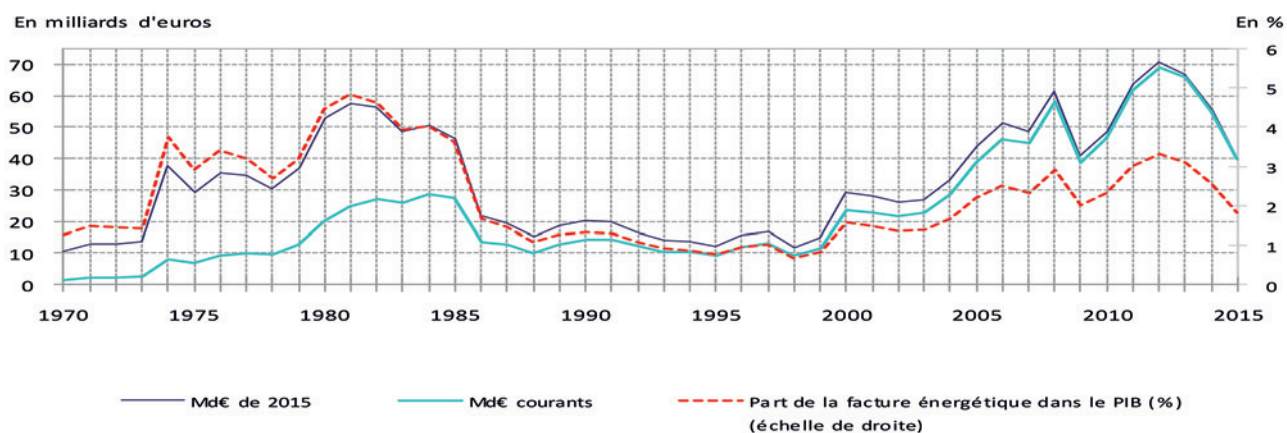
Figure 14 : Prix Baseload moyen mensuel sur le marché European power échange (Epex) Spot France.

En €/MWh



Source : Epex Spot.

Figure 15 : Facture énergétique de la France.



Champ : France entière.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

2014 et vingt-quatre de moins qu'en 2013, ce niveau reste toutefois élevé, l'approvisionnement énergétique de la France pesant encore pour plus de 10 % dans l'ensemble de ses importations (voir les Figures 15 et 18).

Le solde en valeur du commerce extérieur de produits pétroliers constitue près de 80 % de la facture énergétique de la France. Il s'est réduit de 30 % en 2015, à 31,6 Md€, soit une économie de 13,3 Md€ en un an. Ce recul affecte dans les mêmes proportions les dépenses en pétrole brut, qui représentent deux tiers de la facture pétrolière, le commerce extérieur de produits pétroliers raffinés en constituant le tiers restant. Si, pour ces derniers, la baisse est imputable conjointement à la chute des prix (- 25,7 %, à 465 €/t, prix moyens coût, assurance et fret - CAF - à l'importation) et à la réduction des volumes importés nets (- 11,3 %), la forte contraction de la facture de pétrole brut est exclusivement portée par l'effondrement du prix à l'importation (- 46,3 %, à 367€/t), dans le sillage du cours du baril de Brent. La France a en effet augmenté de plus de

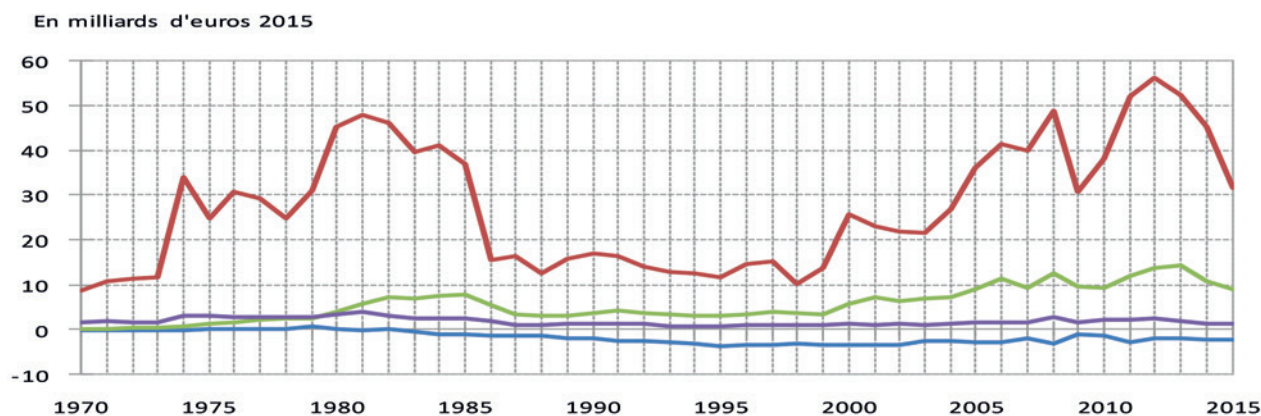
9 % ses volumes importés de pétrole brut par rapport à l'année précédente.

La facture gazière se replie de 15 % en 2015 sous l'effet direct de la baisse du prix moyen à l'importation de gaz naturel, qui recule de 13,7 % en un an pour repasser pour la première fois depuis 2010 sous le seuil de 2 c€/kWh. Le prix spot et ceux des contrats de long terme (plus de dix ans) diminuent. Ainsi, la facture gazière s'établit à 9,0 Md€, alors qu'elle s'élevait encore à 10,6 Md€ en 2014 et à 14,2 M€ en 2013.

La facture charbonnière diminue pour la troisième année consécutive, de 9 % par rapport à 2014, sous l'effet combiné des prix et des volumes. À 1,3 Md€, elle retrouve ainsi un niveau comparable à celui observé durant la première moitié des années 2000, après avoir atteint un record, à 2,7 Md€ en 2008.

Les exportations d'électricité permettent par ailleurs à la France d'alléger sa facture énergétique globale, avec un

Figure 16 : Facture énergétique de la France déclinée par type d'énergie.



Note : la facture de l'électricité, exportatrice, est comptée en négatif.

Champ : France entière.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

Figure 17 : Commerce extérieur de l'énergie en 2015.

	Importations CAF *			Exportations FAB *			Facture			
	2014	2015	2014-2015 (%)	2014	2015	2014-2015 (%)	2014	2015	2014-2015 (%)	2014-2015 (M€)
Combustibles minéraux solides	1 454	1 313	- 9,7	34	18	- 46,4	1 420	1 295	- 8,8	- 125
Pétrole brut	29 225	20 591	- 29,5	3	17	+ 478,1	29 222	20 575	- 29,6	- 8 647
Produits pétroliers raffinés	26 900	19 708	- 26,7	11 191	8 648	- 22,7	15 710	11 060	- 29,6	- 4 649
Total pétrole	56 125	40 299	- 28,2	11 194	8 664	- 22,6	44 932	31 635	- 29,6	- 13 297
Gaz	11 736	9 957	- 15,2	1 086	917	- 15,6	10 649	9 040	- 15,1	- 1 609
Pétrole et gaz	67 861	50 256	- 25,9	12 280	9 581	- 22,0	55 581	40 675	- 26,8	- 14 906
Electricité	987	1 157	+ 17,2	3 129	3 452	+ 10,3	- 2 142	- 2 296	+ 7,2	- 154
Total	70 302	52 726	- 25,0	15 443	13 052	- 15,5	54 859	39 675	- 27,7	- 15 185

* CAF : coût, assurance et fret ; FAB : franco à bord.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

Figure 18 : Comparaison de la facture énergétique avec quelques agrégats économiques.

	1973	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	2015
Facture énergétique en milliards d'euros courants (CAF/FAB*)	2,6	20,3	27,5	14,2	9,3	23,5	38,7	46,5	65,8	54,9	39,7
Facture énergétique en milliards d'euros 2015	13,8	52,7	46,2	20,2	12,2	29,4	44,0	48,7	67,0	55,5	39,7
Part des importations d'énergie dans les importations totales (en %)	12,4	26,4	22,1	9,4	6,7	9,6	13,1	13,2	16,1	14,0	10,4
Nombre de jours d'exportations totales pour couvrir la facture énergétique	n.d.**	99,2	72,8	28,8	15,8	26,5	39,7	43,0	56,1	46,8	32,5
Équivalence entre la facture énergétique et la richesse produite en France - indicateur facture / PIB - en %	1,4	4,5	3,6	1,3	0,8	1,6	2,2	2,3	3,1	2,6	1,8
Cours moyen du dollar en euros	0,68	0,64	1,37	0,83	0,76	1,09	0,80	0,76	0,75	0,75	0,90

* CAF : coût, assurance et fret ; FAB : franco à bord. ** n.d. : non disponible.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

Figure 19 : Prix moyens CAF* des énergies importées.

En euros constants 2015	1973	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	2015
Combustibles minéraux solides (€/t)	119	110	134	78	63	61	88	117	102	97	92
Pétrole brut (€/t)	94	404	472	194	127	284	359	467	629	576	367
Produits pétroliers raffinés (€/t)	164	416	495	245	173	347	426	517	696	633	465
Gaz naturel (c€/kWh)	0,47	1,90	2,98	1,13	0,89	1,27	1,70	1,80	2,74	2,29	1,95

* CAF : coût, assurance et fret.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

Figure 20 : Prix moyens CAF* des énergies importées.

En euros ou dollars courants	1973	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	2015
Combustibles minéraux solides (€/t)	22	42	80	55	48	49	78	112	101	96	92
Pétrole brut :											
- en euro/tonne	18	155	281	136	97	228	316	446	618	570	367
- en dollar/baril	4	33	28	23	17	28	53	80	112	103	55
Produits pétroliers raffinés (en €/t)	31	160	295	172	132	278	375	494	685	626	465
Gaz naturel (c€/kWh)	0,09	0,73	1,77	0,79	0,68	1,02	1,49	1,72	2,69	2,26	1,95

* CAF : coût, assurance et fret.

Sources : données des Douanes, calculs SOeS.

excédent commercial dû aux échanges d'électricité de 2,3 Md€ en 2015. Malgré une légère baisse des volumes échangés, celui-ci progresse ainsi de 7 % en un an en raison de la hausse du prix spot de l'électricité (voir les Figures 16, 17, 19 et 20).

Périmètre de la facture énergétique

La facture énergétique correspond au solde du commerce extérieur en valeur des produits énergétiques (chapitre 27 du système harmonisé de l'Organisation mondiale des Douanes) : combustibles minéraux solides (charbon et produits solides issus de sa transformation), produits pétroliers (pétrole brut et produits raffinés), gaz naturel et électricité. Elle ne prend donc pas en compte l'uranium, qui est considéré dans les nomenclatures internationales comme un minerai et non comme un combustible (il doit en effet être enrichi avant d'être utilisé dans les centrales nucléaires). La facture de l'uranium s'élevait à moins d'un milliard d'euros en 2015.

Prix à la consommation : accélération de la baisse des prix des produits pétroliers

Dans un contexte de stabilité des prix de l'ensemble des biens et services, les prix à la consommation de l'énergie reculent de 4,7 % en 2015, après avoir entamé une baisse en 2014 (- 0,9 %). Pour autant, sur dix ans, les prix à la consommation de l'énergie augmentent en moyenne de 2,7 % par an, soit 1,4 point de plus que l'inflation (+ 1,3 %) (voir la Figure 21).

La baisse enregistrée en 2015 s'explique avant tout par celle des prix des produits pétroliers. Ceux-ci diminuent de 10,8 % en moyenne sur l'année, en raison de la baisse du cours du baril et malgré la hausse de la fiscalité énergétique.

Le prix des carburants est en recul : la baisse du prix du gazole atteint 10,6 %, celle de l'essence étant un peu plus modérée (- 8,9 % pour le sans plomb 95 et - 8,4 % pour le sans plomb 98).

Figure 21 : Évolution des prix moyens annuels à la consommation par rapport à l'année précédente.

En %	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TCAM*
Carburants	13,0	5,8	1,9	12,3	-17,1	13,5	14,2	4,9	-2,6	-4,1	-9,8	1,4
- dont gazole	16,1	4,9	1,6	15,7	-20,9	14,4	16,5	4,5	-3,3	-4,8	-10,6	1,1
- dont SP95	10,0	6,1	3,2	6,1	-10,7	11,3	11,4	4,4	-1,9	-3,4	-8,9	1,5
- dont SP98	11,3	5,7	2,7	6,4	-10,8	11,2	11,2	5,3	-1,5	-3,1	-8,4	1,6
Électricité	0,0	0,6	1,4	1,4	1,8	2,4	6,5	3,1	6,5	5,7	4,8	3,4
Gaz naturel	6,7	17,2	3,3	10,9	-2,8	6,9	8,5	7,1	3,9	-0,6	-2,2	5,1
Gaz liquéfiés	9,4	9,5	0,9	11,6	-7,3	1,0	14,1	7,2	4,7	2,6	-1,8	4,0
Combustibles liquides	29,8	10,6	0,3	29,2	-30,9	23,2	23,1	9,6	-3,1	-6,7	-17,4	2,1
Eau chaude, vapeur et glace	0,0	6,2	7,7	11,1	23,8	0,0	3,9	6,6	6,5	3,1	3,3	7,1
Ensemble des énergies	10,1	6,4	1,7	10,9	-12,0	10,0	12,2	5,2	0,8	-0,9	-4,7	2,7
- dont produits pétroliers	15,4	6,7	1,6	15,0	-19,1	14,5	15,7	5,8	-2,4	-4,3	-10,8	1,7
Ensemble des biens et services	1,8	1,6	1,5	2,8	0,1	1,5	2,1	2,0	0,9	0,5	0,0	1,3

* TCAM : taux de croissance annuel moyen, calculé sur la période 2005-2015.

Sources : Insee, indice des prix à la consommation en France métropolitaine ;

DGEC, base de prix couvrant la France métropolitaine hors Corse, pour les prix du gazole, du SP95 et du SP98.

Le prix des combustibles liquides, essentiellement du fioul domestique, poursuit son repli pour la troisième année consécutive, avec - 17,4 % sur l'année 2015, après - 6,7 % en 2014 et - 3,1 % en 2013.

Le prix du gaz de pétrole liquéfié (GPL) diminue pour la première fois depuis 2009 (- 1,8 %), après une période de hausse ralentie de 2011 à 2014.

Le prix du gaz naturel suit la même tendance que celui de l'ensemble des énergies. Après un léger recul en 2014, il affiche une baisse plus soutenue de 2,3 % en 2015, en raison du repli du prix de gros du gaz et du prix des produits pétroliers (sur lesquels sont indexés en partie les contrats de long terme d'approvisionnement en gaz).

Le prix de l'électricité augmente, mais moins qu'en 2014 (respectivement + 4,8 % et + 5,7 %). La hausse des tarifs réglementés en août et le relèvement de la contribution au service public de l'électricité (CSPE) expliquent cette évolution.

Enfin, le prix de la chaleur vendue par les réseaux de chauffage urbain augmente de 3,3 % en 2015, soit à un rythme légèrement plus élevé qu'en 2014.

Poids de l'énergie dans le budget des ménages français en 2015 : léger rebond des dépenses d'énergie dans le logement et forte baisse des dépenses en carburant

La dépense courante d'énergie d'un ménage moyen représente 2 861 € en 2015, dont 1 681 € liés à l'énergie dans le logement et 1 180 € imputables aux achats de carburants et de lubrifiants. Cette facture totale diminue en 2015 pour la deuxième année consécutive (- 8,2 % en 2014 et -2,9 % en 2015) après quatre années de hausse (voir la Figure 22).

Le recul en 2015 est imputable uniquement à la baisse des dépenses en carburant (- 9,3 %), les dépenses en énergie domestique augmentant (+ 2,1 %). À l'inverse, le recul en 2014 résultait d'un double mouvement de baisse,

Figure 22 : Dépense en énergie par ménage, entre 2013 et 2015.



Champ : ménages français (DOM compris, TOM exclus).

Sources : calculs SOeS d'après Insee, Comptes nationaux base 2010 et SOeS, Comptes du logement 2015.

Figure 23 : Dépense en énergie par ménage, déflatée par le prix de l'énergie, depuis 1973.

En euros 2010		1973	1990	2002	2010	2013	2014	2015
Electricité, gaz et autres combustibles		1 301	1 445	1 519	1 605	1 531	1 331	1 363
Carburant		1 726	1 813	1 548	1 246	1 163	1 159	1 162
Total énergie		3 027	3 257	3 067	2 851	2 694	2 491	2 525

Note : en 2010, un ménage français a dépensé en moyenne 2 851 euros pour son énergie. Si les prix de l'énergie n'avaient pas augmenté entre 2010 et 2014, il aurait dépensé 2 525 euros en 2015, soit une diminution en volume.

Champ : ménages français (DOM compris, TOM exclus).

Source : calculs SOeS d'après Insee, Comptes nationaux base 2010 et SOeS, Comptes du logement 2015.

celui des dépenses d'énergie dans le logement (- 11,1 %) et celui des dépenses en carburant (- 4,1 %).

Le rebond des dépenses en énergie domestique par rapport à 2014 s'explique par la hausse de la consommation en volume (+ 2,4 %), elle-même liée à la légère baisse des températures en 2015. L'année 2014 avait en effet été exceptionnellement douce, ce qui avait conduit à une baisse de la consommation en volume de 12,5 % par rapport à 2013. Le prix moyen de l'énergie domestique est resté relativement stable (- 0,3 %) en 2015 après une hausse de 2,2 % en 2014.

Le prix des carburants baisse, quant à lui, pour la troisième année consécutive (- 9,5 %, après - 2,4 % en 2013

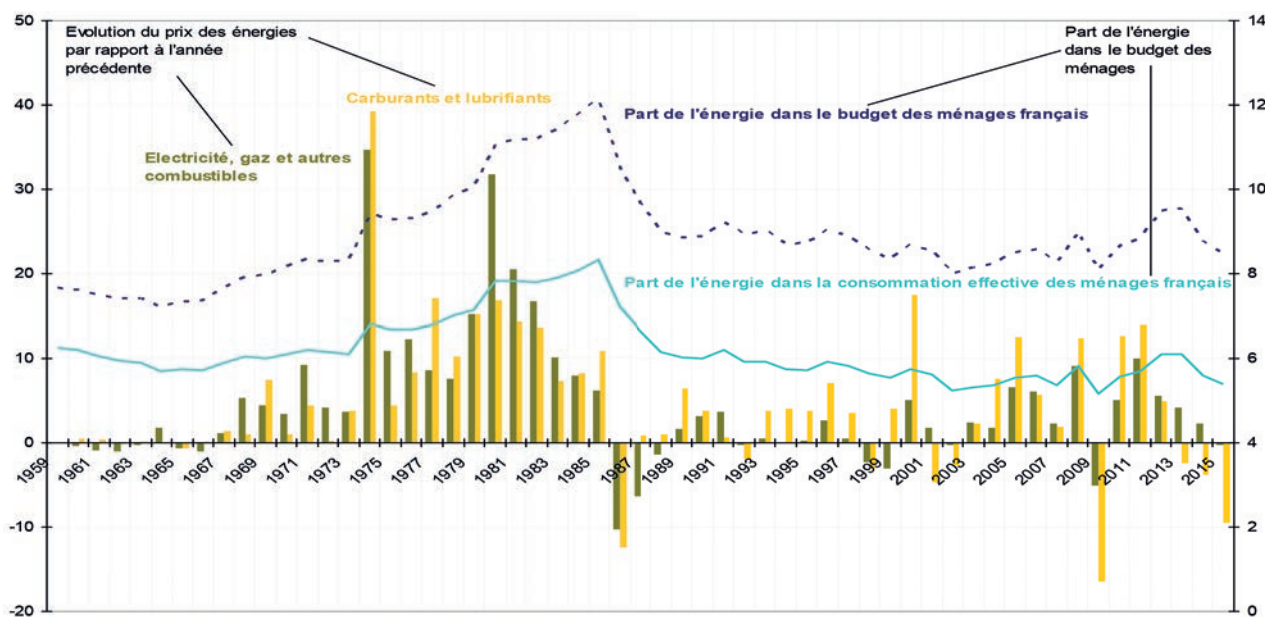
et - 3,8 % en 2014). La consommation de carburants en volume restant par ailleurs quasiment stable depuis 2013, les dépenses correspondantes ont baissé de 4,1 % en 2014, puis de 9,3 % en 2015.

En 2015, les ménages français consacrent ainsi 83 milliards d'euros courants à leurs achats d'énergie, soit 8,5 % de leurs dépenses réelles (hors loyers imputés et services d'intermédiation financière indirectement mesurés – Sifim – voir la Figure 24).

Cela représente aussi 5,4 % de la consommation effective des ménages français, un niveau en diminution pour la deuxième année consécutive, alors qu'il avait progressé entre 2009 et 2013.

Figure 24 : Part de l'énergie dans le budget des ménages.

En %



Note : la ligne pleine et le pointillé représentent respectivement la part des dépenses énergétiques dans la consommation effective des ménages et dans le budget des ménages. Celui-ci est ici calculé comme les dépenses des ménages au sens de la Comptabilité nationale, hors loyers imputés et Sifim.

La consommation effective intègre non seulement ces deux éléments, mais aussi les consommations correspondant à des dépenses individualisables faites par les institutions sans but lucratif au service des ménages (ISBLSM) et par les administrations publiques (APU) en matière, par exemple, de santé, d'enseignement, d'action sociale.

Le « budget » est proche de ce que déboursent directement les ménages pour leur consommation courante, tandis que la « consommation effective » approche ce dont ils bénéficient, y compris ce qui est payé par l'ensemble de la collectivité.

Les bâtons verts représentent l'évolution du prix de l'électricité, gaz et autres combustibles, par rapport à l'année précédente ; les bâtons jaunes représentent eux l'indice pour les carburants et lubrifiants. En 2015, les prix de l'ensemble électricité, gaz et autres combustibles diminuent ainsi de 0,3 % par rapport à 2014, tandis que ceux des carburants et lubrifiants diminuent de - 9,5 %.

Champ : ménages français (DOM compris, TOM exclus).

Source : calculs SOeS d'après Insee, Comptes nationaux base 2010 et SOeS, Comptes du logement 2015.

Bilans de l'énergie – Années 2015, 2014 et 2013

BILAN DE L'ÉNERGIE 2015 (Données corrigées des variations climatiques)

Unité : Mtep

CHARBON			PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENRt et déchets	TOTAL
Houille PR	Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	-		0,84	0,35	0,03		N : 114,00 H : 7,69		16,97	139,87
Importations	7,72	0,66	57,44	41,19	39,25	-	0,86		0,61	147,73
Exportations	-0,09	-0,02	-0,04	-21,58	-4,84	-	-6,37		-0,18	-33,11
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,23	-0,13	-0,11	+0,13	+0,43	-			-	+0,55
Soutes maritimes internationales				-1,61						-1,61
TOTAL disponibilités (D)	8,38		58,12	18,47	34,87	-	116,18		17,40	253,43

Indépendance énergétique (P/D)	0,0%		1,5%		0,1%		104,7%		97,5%	55,2%
---------------------------------------	-------------	--	-------------	--	-------------	--	---------------	--	--------------	--------------

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			57,67	-55,78	0,57		-0,07	0,24		2,63
Production d'électricité thermique	2,18	-		0,55	3,07	0,65	-3,48		2,29	5,26
Usages internes de la branche (1)	3,17	-2,28	-	-	0,46	-0,23	0,48	2,63	0,27	4,51
Pertes et ajustement	-0,06	0,05	0,45	1,17	0,94	0,01		79,54	0,00	82,09
TOTAL (A)	5,29	-2,23	58,12	-54,07	5,04	0,43	-3,55	82,89	2,57	94,49

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,50	2,31		0,03	0,54	0,69	-1,12		0,89	-	4,84
Industrie	0,80	0,28		2,09	9,61		-		9,09	1,70	23,56
Résidentiel	0,18	0,03		6,70	15,06		-		13,30	9,73	45,00
Tertiaire	0,12	-		3,22	5,32		-		12,38	0,93	21,97
Agriculture	-	-		3,32	0,29		-		0,70	0,15	4,45
Transports (3)	-	-		45,42	0,10		-		0,88	3,00	49,39
TOTAL (B)	2,60	2,61		60,76	30,91	-0,43			37,23	15,51	149,22

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,13		12,35	0,55	-					13,02
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	8,41		77,18		36,49		116,58		18,08	256,73
<i>Dont corrections climatiques</i>	<i>0,03</i>		<i>0,59</i>		<i>1,62</i>		<i>0,39</i>		<i>0,68</i>	<i>3,30</i>

Indice de rigueur climatique = 0,898

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt : énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

BILAN DE L'ÉNERGIE 2014

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : Mtep

CHARBON		PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENRt et déchets	TOTAL
Houille Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	0,12		0,77	0,40	0,01		N : 113,75 H : 8,01		16,25	139,31
Importations	8,10	0,60	54,18	41,27	39,94	-	0,68		0,56	145,34
Exportations	-0,15	-0,04	-0,02	-18,95	-6,32	-	-6,46		-0,19	-32,12
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,09	-0,09	+0,33	-0,32	-1,20	-			-	-1,19
Soutes maritimes internationales				-1,80						-1,80
TOTAL disponibilités (D)	8,64		55,26	20,61	32,44	-	115,98		16,62	249,54
Indépendance énergétique (P/D)	1,4%		1,5%		0,0%		105,0%		97,7%	55,8%

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			54,77	-52,83	0,54		-0,06	0,25		2,67
Production d'électricité thermique	2,14	-		0,49	1,71	0,63	-2,82		2,20	4,35
Usages internes de la branche (1)	2,79	-2,29	-	-	0,44	-0,22	0,48 2,69		0,23	4,12
Pertes et ajustement	0,36	0,01	0,49	0,32	1,06	0,01		79,25	0,00	81,51
TOTAL (A)	5,29	-2,29	55,26	-52,03	3,75	0,42	-2,88	82,68	2,44	92,65

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,77	2,32		0,04	0,56	0,76 -1,18		0,91	-	5,19
Industrie	0,84	0,28		2,24	9,72	-		9,12	1,70	23,89
Résidentiel	0,18	0,03		6,87	14,82	-		13,03	9,65	44,59
Tertiaire	0,12	-		3,34	5,56	-		12,25	0,93	22,19
Agriculture	-	-		3,35	0,30	-		0,71	0,15	4,50
Transports (3)	-	-		44,98	0,10	-		0,86	2,96	48,89
TOTAL (B)	2,91	2,64		60,82	31,05	-0,42		36,87	15,39	149,26

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,13		12,90	0,56	-				13,60
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	8,68		76,95		35,36		116,68		17,83	255,50
Dont corrections climatiques	0,05		1,09		2,92		0,70		1,20	5,96

Indice de rigueur climatique = 0,816

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt: énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

BILAN DE L'ÉNERGIE 2013

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : Mtep

CHARBON		PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENRt et déchets	TOTAL
Houille Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	0,13		0,79	0,39	0,29		N : 110,41 H : 8,35		17,63	138,00
Importations	10,28	0,63	56,17	41,17	42,31	-	1,01		0,46	152,03
Exportations	-0,11	-0,01	-0,07	-19,00	-4,49	-	-5,17		-0,21	-29,06
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,80	-0,15	-0,60	+0,02	+0,52	-			-	+0,58
Soutes maritimes internationales				-2,11						-2,11
TOTAL disponibilités (D)	11,56		56,30	20,47	38,62	-	114,59		17,88	259,43
Indépendance énergétique (P/D)	1,1%		1,5%		0,7%		103,6%		98,6%	53,2%

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			55,89	-53,88	0,55		-0,09	0,24		2,71
Production d'électricité thermique	4,92	-		0,64	2,48	0,64	-4,29		2,15	6,54
Usages internes de la branche (1)	2,86	-2,32	-	-	0,50	-0,22	0,47 2,66		0,23	4,19
Pertes et ajustement	0,66	0,13	0,41	-0,03	0,91	-0,01		77,21	0,00	79,26
TOTAL (A)	8,44	-2,19	56,30	-53,27	4,43	0,41	-4,38	80,57	2,38	92,70

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,61	2,30		0,02	0,49	0,76 -1,18		0,90	-	4,90
Industrie	0,78	0,24		2,51	10,14	-		9,19	1,86	24,72
Résidentiel	0,15	0,03		6,82	15,46	-		13,75	9,38	45,57
Tertiaire	0,10	-		3,23	5,50	-		12,54	0,83	22,20
Agriculture	-	-		3,38	0,36	-		0,75	0,14	4,64
Transports (3)	-	-		44,88	0,09	-		0,88	2,69	48,54
TOTAL (B)	2,63	2,57		60,83	32,04	-0,41		38,01	14,91	150,57

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,10		12,35	0,58	-				13,02
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	11,55		76,20		37,05		114,21		17,28	256,29
Dont corrections climatiques	-0,02		-0,56		-1,57		-0,38		-0,60	-3,13

Indice de rigueur climatique = 1,096

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt: énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

BILAN DE L'ÉNERGIE 2015

(Données brutes)

Unité : Mtep

CHARBON		PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENR	TOTAL
Houille Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	-		0,84	0,35	0,03		N : 114,00 H : 7,69		16,97	139,87
Importations	7,72	0,66	57,44	41,19	39,25	-	0,86		0,61	147,73
Exportations	-0,09	-0,02	-0,04	-21,58	-4,84	-	-6,37		-0,18	-33,11
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,23	-0,13	-0,11	+0,13	+0,43	-			-	+0,55
Soutes maritimes internationales				-1,61						-1,61
TOTAL disponibilités (D)	8,38		58,12	18,47	34,87	-	116,18		17,40	253,43

<i>Indépendance énergétique (P/D)</i>	<i>0,0%</i>		<i>1,5%</i>		<i>0,1%</i>		<i>104,7%</i>		<i>97,5%</i>	<i>55,2%</i>
---------------------------------------	-------------	--	-------------	--	-------------	--	---------------	--	--------------	--------------

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			57,67	-55,78	0,57		-0,07	0,24		2,63
Production d'électricité thermique	2,18	-		0,55	3,07	0,65	-3,48		2,29	5,26
Usages internes de la branche (1)	3,17	-2,28	-	0,00 0,00	0,46	-0,23		0,48 2,63	0,27	4,51
Pertes et ajustement	-0,06	0,05	0,45	1,17	0,94	0,01		79,54	0,00	82,09
TOTAL (A)	5,29	-2,23	58,12	-54,07	5,04	0,43	-3,55	82,89	2,57	94,49

Consommation finale énergétique (non corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,50	2,31		0,03	0,54	0,69 -1,12		0,89	-	4,84
Industrie	0,80	0,28		2,07	9,44	-		9,09	1,70	23,38
Résidentiel Tertiaire	0,28	0,03		9,35	18,93	-		25,29	9,98	63,85
Agriculture	-	-		3,32	0,29	-		0,70	0,15	4,45
Transports (3)	-	-		45,42	0,10	-		0,88	3,00	49,39
TOTAL (B)	2,58	2,61	-	60,19	29,29	-0,43		36,84	14,83	145,92

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,13		12,35	0,55	-				13,02
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (non corrigée du climat)

TOTAL non corrigé (A+B+C)	8,38		76,59		34,87		116,18		17,40	253,43
Corrections climatiques	0,03		0,59		1,62		0,39		0,68	3,30

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt : énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

BILAN DE L'ÉNERGIE 2014

(Données brutes)

Unité : Mtep

CHARBON		PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENR	TOTAL
Houille Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	0,12		0,77	0,40	0,01		N : 113,75 H : 8,01		16,25	139,31
Importations	8,10	0,60	54,18	41,27	39,94	-	0,68		0,56	145,34
Exportations	-0,15	-0,04	-0,02	-18,95	-6,32	-	-6,46		-0,19	-32,12
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,09	-0,09	+0,33	-0,32	-1,20	-			-	-1,19
Soutes maritimes internationales				-1,80						-1,80
TOTAL disponibilités (D)	8,64		55,26	20,61	32,44	-	115,98		16,62	249,54

Indépendance énergétique (P/D)	1,4%		1,5%		0,0%		105,0%		97,7%	55,8%
---------------------------------------	-------------	--	-------------	--	-------------	--	---------------	--	--------------	--------------

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			54,77	-52,83	0,54		-0,06	0,25		2,67
Production d'électricité thermique	2,14	-		0,49	1,71	0,63	-2,82		2,20	4,35
Usages internes de la branche (1)	2,79	-2,29	-	0,00	0,44	-0,22		0,48 2,69	0,23	4,12
Pertes et ajustement	0,36	0,01	0,49	0,32	1,06	0,01		79,25	0,00	81,51
TOTAL (A)	5,29	-2,29	55,26	-52,03	3,75	0,42	-2,88	82,68	2,44	92,65

Consommation finale énergétique (non corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,77	2,32		0,04	0,56	0,76 -1,18		0,91	-	5,19
Industrie	0,84	0,28		2,20	9,41	-		9,12	1,70	23,55
Résidentiel Tertiaire	0,26	0,03		9,16	17,75	-		24,58	9,38	61,16
Agriculture	-	-		3,35	0,30	-		0,71	0,15	4,50
Transports (3)	-	-		44,98	0,10	-		0,86	2,96	48,89
TOTAL (B)	2,87	2,63	-	59,73	28,12	-0,42		36,17	14,19	143,29

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,13		12,90	0,56	-				13,60
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (non corrigée du climat)

TOTAL non corrigé (A+B+C)	8,64		75,86		32,44		115,98		16,62	249,54
Corrections climatiques	0,05		1,09		2,92		0,70		1,20	5,96

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt : énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

BILAN DE L'ÉNERGIE 2013

(Données brutes)

Unité : Mtep

CHARBON		PÉTROLE		GAZ		ÉLECTRICITÉ		ENR	TOTAL
Houille Lignite-PR	Coke Agglomérés	Brut	Raffiné	Naturel	Industriels	Production brute	Consommation		

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	0,13		0,79	0,39	0,29		N : 110,41 H : 8,35		17,63	138,00
Importations	10,28	0,63	56,17	41,17	42,31	-	1,01		0,46	152,03
Exportations	-0,11	-0,01	-0,07	-19,00	-4,49	-	-5,17		-0,21	-29,06
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+0,80	-0,15	-0,60	+0,02	+0,52	-			-	+0,58
Soutes maritimes internationales				-2,11						-2,11
TOTAL disponibilités (D)	11,56		56,30	20,47	38,62	-	114,59		17,88	259,43

<i>Indépendance énergétique (P/D)</i>	1,1%		1,5%		0,7%		103,6%		98,6%	53,2%
---------------------------------------	-------------	--	-------------	--	-------------	--	---------------	--	--------------	--------------

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage			55,89	-53,88	0,55		-0,09	0,24		2,71
Production d'électricité thermique	4,92	-		0,64	2,48	0,64	-4,29		2,15	6,54
Usages internes de la branche (1)	2,86	-2,32	-	0,00 0,00	0,50	-0,22		0,47 2,66	0,23	4,19
Pertes et ajustement	0,66	0,13	0,41	-0,03	0,91	-0,01		77,21	0,00	79,26
TOTAL (A)	8,44	-2,19	56,30	-53,27	4,43	0,41	-4,38	80,57	2,38	92,70

Consommation finale énergétique (non corrigée du climat)

Sidérurgie (2)	1,61	2,30		0,02	0,49	0,76 -1,18		0,90	-	4,90
Industrie	0,78	0,24		2,53	10,30	-		9,19	1,86	24,91
Résidentiel Tertiaire	0,26	0,03		10,58	22,37	-		26,67	10,81	70,72
Agriculture	-	-		3,38	0,36	-		0,75	0,14	4,64
Transports (3)	-	-		44,88	0,09	-		0,88	2,69	48,54
TOTAL (B)	2,65	2,57	-	61,39	33,61	-0,41		38,39	15,51	153,71

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	0,10		12,35	0,58	-				13,02
------------------	----------	-------------	--	--------------	-------------	----------	--	--	--	--------------

Consommation totale d'énergie primaire (non corrigée du climat)

TOTAL non corrigé (A+B+C)	11,56		76,76		38,62		114,59		17,88	259,43
Corrections climatiques	-0,02		-0,56		-1,57		-0,38		-0,60	-3,13

H : hydraulique, énergie marémotrice, éolien, photovoltaïque. N : nucléaire

PR : produits de récupération

ENRt : énergies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique,...) et pompes à chaleur.

(1) : Pour l'électricité, on distingue à gauche la consommation des producteurs d'énergie (cokeries, usines à gaz) et de l'enrichissement d'uranium, et à droite la consommation interne des centrales électriques (auxiliaires, transformateurs primaires) et la consommation de pompage

(2) On distingue la consommation de gaz sidérurgiques, comptée en positif, de leur production brute, comptée en négatif

(3) Hors soutes maritimes internationales.

Source : SOeS

Charbon

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : kt

2013		2014		2015 p	
Houille Lignite-PR (1)	Coke Agglomérés	Houille Lignite-PR (1)	Coke Agglomérés	Houille Lignite-PR (1)	Coke Agglomérés

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	313		300		-	
Importations	16 658	930	13 148	892	12 517	973
Exportations	-182	-12	-246	-54	-140	-24
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+1 246	-222	+58	-132	+413	-190
Soutes maritimes internationales						
TOTAL disponibilités (D)	18 732		13 966		13 549	

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage						
Production d'électricité thermique	8 023	-	3 473	-	3 548	-
Usages internes de la branche	4 627	-3 438	4 500	-3 385	5 127	-3 361
Pertes et ajustement	1 055	183	591	2	-94	62
TOTAL (A)	13 705	-3 255	8 564	-3 383	8 581	-3 299

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie	2 598	3 446	2 864	3 484	2 424	3 460
Industrie	1 311	364	1 412	420	1 329	415
Résidentiel	237	34	292	43	297	39
Tertiaire	157	-	195	-	197	-
Agriculture	-	-	-	-	-	-
Transports (2)	-	-	-	-	-	-
TOTAL (B)	4 303	3 844	4 763	3 947	4 247	3 914

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	106	-	148	-	147
------------------	---	-----	---	-----	---	-----

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	18 703		14 039		13 590	
Dont corrections climatiques	-29		73		41	
Indice de rigueur climatique	1,10		0,82		0,90	

(1) PR : produits de récupération

(2) Hors soutes maritimes internationales

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2015

Pétrole

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : kt

2013		2014		2015 p	
Brut	Raffiné	Brut	Raffiné	Brut	Raffiné

APPROVISIONNEMENT

Production énergie primaire (P)	793	377	766	384	835	335
Importations	56 173	41 125	54 184	41 182	57 439	40 949
Exportations	-68	-18 924	-20	-18 894	-40	-21 538
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	-603	+22	+327	-352	-114	+119
Soutes maritimes internationales		-2 214		-1 886		-1 685
TOTAL disponibilités (D)	56 295	20 386	55 257	20 434	58 120	18 180

EMPLOIS**Consommation de la branche énergie**

Raffinage	55 889	-53 862	54 767	-52 809	57 668	-55 764
Production d'électricité thermique		653		488		549
Usages internes de la branche	1	-1	-	-	-1	1
Pertes et ajustement	405	887	490	1 229	453	1 997
TOTAL (A)	56 295	-52 323	55 257	-51 092	58 120	-53 217

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie		25		45		34
Industrie		2 675		2 401		2 229
Résidentiel	-	6 733	-	6 786	-	6 614
Tertiaire	-	3 144	-	3 371	-	3 214
Agriculture		3 351		3 318		3 291
Transports (1)		43 963		44 058		44 479
TOTAL (B)		59 929		59 896		59 818

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)		12 218		12 715		12 164
------------------	--	---------------	--	---------------	--	---------------

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	76 119		76 776		76 885	
Dont corrections climatiques	-562		1 085		585	
Indice de rigueur climatique	1,10		0,82		0,90	

(1) Hors soutes maritimes internationales

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2015

GAZ

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : GWh PCS

2013		2014		2015 p	
Naturel	Industriels	Naturel	Industriels	Naturel	Industriels

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	3 753		193		330	
Importations	549 456	-	518 676	-	509 783	-
Exportations	-58 305	-	-82 088	-	-62 866	-
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	+6 699	-	-15 547	-	+5 633	-
Soutes maritimes internationales						
TOTAL disponibilités (D)	501 603	-	421 234	-	452 880	-

EMPLOIS**Consommation de la branche énergie**

Raffinage	7 140		6 977		7 344	
Production d'électricité thermique	32 181	8 272	22 237	8 195	39 893	8 474
Usages internes de la branche	6 441	-2 799	5 713	-2 838	5 960	-3 019
Pertes et ajustement	11 821	-108	13 809	134	12 199	74
TOTAL (A)	57 584	5 365	48 735	5 490	65 396	5 530

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie	6 332	9926 -15292	7 308	9862 -15353	6 980	8982 -14511
Industrie	131 638	-	126 187	-	124 782	-
Résidentiel Tertiaire	272 220	-	264 610	-	264 696	-
Résidentiel	200 744	-	192 429	-	195 571	-
Tertiaire	71 476	-	72 181	-	69 125	-
Agriculture	4 675	-	3 878	-	3 702	-
Transports (1)	1 215	-	1 252	-	1 290	-
TOTAL (B)	416 080	-5 365	403 235	-5 490	401 450	-5 530

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	7 501	-	7 242	-	7 096	-
------------------	--------------	----------	--------------	----------	--------------	----------

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	481 165		459 212		473 943	
Dont corrections climatiques	-20 438		37 978		21 063	
Indice de rigueur climatique	1,10		0,82		0,90	

(1) Hors soutes maritimes internationales

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2015

ÉLECTRICITÉ

(Données corrigées des variations climatiques)

Unité : GWh

2013		2014		2015 p	
Production brute	Consommation	Production brute	Consommation	Production brute	Consommation

APPROVISIONNEMENT

	N : 423 665 H : 97 050		N : 436 474 H : 93 125		N : 437 428 H : 89 451	
PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)						
Importations	11 637		7 872		9 976	
Exportations	-60 148		-75 063		-74 024	
Stocks (+=déstockage, -=stockage)						
Soutes maritimes internationales						
TOTAL disponibilités (D)	472 274		462 408		462 832	

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage	-1 012	2 743	-666	2 918	-821	2 824
Production d'électricité thermique	-49 865		-32 818		-40 438	
Usages internes de la branche ¹		5502 30897		5618 31326		5593 30606
Pertes et ajustement		37 556		35 391		36 725
TOTAL (A)	-50 877	76 698	-33 484	75 254	-41 259	75 754

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie		10 412		10 608		10 359
Industrie		106 888		105 998		105 695
Résidentiel Tertiaire		305 725		293 942		298 600
Résidentiel		159 895		151 548		154 639
Tertiaire		145 830		142 394		143 961
Agriculture		8 760		8 241		8 093
Transports (1)		10 246		9 964		10 178
TOTAL (B)		442 031		428 754		432 925

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)						
------------------	--	--	--	--	--	--

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques)

TOTAL corrigé (A+B+C)	467 852	470 523	467 420
Dont corrections climatiques	-4 422	8 115	4 588
Indice de rigueur climatique	1,10	0,82	0,90

(1) Hors soutes maritimes internationales

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2015

ÉNERGIES RENOUVELABLES THERMIQUES ET DÉCHETS

Unité : ktep

2013	2014	2015 p
------	------	--------

APPROVISIONNEMENT

PRODUCTION ÉNERGIE PRIMAIRE (P)	17 631	16 245	16 968
Importations	461	565	611
Exportations	-207	-185	-180
Stocks (+=déstockage, -=stockage)	-	-	-
Soutes maritimes internationales			
TOTAL disponibilités (D)	17 885	16 625	17 400

EMPLOIS

Consommation de la branche énergie

Raffinage	-	-	-
Production d'électricité thermique	2 146	2 204	2 293
Usages internes de la branche	229	230	272
Pertes et ajustement	2	2	2
TOTAL (A)	2 377	2 437	2 567

Consommation finale énergétique (corrigée du climat)

Sidérurgie	-	-	-
Industrie	1 863	1 704	1 702
Résidentiel Tertiaire	10 210	10 581	10 659
Résidentiel	9 377	9 654	9 733
Tertiaire	832	926	926
Agriculture	145	152	152
Transports (1)	2 687	2 955	2 996
TOTAL (B)	14 905	15 392	15 509

Consommation finale non énergétique

TOTAL (C)	-	-	-
------------------	---	---	---

Consommation totale d'énergie primaire (corrigée du climat)

TOTAL corrigé (A+B+C)	17 282	17 829	18 076
<i>Dont corrections climatiques</i>	-603	1 205	676
<i>Indice de rigueur climatique</i>	1,10	0,82	0,90

(1) Hors soutes maritimes internationales

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2015

Undersea minerals: Protecting the ecosystems, mining the resources

Foreword

François Jacq, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)

1 - Marine mineral resources and their economic context

Mining on the land, mineral resources on the seabed... and our hunger for raw materials

François Bersani, engineer from École des Mine

Unlike hydrocarbons, deep-sea mineral resources have not yet been worked much, apart from certain minerals near coastal areas. Nor have all these resources been identified, but there is now no doubt about their economic interest. As technological progress is being made, these resources could help supply the world with raw materials in a near future under condition that precautions be taken to protect the environment... and, too, depending on trends in market prices.

Hydrothermal mineralization: Scientific issues related to prospecting and exploration

Yves Fouquet, researcher at Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, head of a research program on oceanic mineralization deposits

The economic promises of oceanic sources of sulfides are attracting industrialists. Estimates of the size and potential of deposits are not very accurate however. Our knowledge about mineralization mainly comes from scientific explorations. Active sites have thus been localized, but the inactive ones are of interest to industry. Technologic progress has been the prerequisite for exploring the seabed and assessing resources. Issues arise involving basic research, industrial interests and the strategies to be worked out for conservation of the environment. Several scientific studies must be conducted to understand the processes involving these metals, their mineralization and dispersion, and to set the conditions for sustainably mining them.

Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources

Sven Petersen, Mark Hannington and Anne Krätschell, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (Germany)

Manganese nodules, Co-rich crusts, and Seafloor massive Sulfides (SMS) are commonly seen as possible future resources that could potentially add to the global raw materials supply. At present, a proper global assessment of these resources is not possible due to a severe lack of information regarding their size, global distribution, and composition. The sizes of the most prospective areas that

need to be explored for a global resource assessment are vast. Future deep-sea minerals exploration has to provide higher-resolution data and at the same time needs to cover large areas of the seafloor in a fast and cost-efficient manner. While nodules and crusts are 2-dimensional occurrences and an assessment of their distribution at the seafloor itself seems sufficient, seafloor massive sulfides are 3-dimensional sites and a proper resource assessment will always require drilling. Here the development of methods to image the subseafloor and to recognize economically interesting sites prior to drilling is of importance.

The economic stakes: What is the potential of marine mineral resources?

Christophe-Alexandre Paillard, head of the department on economic intelligence and the protection of information in the Service of Defense, Sécurité and Economic Intelligence, Ministry of the Environment, Energy and Sea

Given technological developments that consume ever more metals, the demand for mineral resources is growing. This forces us to raise questions about the potential of undersea mining, which is currently restricted to a few sites near the coasts and the emblematic Solwara 1 program conducted by Nautilus Minerals in Papua New Guinea. The general conditions for undersea mining are still fuzzy. Three questions have not yet been clearly answered. What sort of mining technology is called for? How to assess financial costs? And what impact will undersea mining have on the environment? Given these questions, it would be very hazardous to make any prediction about undersea mining, despite its considerable potential. Aware of its interests, the French Interministerial Committee on the Sea (CIMer) approved in October 2015 a national strategy for prospecting for undersea deposits and mining the ocean floor.

The challenges of deep-sea mining: Global and European regulatory frameworks

Gwenole Cozigou, Industrial Transformation and Advanced Value Chains, European Commission

Deep-sea mineral resources have been receiving attention as potential sources of copper, zinc, gold, lead, cobalt, rare earths and manganese. The attention now paid to the possibility of working undersea mineral resources has been aroused by the demand for these metals and the risk of shortages. Thanks to several decades of R&D on deep-sea mineral resources, we can now imagine mining deposits that used to be out of reach. Even though most of the requisite technology is now available, it is important, before moving on to the phase of commercially mining undersea fields, to acquire much more knowledge about this operation's environmental impact and to adopt measures for reducing risks. It is also important and necessary

to set up a suitable regulatory framework before starting to extract minerals. Despite many recent advances in knowledge and technology, the mining of deep-sea mineral deposits is still difficult from both technological and environmental viewpoints.

2 - A daunting task: Protecting ecosystems

The environmental impact of mining the seabed: State of knowledge

Pierre Marie Sarradin, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER); Jozée Sarrazin, IFREMER; and François H. Lallier, professor, CNRS

The potential mining of deep-sea mineral resources necessitates asking, before actual mining operations start, questions about the impact on ecosystems, the goal being to better prevent or limit this impact or even propose procedures for mitigating it and restoring an equilibrium. Assessing the potential impact is still hard to do given our lack of knowledge, on the one hand, about the mining techniques that industrialists will be using, and, on the other hand, about fundamental scientific aspects. Research is needed on the evaluation of biodiversity, the dynamics and functions of deep-sea ecosystems, and the coupling between waters in the deep sea and the rest of the ocean.

Mineral resources, environmental risks and strategies for managing biodiversity: Zones with nodules in the northeastern Pacific

Lénaïck Menot, researcher on underwater ecology in the Deep Environment Laboratory, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)

The discovery a half-century ago of polymetallic nodules set off the first rush toward deep-sea minerals. Over these past fifty years, advances have been made in exploration, international law and the environmental sciences but not all at the same pace. Exploration of the nodular zone in the northeastern Pacific – its total surface area being equal to Europe's, and the fields with workable sites covering an area as big as France – was soon farmed out under contracts. Exploiting these resources will undoubtedly have lasting consequences, not yet well known, on a diverse and vulnerable fauna. The international authority set up in 1994 to manage undersea resources and the environmental impact of deep-sea mining decided, in 2012, on a plan. The scientific recommendations underlying it were based on knowledge that was, at the time, fragmentary. Furthermore, this decision concerns an area where exclusive exploration rights had already been granted.

"Why not the abysses?" IFREMER's research program for improving knowledge on deep-sea biodiversity

Sophie Arnaud-Haond, environmental scientist at Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), and Florence Pradillon, researcher in the Deep Environment Laboratory, (IFREMER)

Launched in 2016, IFREMER's program "Why not the

abysses?" (ABYSS) has the objective of drawing up a new inventory of deep-sea biodiversity worldwide. New molecular techniques will be used for access to the so-called "environmental DNA". DNA strands isolated in water or sediment samples can now be used to detect the species that are living in an environment or used to live there. Based on a systematic description of these samples from all oceans on our planet, this program will help establish a molecular inventory of the diversity of life in the seas, in particular in the depths and abyssal zones – 95% of which have not yet been explored. This in-depth review of this biodiversity sheds light on the factors that determine its distribution and persistence.

Addressing the Financial Consequences of the Unknown Environmental Impact of Deep-Sea Mining

Sarah P. Hoyt, Independent Consultant, Linwood H. Pendleton, Univ. Brest, Ifremer, CNRS, UMR 6308, AMURE, IUEM, Olivier Thébaud, Ifremer, Univ. Brest, CNRS, UMR 6308, AMURE, Unité d'Économie Maritime, IUEM, and Cindy Lee Van Dover, Duke University, Nicholas School of the Environment, Beaufort, USA

The emerging deep-sea mining industry faces an opportunity for tremendous economic gain through the commercial harvest of a variety of high-grade minerals found at great ocean depths around the world. A certain negative consequence of mining, and thus a potential flashpoint for social conflict, lies in the damage to deep-sea ecosystems that will result from these activities. To advance the conversation on managing the economic consequences of currently unknown environmental impacts of deep-sea mining, we develop a typology of potential environmental impacts. We draw on the literature from similar industries to show how others have implemented financial tools – specifically, environmental bonds, environmental insurance, and mutual insurance – to deal with each type of impact. We argue that proper planning is needed to specify and identify the most appropriate mechanism, or combination thereof, that provides adequate financial protection against unknown environmental impacts related from deep-sea mining.

Impact assessments of mining the seabed: A necessary but still difficult step

Jean-Damien Bergeron, Ronan Launay and Jean-Marc Sornin, CREOCEAN

The ethical responsibility for working mineral resources in untouched natural areas has received recognition. National regulations about exclusive economic zones as well as international regulations (International Seabed Authority) require detailed impact assessments for such operations. For a description of the initial state of potential mining sites, these assessments must be based on reliable data covering all aspects of the marine environment (fauna, flora, sediments, water columns). The current state of knowledge on the seabed is still far from adequate. Assessing the impact of mining also requires knowledge of the industrial processes to be used, most of which are confidential or incipient. Environmental assessments

must, from the start, take into account such innovations. The very few environmental impact studies currently available are limited by blind spots in knowledge. They underscore the need to gather much more data and to make further innovations in prospecting and mining techniques.

3 - A regulatory framework and tools for sustainable mining

International legislation provides a framework regulating the access to marine mineral resources

Elie Jarmache, technical advisor at the Secrétariat Général de la Mer, member of the legal and technical committee of the International Seabed Authority

International mining law is mainly maritime. It concerns the seas, their depths and the zones where no state exercises jurisdiction but over which an international authority now has competence: the International Seabed Authority, whose major duty is to regulate deep-sea mining. The players in this field are nation-states, state firms, private companies and the Enterprise, the ISA's own mining operator. This setup concerns all phases from exploration and prospecting to actual mining. Till now, three types of mineral resources have been subjected to international regulations: nodules, polymetallic sulfides and cobalt-rich crusts. The international and national regulatory systems on mining share common points but also reflect differences of viewpoints.

EXTRAPLAC: Questions about the French continental shelf

Walter R. Roest, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), member of the committee on the bounds of the continental shelf

The UN's Law of the Sea Convention, adopted in 1982 and ratified by France in 1996, attributes sovereign rights to nation-states over an exclusive economic zones extending from the coasts out to 200 nautical miles (approximately 370 km). Under article 76 of the Convention, a state may claim an extension of this zone to 350 nautical miles (or even farther under certain conditions) if the continental shelf stretches beyond the 200-limit. It is, of course, necessary to prove that this condition holds. For this purpose, France launched, in 2002, a national program, EXTRAPLAC, for assembling the scientific and technical evidence that demonstrates the validity of such an extension from the coasts of the country and its overseas departments and territories. This program will submit the evidence to, and even defend it before, the UN Commission on the Limits of the Continental Shelf. Through this program, France is addressing important questions about extending its continental shelf, among them: the access to natural resources, protection of the environment, scientific research and the country's geopolitical strategy. Despite the legal and its diplomatic context, EXTRAPLAC is still, first and foremost, a scientific program.

The Secretary-General of the Sea: Active in deep-sea research policy

Vincent Bouvier, Secrétaire Général de la Mer

The French Secretary-General of the Sea plays a leading role in matters related to the exploration and exploitation of the seabed. This role has three principal aspects: drafting a strategy, following up on programs and integrating them in an international environment.

What are French industry's strong points for deep-sea mining?

Francis Vallat, founding president of Cluster Maritime Français and president of the association SOS Méditerranée

Deep-sea mineral wealth is an opportunity for humanity under condition that the environment be protected. France has considerable advantages in this domain: a dynamic maritime economy, a dense and diversified industry (big groups as well as small and midsized firms), an adapted research facilities, champions recognized among the best in the world for each stage in the mining process (from exploration to production), and a government that is apparently realizing that the country is lucky to see a major branch of industry emerging, comparable to the nuclear industry or aeronautics. However France also has handicaps: an anemic, slow-moving government and a confused, contradictory Europe that seems poorly equipped to gauge the means needed. Two of the most active countries (Germany and Japan) in this domain have contacted French professionals. The choice has been made for industry: we must advance with Germany, since we have already taken the first steps together.

A state-of-art mining of undersea minerals

Julien Denègre, coordinator of commercial development at Forsys Subsea

Apart from the mining of diamonds at a depth of 150 meters, no long-term commercial operation has yet successfully gathered solid minerals at depths of more than 200 meters. In January 2011, Nautilus Minerals obtained its first concession for mining polymetallic sulfides in zones near Puaa New Guinea. Having developed a system for mining these deposits, this Canadian company will carry out the first tests in 2019. France has a consistent set of advantages in matters related to the seabed and undersea mining: resources, skills, and an expertise unique in the world. Its players have formed a work group in the French Maritime Cluster. The government has offered an award in a competition open worldwide on innovations for developing marine resources. It has provided funding to two of the most innovative projects selected and has federated several French industrialists around two consortiums (MELODI and FONASURF) for developing the tools and techniques of deep-sea exploration and mining.

Miscellany

France's energy balance sheet for 2015

Sous-direction des Statistiques de l'Énergie, CGDD, MEDDE

Issue editor: François Jacq

Minerales submarinos, ¿cómo proteger los ecosistemas y explotar los recursos?

Prólogo

François Jacq, Ifremer (Instituto francés de investigación sobre la explotación marina)

1 - Los recursos minerales marinos y su contexto económico

Las minas terrestres, los recursos minerales de los fondos marinos y... nuestra sed de materias primas

François Bersani, Ingeniero general de Minas

Aunque, a diferencia de los hidrocarburos, y con excepción de ciertas sustancias cercanas de las costas, los recursos minerales de los fondos marinos aún no han sido explotados y siguen siendo ampliamente desconocidos, el interés por ellos sí se ha convertido en una realidad.

Al medida que la tecnología avanza, podrían ayudar a abastecer el mundo en materias primas en un futuro relativamente próximo, siempre y cuando se tomen precauciones para garantizar la protección del medio ambiente y... la evolución de los precios.

Mineralizaciones hidrotermales, los retos científicos de su exploración

Yves Fouquet, Investigador del Ifremer, Responsable del proyecto científico para la exploración y el estudio de las mineralizaciones oceánicas

Los sulfuros oceánicos ofrecen un potencial económico interesante para los industriales. Sin embargo, las estimaciones de la importancia de los depósitos y de los recursos en sí no son muy precisas. Las técnicas de exploración localizan sitios activos, mientras que la industria se centra en los sitios inactivos. El conocimiento de las mineralizaciones se basa principalmente en las exploraciones científicas. Nuevos desafíos aparecen entre las investigaciones básicas, el interés de la industria y la definición de estrategias de conservación del medioambiente. Las acciones de exploración son inseparables de los avances tecnológicos que permiten, a distintas escalas, explorar y evaluar los recursos. Muchos retos científicos están todavía por resolver para comprender los procesos de transferencia y dispersión de los metales y determinar las condiciones de una explotación sostenible de estos recursos.

Technology developments in the exploration and evaluation of deep-sea mineral resources

Sven Petersen, Mark Hannington and Anne Krätshell, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (Germany)

Manganese nodules, Co-rich crusts, and Seafloor massive Sulfides (SMS) are commonly seen as possible future resources that could potentially add to the global raw materials supply. At present, a proper global assessment of these resources is not possible due to a severe lack of information regarding their size, global distribution, and composition. The sizes of the most prospective areas that need to be explored for a global resource assessment are vast. Future deep-sea minerals exploration has to provide higher-resolution data and at the same time needs to cover large areas of the seafloor in a fast and cost-efficient manner. While nodules and crusts are 2-dimensional occurrences and an assessment of their distribution at the seafloor itself seems sufficient, seafloor massive sulfides are 3-dimensional sites and a proper resource assessment will always require drilling. Here the development of methods to image the subseafloor and to recognize economically interesting sites prior to drilling is of importance.

Desafíos económicos, ¿cuál es el potencial de los recursos minerales marinos?

Christophe-Alexandre Paillard, Jefe del departamento de «Inteligencia económica y protección de la información» del servicio de defensa, seguridad e inteligencia económica del Ministerio del Medioambiente, Energía y del Mar

Los requisitos en recursos minerales aumentan día a día. El lugar que ocupan las tecnologías cada vez más consumidoras de metales nos lleva a interrogarnos sobre los potenciales de la minería submarina que actualmente se limita a algunos casos situados cerca de las costas y al proyecto emblemático Solwara 1 de la empresa canadiense Nautilus, en Papúa Nueva Guinea. Las condiciones de explotación continúan siendo inciertas y tres preguntas siguen sin una respuesta clara: a) el tipo de tecnologías necesarias para la explotación, b) la evaluación del coste financiero de tales operaciones y, por último, c) el impacto en el medio ambiente de la explotación de minas submarinas. El potencial es elevado, pero estos obstáculos hacen que cualquier predicción futura sobre este tema sea aleatoria. No obstante, consciente de su interés, Francia ha aprobado en octubre de 2015, durante el Comité Interministerial del mar, una estrategia nacional para la exploración y explotación mineras de los fondos marinos.

Los desafíos de la explotación minera en aguas profundas, marco europeo y global

Gwenole Cozigou, Director de transformación industrial y cadenas de valor avanzadas de la Comisión Europea

Los recursos minerales marinos profundos, como fuentes potenciales de elementos, tales como el cobre, zinc, oro, plomo, cobalto, las tierras raras y el manganeso, han suscitado una atención especial en los últimos años.

La creciente demanda, así como el riesgo de escasez de algunas materias primas, han llamado la atención al poner de relieve las posibilidades de explotación de los recursos minerales de los fondos marinos.

Varias décadas de investigación y desarrollo tecnológico sobre los recursos minerales en aguas profundas han permitido que actualmente se considere la explotación de estos yacimientos, que en el pasado se creían inalcanzables. Sin embargo, aunque la mayoría de las tecnologías necesarias ya están disponibles, es importante, antes de pasar a la siguiente etapa; es decir, a la explotación comercial de estos yacimientos, adquirir un conocimiento mucho más profundo de los impactos ambientales de la explotación y definir las medidas que permitan reducir cualquier riesgo. Otro elemento importante depende de la necesidad de establecer un marco reglamentario adecuado antes lanzar cualquier actividad de extracción.

A pesar de los avances recientes en los conocimientos y tecnologías, la explotación de minerales de gran calado sigue siendo una actividad difícil, tanto desde el punto de vista tecnológico como desde el punto de vista medioambiental.

2 - El reto de la protección de los ecosistemas

Impactos ambientales de la explotación minera de los fondos marinos, panorama del saber actual

Pierre-Marie Sarradin, Ifremer, Jozée Sarrazin, Ifremer, y François H. Lallier, Profesor del CNRS

El desarrollo potencial de las operaciones de explotación de los recursos minerales de aguas profundas requiere de un análisis previo de los efectos que éstas puedan causar en los ecosistemas; esto con el fin de evitarlos, limitarlos e incluso proponer procesos de reducción y restauración de dichos efectos.

La evaluación de estos efectos potenciales sigue siendo muy difícil a causa de nuestra falta de conocimientos acerca de los métodos de explotación que serán utilizados por la industria, y de conocimientos fundamentales sobre la evaluación de la biodiversidad, comprensión de la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas asociados, pero también sobre la relación entre las aguas profundas y el resto del océano.

Recursos minerales, riesgos ambientales y estrategias de gestión de la biodiversidad, el ejemplo de las zonas de nódulos del Pacífico Nororiental

Lénaïck Menot, Investigador en ecología bentónica del Laboratorio *Environnement Profond* del Ifremer

El primer gran interés sobre los recursos minerales profundos que había suscitado el descubrimiento de los nódulos polimetálicos, data de hace unos cincuenta años. Durante este tiempo, la exploración, derecho internacional y ciencias del medioambiente han avanzado, pero no

a la misma velocidad. La zona de nódulos del Pacífico nororiental rápidamente ha sido objeto de contratos de exploración cuya superficie total sería igual a la de toda Europa y cuyos yacimientos explotables cubrirían un territorio del tamaño de Francia. La explotación de estos recursos tendrá consecuencias duraderas, aunque aún sean poco conocidas, sobre una fauna diversa y vulnerable. La autoridad internacional creada en 1994 para gestionar estos recursos y el impacto ambiental de su explotación ha desarrollado un plan de gestión de la región en 2012, sobre la base de recomendaciones científicas basadas en conocimientos aún muy parciales, en un espacio ampliamente ocupado por los derechos exclusivos que autorizan la exploración de los recursos minerales.

«¿Por qué no darle una oportunidad a los abismos?» - El proyecto de investigación Ifremer para conocer mejor la biodiversidad de los Fondos Marinos

Sophie Arnaud-Haond, Ecologista del Ifremer, y Florence Pradillon, Investigadora del laboratorio *Environnement Profond* Ifremer

Iniciado en 2016 por Ifremer, el proyecto «Pourquoi pas les abysses ? » (ABYSS) tiene como objetivo proponer un nuevo censo de la biodiversidad de los fondos marinos a nivel mundial, apoyándose en la explotación de nuevas técnicas moleculares que permiten acceder a lo que se conoce como el «ADN medioambiental». Los fragmentos de ADN aislados en muestras de agua o sedimentos permiten acceder a la lista de especies que viven en un entorno o que han vivido allí en un momento dado. Basándose en una caracterización sistemática de las muestras de sedimentos y del agua recolectada en todos los océanos del mundo, este proyecto pretende contribuir al inventario molecular de la diversidad marina; en particular de la que está presente en el fondo del mar y los abismos, entornos que hasta el día de hoy no se han explorado en más de un 95%. Esta revisión exhaustiva del alcance de la biodiversidad marina nos permitirá también comprender los factores que rigen su distribución y persistencia.

Addressing the Financial Consequences of the Unknown Environmental Impact of Deep-Sea Mining

Sarah P. Hoyt, Independent Consultant, Linwood H. Pendleton, Univ. Brest, Ifremer, CNRS, UMR 6308, AMURE, IUEM, Olivier Thébaud, Ifremer, Univ. Brest, CNRS, UMR 6308, AMURE, Unité d'Économie Maritime, IUEM, and Cindy Lee Van Dover, Duke University, Nicholas School of the Environment, Beaufort, USA

The emerging deep-sea mining industry faces an opportunity for tremendous economic gain through the commercial harvest of a variety of high-grade minerals found at great ocean depths around the world. A certain negative consequence of mining, and thus a potential flashpoint for social conflict, lies in the damage to deep-sea ecosystems that will result from these activities. To advance the conversation on managing the economic consequences of currently unknown environmental impacts of deep-sea mining, we develop a typology of potential environmen-

tal impacts. We draw on the literature from similar industries to show how others have implemented financial tools – specifically, environmental bonds, environmental insurance, and mutual insurance – to deal with each type of impact. We argue that proper planning is needed to specify and identify the most appropriate mechanism, or combination thereof, that provides adequate financial protection against unknown environmental impacts related from deep-sea mining.

Los estudios de impacto de la explotación minera de los fondos marinos, una etapa necesaria pero aún difícil

Jean-Damien Bergeron, Ronan Launay y Jean-Marc Sornin, CREOCEAN

Además de cuestionar la responsabilidad ética de las explotaciones de recursos minerales en entornos naturales intactos, los reglamentos nacionales (ZEE) e internacionales (AIFM) les imponen la redacción de estudios de impacto detallados. Estos estudios deben apoyarse en la descripción del estado inicial de los sitios, en datos fiables que abarquen todos los estratos del medioambiente marino (flora y fauna, sedimentos, columnas de agua). Sin embargo, el estado de los conocimientos de los fondos marinos es aún muy insuficiente.

La evaluación del impacto de una explotación exige también tener un buen conocimiento de sus *procesos* industriales, que, en su mayoría, son confidenciales y/o están en fase de desarrollo. Las innovaciones en la materia deben integrar, desde el principio, las preocupaciones ambientales.

Los pocos estudios de impacto disponibles padecen de estas lagunas y ponen de manifiesto la necesidad de obtener un mayor número de datos ambientales y de innovar aún más tanto en lo que respecta a las fases de exploración como en las fases de explotación.

3 - Marco y herramientas para una explotación sostenible

La legislación internacional que regula el acceso a los recursos minerales marinos

Elie Jarmache, encargado de misión de la Secretaría General del Mar, miembro de la Comisión Jurídica y Técnica de la Autoridad Internacional de los fondos marinos (AIFM/ISA)

El derecho minero internacional es principalmente marítimo: se desarrolla en el mar, en los fondos marinos, en los que no se ejerce ninguna jurisdicción estatal. Existe así un ámbito minero marítimo internacional bajo la jurisdicción de una instancia específica, la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, cuya función principal, si no exclusiva, es regular la explotación minera de los fondos marinos. Sus operadores potenciales son los Estados, empresas estatales, empresas privadas, pero también una entidad creada por el nuevo derecho del mar, llamada la Empresa, que simplemente es una extensión comercial de la Autoridad. Dicha empresa controla las diferentes fases de la actividad minera: la prospección, exploración y explotación. Asimismo, hasta la fecha, tres tipos de recursos minerales

son objeto de una reglamentación internacional: los nódulos y sulfuros polimetálicos, y las cortezas cobaltíferas. Si existen puntos comunes entre este sistema internacional y cualquier otro sistema de derecho minero reconocido a nivel nacional, también existen ciertas diferencias, que lo enmarcan en una otra perspectiva.

EXTRAPLAC: los desafíos para Francia de su plataforma continental.

Walter R. Roest, Ifremer, miembro de la Comisión de Límites de la plataforma continental

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, adoptada en 1982 y ratificada por Francia en 1996, atribuye a los Estados costeros derechos soberanos sobre el mar hasta 200 millas náuticas (M) de las costas (unos 370 km); es lo que se conoce como zona económica exclusiva. El artículo 76 de la Convención estipula que, si la prolongación natural del territorio terrestre de un Estado va más allá de este límite, dicho Estado podrá reclamar una extensión de su zona económica exclusiva hasta 350 M, o incluso más allá en determinadas condiciones. Pero para ello, hay que demostrar que la plataforma continental se extiende hasta dicho punto. Por esta razón, Francia ha puesto en marcha, en 2002, el programa nacional EXTRAPLAC (EXTensión RAZonada de la PLAtaforma Continental), que se encarga de conformar, apoyarlo e incluso defender ante la Comisión de Límites de la plataforma continental de las Naciones Unidas (Nueva York) los expedientes técnicos y científicos que demuestren esta extensión sobre el mar de los territorios costeros continentales y de las regiones de ultramar. A través de este programa, Francia responde a los importantes retos de la extensión de su plataforma continental, entre otras cosas, el acceso a los recursos naturales, la protección del medioambiente, la investigación científica y la estrategia geopolítica. Aunque se inscriba en un marco jurídico y diplomático, el enfoque del programa EXTRAPLAC es ante todo científico.

El Secretario General del Mar, protagonista de la política de investigación de los fondos marinos

Vicente Bouvier, Secretario general del mar

En materia de exploración y explotación de los fondos marinos, el Secretario general del mar desempeña un papel esencial que abarca tres aspectos principales: la definición de una estrategia, el acompañamiento de proyectos y su inserción en el entorno internacional.

¿Cuáles son los puntos fuertes del sector francés en materia de explotación de las riquezas minerales de los fondos marinos?

Francis Vallat, Presidente fundador del Cluster marítimo francés, Presidente de la asociación «SOS Mediterráneo».

Las riquezas minerales de los fondos marinos son una oportunidad para la humanidad, siempre y cuando se proteja el medioambiente. Se trata de un ámbito en el que Francia tiene serias ventajas: una economía marítima dinámica, una industria densa y diversificada (grandes grupos, pero también PYMES y microempresas), capacidades de

realizar investigaciones adecuadas, campeones que forman parte de los mejores del mundo para cada etapa, desde la exploración hasta la producción, y, por último, un Estado que parece despertarse y darse cuenta de que el país tiene la oportunidad de que surja un sector industrial importante comparable al sector nuclear o aeronáutico. Ahora bien, sufre también de desventajas, entre otras, un Estado debilitado, que se mueve lentamente, y una Unión Europea confusa y contradictoria que no sabe calcular los medios que se deben destinar.

Dos de los países más activos en este campo, Alemania y Japón, han hecho alianzas con varios profesionales de Francia. Ahora que la industria francesa ha sido escogida, es nuestro deber avanzar con Alemania, con la cual hemos dado los primeros pasos.

Panorama de la minería submarina

Julien Denègre, Encargado del desarrollo comercial de Forsys Subsea

Con excepción de la explotación de diamantes a 150 metros de profundidad, ninguna operación a largo plazo se ha llevado a cabo en materia de recolección con fines comerciales de minerales sólidos a profundidades superiores a 200 metros. La empresa canadiense Nautilus Minerals ha obtenido su primera concesión minera en enero

de 2011 para los sulfuros polimetálicos, en Papúa Nueva Guinea. Actualmente trabaja en la elaboración de un sistema de explotación de estos yacimientos, cuyos primeros ensayos se realizarán en 2019.

Por otra parte, Francia dispone de un conjunto coherente de ventajas, recursos, conocimientos y competencias únicas en el mundo en materia de fondos submarinos y explotación minera. Estos agentes han constituido un grupo de trabajo dedicado al Cluster marítimo francés (CMF).

El Estado ha puesto en marcha un concurso mundial de innovación dedicado a la valorización de las riquezas marinas, que ha permitido financiar los proyectos más innovadores y reunir varios industriales franceses en torno a los dos consorcios (MELODI y FONASURF) dedicados al desarrollo de herramientas de exploración y explotación.

Otros temas

El balance energético de Francia de 2015

Subdirección de Estadísticas de la energía, CGDD (Comisión General de Desarrollo Sostenible), MEDDE (Ministerio del Medioambiente, Desarrollo Sostenible, Energía y del Mar)

El dossier ha sido coordinado por François Jacq

ARNAUD-HAOND Sophie



D.R

Diplômée de l'Université de Montpellier 2, Sophie Arnaud-Haond est écologue à l'Ifremer depuis 2007. Spécialisée en écologie évolutive, elle s'intéresse à l'histoire et aux conditions de l'émergence et de la distribution spatiale de la diversité dans les océans. Son intérêt pour les phénomènes se produisant sous la surface des océans, à l'abri des regards, ainsi que pour l'histoire évolutive du vivant l'a conduite à utiliser les outils moléculaires et bioinformatiques d'analyse de l'ADN pour reconstruire les trajectoires des espèces et des communautés dans l'espace (c'est-à-dire la façon dont les populations et les communautés sont en interactions, sont interconnectées) et dans le temps (l'histoire des espèces et des conditions dans lesquelles elles émergent et disparaissent). Son objectif est de contribuer à la connaissance de la vie dans les océans, tout en apportant des éléments d'information nécessaires à un meilleur respect de l'environnement et à la réduction de l'impact des activités humaines.

BERGERON Jean-Damien



D.R

Titulaire d'un DESS sur les écosystèmes marins (Université de Corte), Jean-Damien Bergeron est responsable de l'agence CREOCEAN Sud-Ouest, où il est chef de projets écosystèmes marins. Après avoir exercé en qualité de chargé d'études en Méditerranée à l'agence CREOCEAN Paca Corse de 2006 à 2010 et avoir piloté l'agence Antilles-Guyane de CREOCEAN de 2010 à juin 2015, il s'occupe aujourd'hui du développement des activités de CREOCEAN dans le Sud-ouest de la France. En poste à Bassussarry (à proximité de Bayonne), il justifie d'une expérience de 13 années dans la conduite de projets portant sur l'environnement marin, notamment la réalisation de suivis environnementaux nationaux et internationaux à court et long terme. Il est spécialiste des écosystèmes sous-marins et réalise des études générales portant sur cet environnement, il justifie en la matière d'une solide expérience à l'international. Il est également plongeur professionnel.

BERSANI François

Ingénieur général des Mines (h), François Bersani a été notamment chef du service Exploration-exploitation à la direction des Carburants (1973-1978), puis secrétaire général adjoint du SGCI, un organisme chargé de la coordination interministérielle en matière de politiques européennes (1979-1985). Après avoir travaillé au sein

de différents cabinets ministériels et à la DATAR (un organisme chargé de l'aménagement du territoire), il rejoint le Conseil général des Mines (devenu depuis le Conseil général de l'économie – CGEJET), où il occupera notamment les fonctions de président (suppléant) de la section « Régulation-ressources » du CGEJET (2009-2012). Il a été le premier secrétaire général du COMES (le Comité pour les métaux stratégiques), de 2011 à 2013.

BOUVIER Vincent



D.R

Titulaire d'un DEA de droit public, d'un DEA d'études politiques de l'IEP de Paris et d'un diplôme d'IHESI, Vincent Bouvier occupe aujourd'hui les fonctions de Secrétaire général de la Mer. Avant cette nomination, il a exercé de nombreuses autres responsabilités. Il a été notamment :

- à partir du 1^{er} janvier 1980 : chargé d'affaires à l'Agence nationale pour la valorisation de la recherche,

- à partir d'octobre 1981 : assistant de droit public à l'Université R. Schuman à Strasbourg,
- admis, en avril 1988, au concours pour le recrutement exceptionnel de sous-préfets, il est nommé en décembre 1988 directeur du cabinet du préfet du Tarn, puis en février 1991, il est placé en position hors cadre pour être mis à la disposition du ministre des DOM-TOM et exercé en qualité de directeur du cabinet du délégué du Gouvernement pour la Nouvelle-Calédonie et les îles Wallis-et-Futuna, haut-commissaire de la République en Nouvelle-Calédonie. Par la suite, il sera successivement Secrétaire général de la préfecture de la Lozère (prise de fonction en février 1993), puis Secrétaire général adjoint de la préfecture du Rhône (septembre 1994),
- en juillet 1996, il est détaché en qualité d'administrateur civil pour être mis (au titre de sa mobilité) à la disposition du Médiateur de la République,
- en janvier 1999, il est nommé Secrétaire général de la préfecture de la Drôme et est chargé de mission pour la politique de la ville auprès du préfet de la Drôme,
- en juin 2000, il est Secrétaire général de la préfecture de la Réunion, puis en mars 2004, sous-préfet de Valenciennes,
- en février 2007, il est nommé préfet de Mayotte, puis préfet de l'Aveyron en septembre 2008,
- en décembre 2009, il est nommé directeur, délégué général à l'Outre-mer,
- en février 2013, il est nommé Préfet du Haut-Rhin, et en août 2014, Haut-commissaire de la République en Nouvelle-Calédonie

Sa nomination en qualité de Secrétaire général de la Mer intervient le 20 juin 2016.

Vincent Bouvier est Officier de la Légion d'honneur, Officier de l'Ordre National du Mérite, Chevalier des Palmes académiques et Officier du Mérite agricole.

COZIGOU Gwenole



D.R

Gwenole Cozigou est directeur au sein de la direction générale pour le Marché intérieur, l'industrie, l'entrepreneuriat et les PME (Commission européenne), où il est en charge de la Transformation industrielle et des chaînes de valeur avancées.

Économiste de formation, il est fonctionnaire à la Commission européenne depuis 1985 et intervient dans les domaines de la politique industrielle et des relations extérieures.

Ancien directeur adjoint du Cabinet du Commissaire Liikainen alors en charge de la politique d'entreprise et industrielle, il a occupé plusieurs postes d'encadrement dans les services suivants :

- industrie alimentaire et biotechnologie,
- coordination de la législation du marché intérieur pour les biens de consommation,
- politique d'entreprise et industrielle,
- Défense, industries aérospatiales et maritimes.

Depuis décembre 2008, il exerce en qualité de directeur à la DG GROWTH (DG en charge du Marché intérieur, de l'industrie, de l'entrepreneuriat et des PME) ; il y est plus particulièrement chargé des questions de compétitivité et de la législation du marché intérieur de l'Union européenne intéressant divers secteurs industriels.

Ses principales responsabilités se rapportent aujourd'hui : à l'économie circulaire, à la politique européenne en matière d'énergie, aux industries à forte intensité énergétique, à la construction, à l'industrie automobile, aux matières premières et aux industries d'ingénierie.

DENÈGRE Julien



D.R

Julien Denègre est diplômé de Paris Tech Arts & Métiers (1999) et est détenteur d'un certificat d'aptitude en stratégie, fusion/acquisition de HEC (2012). Après avoir exercé pendant 3 ans chez Bouygues Offshore en tant que responsable équipements sur des projets *onshore/offshore* en Russie, en Algérie ou bien encore au Nigeria, il rejoint Technip en 2004 en tant que

responsable Propositions pour des projets sous-marins en Afrique de l'Ouest. Puis de 2006 à 2013, il exerce en tant que responsable commercial Mines & Métaux. Technip est une compagnie d'ingénierie française spécialisée dans la conception et la réalisation de grands projets pour l'industrie de l'énergie. Depuis 2015, il est en charge du développement commercial au sein de Forsys Subsea, une co-entreprise détenue à parts égales par FMC Technologies et Technip et qui réunit des compétences et des ressources issues de deux leaders mondiaux du *subsea*. Cette alliance vise, notamment, à redéfinir la façon dont les champs sous-marins sont conçus, réalisés et maintenus en condition.

FOUQUET Yves



D.R

Yves Fouquet est chercheur à l'Ifremer. Il est responsable du projet scientifique relatif à l'exploration et à l'étude des minéralisations océaniques. De 1997 à 2015, il a dirigé le laboratoire de Géochimie et de Métallogénie de l'Ifremer et, de 2005 à 2010, il a conduit le programme pluridisciplinaire d'étude des milieux extrêmes dans les grands

fonds. Il a soutenu avec succès une thèse portant sur la métallogénie et est titulaire d'une habilitation à diriger des recherches (HDR). Après avoir travaillé pour le BRGM dans le domaine de l'exploration minière à terre, il rejoint l'Ifremer en 1982. Il a participé à 37 campagnes d'exploration des grands fonds océaniques, dont 10 en tant que chef de mission. Il a contribué à la découverte de nombreux champs hydrothermaux, dans l'est et l'ouest du Pacifique et en Atlantique, des découvertes faites dans le cadre de nombreuses coopérations nationales et internationales (États-Unis, Canada, Japon, Allemagne, Royaume-Unis, Portugal, Russie). Il a encadré 9 thèses et contribué à la rédaction d'environ 120 articles scientifiques.

HANNINGTON Mark



D.R

Mark Hannington is the Goldcorp Chair in Economic Geology at the University of Ottawa and Professor at GEOMAR's Center for Ocean Research in Kiel, Germany. Prior to joining the University of Ottawa in 2005 and GEOMAR in 2014, he was a senior research scientist at the Geological Survey of Canada for 15 years. He is Head of the Marine Minerals Research Group at GEOMAR. His

research combines the study of ancient ore deposits and mineral resources on the modern seafloor. He and his students have participated on more than 35 research cruises throughout the world's oceans. Dr. Hannington has been consulted extensively by industry and government agencies about the potential of ocean mineral resources. From 2001 to 2008, he served as editor of the journal Economic Geology. He is the recipient of the Duncan Derry Medal of the Geological Association of Canada and the Silver Medal of the Society of Economic Geologists. He is a Fellow of the Royal Society of Canada.

HOYT Sarah

Sarah Hoyt has 8 years of experience working at the interface between environmental management, regulation, and business development. Following four years leveraging ocean climate change science to influence global policy at Conservation International, she received dual Masters' degrees from Duke University in Environmental



D.R

JACQ François

Ancien élève de l'École polytechnique et de Mines Paris-Tech, docteur de Mines Paris-Tech, François Jacq est président de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer).

Auparavant, il a été chercheur en histoire des sciences, directeur générale de l'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (Andra), directeur de la demande et des marchés énergétiques au ministère chargé de l'Industrie et président directeur général de Météo-France.

JARMACHE Élie

Élie Jarmache est chargé de mission au Secrétariat général de la Mer. Il est membre de la Commission juridique et technique de l'Autorité internationale des fonds marins.

KRÄTSCHHELL Anna



D.R

Anna Krätschell received her PhD from the Goethe University (Frankfurt/Main, Germany) in 2010 for reconstructing the Holocene landscape development in parts of Northern Syria. Subsequently, she started to work at the Helmholtz Centre for Ocean Research, GEOMAR in Kiel at the Energy and Resources project group as database and GIS manager. After working as GIS project manager in the Sedimentology, Coastal and Continental Shelf Research Group at Kiel University in 2012-2013, she returned to GEOMAR in 2014 for her recent work at the Magmatic and Hydrothermal Systems research group. Having specialized in marine GIS application and database management, she is preparing and spatially interpreting data regarding marine mineral resources, especially SMS, polymetallic nodules and crust occurrences.

LALLIER François H.

François H. Lallier est titulaire d'un doctorat de l'Université de Bordeaux (1988) portant sur la physiologie de la respiration des crustacés. Il s'est intéressé depuis aux adaptations des invertébrés marins inféodés aux sources hydrothermales profondes, des environnements extrêmes où annélides (*Riftia*, *Alvinella*), crustacés (*Rimicaris*) et mollusques (*Bathymodiolus*) ont développé, pour prospérer, des symbioses avec des bactéries chimiotrophes. Partant



D.R

d'études ciblées sur l'adaptation de ces animaux aux milieux dans lesquels ils vivent, il a développé des approches plus globales portant sur l'analyse de l'expression des gènes en relation avec le mode de vie symbiotique. Il est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et dirige le laboratoire « Adaptation et diversité en milieu marin », une unité mixte de recherche créée avec le CNRS et qui fonctionne au sein de la Station biologique de Roscoff. Il a dirigé un réseau national de recherche sur la biologie des écosystèmes chimiosynthétiques profonds, et a pris part en tant qu'organisateur ou participant à plusieurs campagnes océanographiques. Il a publié plus de 80 articles.

LAUNAY Ronan



D.R

Ronan Launay est ingénieur chargé d'études spécialisé dans la gestion des milieux côtiers et marins. Il est référent technique pour l'élaboration de « Dossiers réglementaires et Habitats Natura 2000 ». Après quatre années passées à l'agence CREOCEAN Antilles-Guyane, il travaille depuis 2009 sur les dossiers concernant la France métropolitaine au sein du département « Environnement Manche Atlantique ». Son domaine d'expertise est l'écologie marine et l'insertion de projets d'aménagement, de travaux ou de tout autre programme pouvant impacter ces milieux sensibles. Il dirige et contribue ainsi régulièrement à l'élaboration de dossiers réglementaires ou de programmes de suivi de la qualité environnementale.

Il possède un BSC(Hons) de gestion des ressources environnementales obtenu en Grande-Bretagne et d'un Master II de dynamique des écosystèmes aquatiques obtenu en France.

MENOT Lénaïck

Lénaïck Menot est chercheur en écologie benthique. En fonction au laboratoire « Environnement profond » de l'Ifremer, Lénaïck Menot est spécialisé en biologie des communautés benthiques profondes. Ses recherches portent en particulier sur les conséquences environnementales des activités humaines sur les écosystèmes des grands fonds océaniques. Après la soutenance d'une thèse portant sur l'évaluation de l'impact du forage pétrolier profond et un post-doctorat sur l'impact potentiel de l'exploitation des nodules polymétalliques, il contribua pendant 5 ans à la coordination d'un projet international de recensement de la vie marine dans les marges continentales. En 2010, il rejoint l'Ifremer, où il étudie les écosystèmes associés aux ressources minérales et les risques environnementaux liés à l'exploitation de ces

ressources. Au niveau international, Lénaïck Menot est co-responsable du réseau INDEEP (*International Network for scientific investigation of deep-sea ecosystems*) et est membre de DOSI (*Deep Ocean Stewardship Initiative*).

PAILLARD Christophe-Alexandre



D.R

Christophe-Alexandre Paillard est administrateur civil hors classe et est chef du département « Intelligence économique et protection de l'information » du service de défense, de sécurité et d'intelligence économique du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. Auparavant, il a exercé différentes fonctions : directeur « Armement et économie de défense » de l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire ; adjoint au directeur des affaires stratégiques du ministère de la Défense ; directeur des affaires juridiques, internationales et technologiques de la CNIL ; conseiller technique au secrétariat d'État chargé des Affaires européennes. Il enseigne l'économie à Sciences Po Paris et à l'Institut catholique de Paris. Il est l'auteur d'ouvrages et d'articles traitant de questions économiques et de défense. Il est ancien élève de l'ENA, ancien auditeur de la 67^{ème} session nationale « Politique de défense » de l'IHEDN et de l'Institut diplomatique du ministère des Affaires étrangères.

PENDLETON Linwood



D.R

Linwood Pendleton is an environmental economist and a Senior Scholar of Ocean and Coastal Policy at Duke University's Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. Since October 2014, he holds the International Chair in Marine Ecosystem Services at LabexMER and the European Institute for Marine Studies (IUEM – University of Western

Brittany). Pendleton is also an Adjunct Associate Professor at the Duke University Marine Laboratory, part of the Nicholas School of the Environment. Previously, Pendleton served as the Director of Ocean and Coastal Policy for the Nicholas Institute from 2009-2013, and was the Acting Chief Economist for the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) from 2011-2013.

PETERSEN Sven

Sven Petersen received his PhD from Freiberg University in 2000 after spending a number of years in Germany and Canada working on seafloor hydrothermal systems. He remained in Freiberg until 2004 when he joined GEOMAR, Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel in Germany. His research focuses on understanding the processes that form and change seafloor hydrothermal systems with time. He has participated in more than 35 research cruises



D.R

as well as the use of autonomous underwater vehicles for their exploration.

es to submarine hydrothermal systems in the Pacific, Atlantic, Indian Ocean, and the Mediterranean Sea. Major aims of his research are to understand the chemical variability and resource potential of submarine massive sulfide occurrences, the use of mobile drilling techniques and geophysical methods to investigate their seafloor extent, as

PRADILLON Florence

Titulaire d'un doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Florence Pradillon est chercheur au laboratoire « Environnement profond » de l'Ifremer depuis 2010. Spécialisée en biologie marine, elle travaille principalement sur le cycle de vie d'espèces peuplant des habitats marins profonds particuliers, dont le fonctionnement repose sur la chimiosynthèse. Son objectif est de mieux comprendre comment des organismes parviennent à coloniser ces habitats instables et fragmentés, notamment à travers la dispersion de leurs formes larvaires, qui restent le plus souvent méconnues. Par ses recherches, elle contribue à la compréhension des mécanismes sous-jacents de la résilience des communautés vivant dans les profondeurs. Elle est l'une des scientifiques en charge du portage du projet Ifremer ABYSS, et participe à ce titre à la définition de protocoles utilisant les approches de métabarcodage pour caractériser la biodiversité profonde, notamment dans le cadre de l'évaluation des impacts de l'exploitation des ressources minérales profondes.

ROEST Walter R.



D.R

Ottawa, où il a exercé en tant que chercheur en géophysique de 1990 à 2002. Pendant cette période, il a dirigé la sous-division de la géophysique crustale, et était en parallèle directeur géoscientifique (par intérim) et directeur de la division des géosciences continentales. En 2003, il a rejoint l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), à Brest, en tant que directeur du département des géosciences marines. De 2004 à 2012, il a dirigé le programme français pour l'extension du plateau continental dans le cadre de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (EXTRAPLAC) et a conduit de nombreuses campagnes en mer, au large des côtes des

Walter R. Roest justifie d'un doctorat en géophysique marine du laboratoire Vening Meinesz de l'Université d'Utrecht, aux Pays-Bas. Après 3 années de post-doctorat au Centre géoscientifique de l'Atlantique à l'Institut océanographique de Bedford, en Nouvelle-Écosse, au Canada, il a rejoint la Commission géologique du Canada à

territoires français d'Outre-mer. Il est (co-) auteur de plus de 80 articles de rang A, traitant de sujets relatifs à la géodynamique globale, à la tectonique, à l'analyse des anomalies magnétiques régionales, ou se rapportant à des études de la marge continentale. Proposé par la France, Walter Roest a été désigné, en 2012, par les États parties à la Convention précitée, en tant que membre de la Commission des limites du plateau continental, son mandat est de 5 ans.

SARRADIN Pierre Marie



D.R

Pierre Marie Sarradin a soutenu sa thèse de doctorat en 1993 à l'Université de Pau et des pays de l'Adour, celle-ci portant sur le devenir du tributylétain dans les sédiments du Bassin d'Arcaçhon. Cadre de recherche à l'Ifremer (centre de Bretagne) depuis 1994, il s'intéresse au fonctionnement des écosystèmes hydrothermaux profonds, en collaboration avec Jozée Sarrazin.

Depuis 2009, il est responsable de l'unité de recherche « Études des écosystèmes profonds » de l'Ifremer. Avec Mathilde Cannat de l'IPGP, il assure, depuis 2010, la coordination des activités de l'Observatoire profond EMSO-Açores fonctionnel sur le champ hydrothermal Lucky Strike. Il a participé (parfois en tant qu'organisateur) à plusieurs campagnes océanographiques et a publié plus de 70 articles.

SARRAZIN Jozée



D.R

Jozée Sarrazin a obtenu un doctorat à l'Université du Québec à Montréal (1998), un doctorat portant sur la répartition spatiale et l'évolution temporelle des communautés inféodées aux édifices hydrothermaux de la dorsale Juan de Fuca (Nord-est de l'océan Pacifique). Ses travaux de recherche lui ont permis de proposer l'un des tout premiers modèles de succession des communautés hydrothermales. Dans ses travaux, elle continue de s'intéresser à la structure et au fonctionnement des écosystèmes marins profonds, incluant ceux liés aux nodules polymétalliques, aux sources froides et aux sources hydrothermales, leur milieu de prédilection. Depuis une dizaine d'années, elle participe, en étroite collaboration avec Pierre Marie Sarradin, au développement de modules d'observation biologique permettant de suivre la dynamique temporelle de la faune hydrothermale et de son environnement. Ces modules innovants sont déployés sur les observatoires « Ocean Networks Canada » et « EMSO-Açores ». Jozée Sarrazin a publié plus de 60 articles et a contribué à l'écriture de 5 chapitres de livres. Elle a également participé à plus de 30 missions océanographiques mobilisant des

engins sous-marins, dont deux en tant que chef de mission. En 2012, elle a pris la responsabilité du laboratoire « Environnement profond » de l'Ifremer.

SORNIN Jean-Marc



D.R

Jean-Marc Sornin est le fondateur, président et directeur général de CREOCEAN. Docteur en géologie marine, il exerce pendant 2 ans en qualité d'ingénieur-conseil pour le compte de SCE et pendant 4 ans comme chercheur à l'Ifremer. En 1987, il crée la société ECOCEAN, qui fusionne en 1991 avec CREO, alors filiale de l'Ifremer. Il en devient le président et le directeur général en 2004, suite à l'intégration de cette société au sein du groupe SCE (aujourd'hui KERAN).

Très attaché aux collaborations internationales, il est membre fondateur du Groupement européen d'intérêt économique EUROPHAR (créé en 1997). En 2005, il est nommé conseiller du Commerce extérieur de la France.

Attentif au développement des relations entre les organismes de recherche et les structures d'application, il est nommé en 2005 membre du conseil scientifique de l'Université de La Rochelle, puis membre de son conseil d'administration, fonction qu'il occupe jusqu'en 2016. Il est depuis 2015 administrateur du pôle Mer Bretagne Atlantique.

Très attaché aux collaborations internationales, il est membre fondateur du Groupement européen d'intérêt économique EUROPHAR (créé en 1997). En 2005, il est nommé conseiller du Commerce extérieur de la France. Attentif au développement des relations entre les organismes de recherche et les structures d'application, il est nommé en 2005 membre du conseil scientifique de l'Université de La Rochelle, puis membre de son conseil d'administration, fonction qu'il occupe jusqu'en 2016. Il est depuis 2015 administrateur du pôle Mer Bretagne Atlantique.

THÉBAUD Olivier



D.R

Olivier Thébaud is a resource and environmental economist. His research focuses on the development of decision-support approaches and tools for the management of coastal and marine resources, including ecological-economic modeling, and the economics of ecosystem-based approaches to natural resources management. Key areas of

application include the regulation of commercial and recreational fisheries, aquaculture, multiple ecosystem uses and marine pollution, as well as biodiversity conservation policies including Marine Protected Areas. After having worked for CSIRO from 2009 to 2013, as a senior economist for the Marine and Atmospheric Research Division, he is now Head of the Economics Unit of the French Marine Research Institute Ifremer, and Director of the AMURE research group (joint between Ifremer, CNRS and UBO).

VALLAT Francis

Francis Vallat est président d'honneur fondateur du Cluster Maritime Français, qui dynamise les solidarités entre 400 entités maritimes françaises et co-organise les Assises de la mer (qui rassemblent 1 800 responsables de



D.R

la vie maritime française, dont le Premier ministre et d'autres membres du gouvernement).

Il préside le « *European Network of Maritime Clusters* », qui coordonne 18 *clusters* nationaux de l'Union européenne, ainsi que le Salon « Euromaritime ». Il préside également l'association « SOS Méditerranée », qui sauve de la

noyade nombre de migrants, et « Expédition 7^{ème} continent », qui combat la pollution que

représentent les plastiques dans les océans. Armateur pendant 30 ans, il avait en 1990 déclaré publiquement la guerre aux navires poubelles. Il a été pendant 10 ans le représentant de la France auprès de l'Agence européenne de sécurité maritime, dont il fut pendant 6 ans le vice-président.

Enfin, il est le président d'honneur de l'Institut français de

la mer, au sein duquel il a co-fondé « Les mardis de la mer et des Français ». Il a également dirigé la Revue Maritime. Capitaine de Vaisseau (R), il est membre de l'Académie de Marine.

VAN DOVER Cindy Lee



D.R

Cindy Lee Van Dover is a deep-sea explorer and scientist and the Harvey W Smith Professor of Biological Oceanography at Duke University's Nicholas School of the Environment. From 2006 to 2016, Van Dover was Director of Duke University's Marine Laboratory and Chair of the Division of Marine Science and Conservation.