

# Les ressources minérales marines profondes

Synthèse  
d'une étude prospective  
à l'horizon 2030

2011

 Ifremer





**Les grandes évolutions industrielles** sont fondées sur la disponibilité d'énergie et de minerais : le fer au 19<sup>e</sup> siècle, l'aluminium et le cuivre au 20<sup>e</sup> siècle, le silicium et les métaux de haute technologie depuis 20 ans. Aujourd'hui, des tensions croissantes apparaissent entre la disponibilité des minerais et les besoins mondiaux, surtout dans les grands pays industriels dont le nombre et le poids ne cessent de s'accroître. La croissance de la Chine explique ainsi à elle seule la moitié de la hausse de la demande en métaux de base depuis l'année 2000. Compte tenu des risques de

pénurie d'approvisionnement pour l'Europe en matière de métaux stratégiques utilisés dans nombre d'industries de pointe, voire pour certains métaux courants comme le cuivre, il est devenu nécessaire d'engager une réflexion active sur le potentiel des ressources minérales marines, complément éventuel des gisements connus à terre.

C'est dans ce contexte que j'ai décidé de lancer, en septembre 2009, un travail de réflexion prospective dans ce domaine à l'horizon 2030 en centrant la réflexion sur les besoins de la France et de l'Europe. Disposant d'un vaste territoire océanique, de moyens technologiques et de compétences reconnues depuis longtemps dans l'étude des grands fonds marins, la France se doit en effet de rester un acteur majeur de cette exploration, *a fortiori* au moment où se dessinent les conditions de mise en œuvre d'une valorisation industrielle.

Plus d'une vingtaine de partenaires français représentant les principaux acteurs du secteur se sont engagés dans cette étude pendant une année. Je souhaite les remercier très chaleureusement pour leur investissement dans ce travail collectif. Les questions qui ont été traitées sont nombreuses et complexes car elles concernent à la fois les évolutions du contexte juridique, de l'offre et des marchés, les types de sites géologiques profonds susceptibles d'exploitation, les technologies mobilisables et leurs impacts, dans un environnement encore très peu connu et difficile d'accès.

L'Ifremer joue ainsi pleinement son rôle d'organisation de la réflexion collective en mobilisant les compétences et l'expertise publiques et privées dans les domaines les plus divers, allant du droit international en haute mer à la recherche et à la formation. Comme toute prospective digne de ce nom, ce travail débouche sur des propositions concrètes d'action pour tous les acteurs concernés afin que la dynamique ainsi enclenchée collectivement porte ses fruits au service de notre pays.

Jean-Yves Perrot  
Président-Directeur général de l'Ifremer



# Les ressources minérales marines profondes

## Synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030

*Document de synthèse issu des conclusions du groupe de travail et des recommandations du comité de pilotage du 6 juillet 2010.*



### Sommaire

<b>1</b>	Enjeux et cadrage de l'étude .....	<b>6</b>
<b>2</b>	Méthodologie .....	<b>9</b>
<b>3</b>	Enjeux transversaux par type de métal.....	<b>10</b>
<b>4</b>	Enjeux environnementaux .....	<b>15</b>
<b>5</b>	Scénarios et enjeux associés .....	<b>17</b>
<b>6</b>	Aspects juridiques.....	<b>20</b>
<b>7</b>	Enjeux d'innovation technologique.....	<b>22</b>
<b>8</b>	Résultats et recommandations .....	<b>24</b>

### Annexes

<b>1</b>	Membres du comité de pilotage .....	<b>28</b>
<b>2</b>	Membres du groupe de travail.....	<b>30</b>
<b>3</b>	Experts consultés.....	<b>31</b>
<b>4</b>	Glossaire relatif à la méthode des scénarios.....	<b>32</b>
<b>5</b>	Bibliographie succincte .....	<b>32</b>
<b>6</b>	Tableau des atouts et contraintes des principaux minerais marins profonds	<b>33</b>

**Des analyses récentes**, issues notamment de travaux français et européens, montrent que les États européens risquent d'être confrontés à une mutation des marchés mondiaux de matières premières. Ils dépendent déjà fortement d'importations de minéraux métalliques et de métaux dits de haute technologie tels que le cobalt, le platine, les terres rares et le titane.

Ce constat implique de diversifier les sources d'approvisionnement et ouvre un champ nouveau pour l'exploration et l'exploitation futures, parfois déjà engagées, des ressources minérales marines profondes. Par ailleurs, des stratégies nationales concernant ce type de ressources marines se développent dans d'autres pays que la France (Chine, Inde, Brésil, Russie, Allemagne...). Il y a donc une réelle convergence de l'approche nationale et européenne, voire mondiale, comme le montrent les débats déjà engagés dans le cadre des Nations Unies et du G8.

Il apparaît donc nécessaire de fixer une stratégie nationale dans ce domaine en disposant d'un cadre de vue à long terme, notamment en matière juridique, compte tenu du fait que ce sont les États qui obtiennent les permis miniers attribués par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM ou ISA en anglais).

En septembre 2009, le Président-Directeur général de l'Ifremer lance un travail de réflexion prospective sur les ressources minérales marines à l'horizon 2030 avec vingt-quatre partenaires représentant les principaux acteurs du secteur : ministères, industriels, instituts de recherche, universités, agences spécialisées, Commission européenne.

L'objectif est d'identifier les enjeux, le potentiel de ces ressources, les conditions d'émergence de leur exploitation et de leur valorisation à moyen terme afin d'identifier et d'engager les partenariats et les programmes stratégiques adaptés. Quatre types de ressources potentielles ont été retenus : les sulfures hydrothermaux, les encroûtements de cobalt et de platine, les nodules polymétalliques et les sources d'hydrogène naturel.

L'Ifremer conduit des recherches dans ce secteur depuis longtemps et a acquis ainsi une expérience et des compétences, notamment en matière de métallogénie marine, de coopération internationale avec d'autres pays partenaires ou concurrents potentiels (Russie, Brésil...), de moyens à la mer (navires et technologie d'intervention sous-marine), de partenariats avec l'industrie pétrolière (études d'impact, biodiversité, écosystèmes profonds) et de recherche technologique sur des procédés d'exploration et d'exploitation des gisements.

Les ressources minérales sont par ailleurs inscrites comme l'un des dix axes prioritaires du plan stratégique de l'Ifremer à l'horizon 2020 ainsi que dans les objectifs du contrat quadriennal 2009-2012. Les ministères en charge de l'Environnement et de la Recherche ont manifesté leur intérêt pour une étude sur les ressources minérales marines profondes et leur volonté de soutien sous diverses formes. Une communication du gouvernement au conseil des ministres du 27 avril 2010 souligne l'importance des métaux stratégiques pour la France, le besoin d'amélioration des connaissances scientifiques à terre et en mer et la nécessité des développements technologiques associés.

# 1 // ENJEUX ET CADRAGE DE L'ÉTUDE

L'humanité a un besoin vital de découvrir de nouvelles ressources naturelles, en raison de la croissance démographique mondiale et de la forte demande économique des grands pays émergents (Chine, Inde...). Tout comme l'énergie, les ressources minérales sont un élément-clé du développement des économies industrielles. L'envolée du cours des matières premières et des métaux et la nécessité de diversifier les approvisionnements sont à l'origine de la recherche de nouveaux gisements, à terre, mais aussi dans le domaine marin. En effet, l'océan couvre 71 % de la surface de la terre (60 % au-delà de - 2 000 m), mais cet immense domaine est encore peu connu. Ses richesses pourraient devenir vitales pour les besoins mondiaux en énergie et matières premières. De plus, depuis quelques années, les tensions d'approvisionnement se portent non plus uniquement sur les métaux de base (cuivre, zinc, plomb...) mais également vers les métaux rares (terres rares, indium, platinoïdes, gallium...), parfois qualifiés de critiques ou stratégiques du fait de leur utilisation croissante dans les nouvelles technologies (électronique, militaire, énergies propres...).

Les explorations scientifiques menées dans les grands fonds depuis une trentaine d'années ont permis d'identifier plusieurs processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration des métaux (nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères et sulfures hydrothermaux) et à la genèse de ressources énergétiques potentielles originales (hydrates de méthane, hydrogène). Ces découvertes ouvrent de nouvelles frontières pour la recherche et l'identification de ressources minérales et énergétiques dans les océans. De plus, ces ressources potentielles sont liées à des processus actifs sous-marins, qui n'ont pas d'équivalent en domaine aérien sur la croûte continentale.

Depuis quelques années, l'industrie minière s'intéresse aux minéralisations hydrothermales sous-marines. Des permis d'exploration ont été déposés sur de nombreux champs hydrothermaux dans l'ouest du Pacifique par les sociétés Nautilus Minerals (230 000 km<sup>2</sup>) et Neptune Minerals (264 000 km<sup>2</sup>). Nautilus prépare l'exploitation de dépôts hydrothermaux en Papouasie, ce qui constituera la première exploitation de ressources minérales par 1 800 m de profondeur. La société française d'ingénierie pétrolière Technip est au premier rang auprès de Nautilus et de Neptune pour réaliser les équipements nécessaires à l'exploitation des minerais sulfurés par grande profondeur.

Ces évolutions récentes ouvrent des questions d'ordre géopolitique. L'accès aux matières premières minérales engendre une concurrence internationale de plus en plus visible. Quelle est, ou sera, la stratégie de la France et de l'Europe pour se positionner dans ce domaine, assurer la sécurité de ses approvisionnements et développer les technologies spécifiques ? Quelles coopérations privilégier pour être bien placé dans vingt ans ? Comment se positionne l'industrie européenne sur ce sujet ? Un engagement particulier de la France sera nécessaire pour conduire, au-delà de l'effort de cartographie actuel, des investigations permettant de localiser et d'inventorier les ressources minérales et énergétiques potentielles de l'extension du territoire national que constitue notre ZEE (zone économique exclusive), la deuxième du monde en terme de superficie. Enfin, l'évaluation de la richesse de ces dépôts, en vue de leur éventuelle exploitation, nécessitera des études environnementales associant géologues, chimistes et biologistes.

Devant l'évolution rapide de la demande en matières premières minérales et l'intérêt croissant de l'industrie, l'ISA a voté en 2010 un texte légiférant sur l'exploration des sulfures dans les eaux internationales. La Chine a immédiatement déposé une demande de permis pour rechercher des minéralisations hydrothermales dans l'océan Indien. Le risque existe d'une restriction de l'accès à certaines zones pour les recherches scientifiques. Un positionnement de la France est d'autant plus justifié que ce pays possède une expertise de trente ans dans ce domaine.

Au plan international, la Russie soutient un important programme d'exploration et d'inventaire des ressources minérales hydrothermales le long de la dorsale atlantique où elle vient de déposer une demande de permis auprès de l'ISA. Le Japon, les États-Unis et l'Allemagne prennent en compte les métaux dans leurs priorités à moyen terme. Enfin, la Chine, l'Inde et la Corée du Sud lancent d'ambitieux programmes d'exploration centrés sur l'accès aux ressources des grands fonds. Toutes ces démarches relèvent de stratégies sur le long terme comportant, dans l'ordre :

- ▶ une volonté politique forte,
- ▶ le développement de compétences technologiques,
- ▶ un accès à la connaissance scientifique et aux ressources des grands fonds comme facteur d'indépendance économique.

## Évolution du contexte de la société

Comme le pétrole, les ressources minérales sont généralement « non-renouvelables » ; leur formation est plus lente que le rythme de consommation. Il s'agit donc d'une ressource limitée qui peut s'épuiser et dont l'impact sur l'environnement peut devenir critique. Les réserves connues pour de nombreux métaux seraient épuisées entre dix et cinquante ans, si l'on se base sur le rythme de consommation actuelle.

La vision à court terme sur la disponibilité des minerais à la surface de la terre se positionne généralement par rapport aux besoins des pays développés. Les ressources actuelles ne permettent pas à l'ensemble des habitants de la planète de revendiquer une utilisation de métaux équivalente à la moyenne de la consommation actuelle des pays riches (il en faudrait trois fois plus). Les besoins de pays à fort taux de croissance, tels que la Chine et l'Inde, ne pourront pas être satisfaits par leur seule production intérieure. L'accroissement prévisible de la demande, lié aux évolutions de la population mondiale et du niveau de vie des pays en développement, réduit considérablement la durée estimée pour les réserves de métaux. Le problème devient aigu si l'on se projette à trente ans. Il devient donc justifié de fournir un effort d'exploration pour identifier de nouvelles réserves.

Le besoin d'une élévation continue du niveau de vie de nombreux grands pays implique un taux de croissance de 7 à 9 % pendant plusieurs décennies et l'entretien d'une croissance voisine de 3 % dans les pays riches. Cette croissance nécessite une augmentation de la consommation d'énergie et des ressources minérales. Ceci conduit à de sérieux problèmes sur la disponibilité des ressources, dont les limites sont mieux évaluées, ainsi que sur une gestion d'un développement durable de la planète.

Les pays développés sont de plus en plus dépendants des apports extérieurs pour l'énergie et les ressources minérales. Ils représentent 20 % de la population mondiale, mais consomment 80 % des ressources. Les consommations par habitant sont ainsi quinze à vingt fois supérieures à celles des pays pauvres. Si les ressources devaient être partagées équitablement entre tous les pays de la planète, les pays développés recevraient moins du quart de leur consommation actuelle. Cette situation n'est pas un facteur d'équilibre. Par ailleurs, des pays comme l'Inde et la Chine vont peser de plus en plus fortement sur l'accès aux ressources. Par exemple, la Chine est passée d'une consommation de 0,66 kg de zinc par an et par habitant en 1996 à une consommation de 1,07 kg en 2000, puis 3 kg en 2010. Le problème des approvisionnements ne peut donc être évité sur le moyen terme. Il avait été soulevé dès 1972 dans les conclusions du rapport du Club de Rome ; même si l'amplitude des courbes s'est modifiée, la tendance présentée pour les trente prochaines années demeure.

L'Europe dépend de plus en plus d'approvisionnements extérieurs pour ses métaux. Une telle situation présente des risques importants de pénurie en cas de tension sur les marchés. Au cours des cinq dernières années, les cours de plusieurs métaux ont augmentés de plus de 300 % (fig. 1). Après une chute de courte durée lors de la crise de 2008, les cours montent de nouveau continûment.

En raison de l'épuisement des ressources, des minerais de plus en plus pauvres sont exploités à des profondeurs de plus en plus grandes. Cependant, les limites de concentrations des minerais ne peuvent être abaissées en dessous d'un certain seuil en raison de l'augmentation des besoins énergétiques nécessaires à leur extraction et d'un impact environnemental plus fort. L'approvisionnement en métaux,

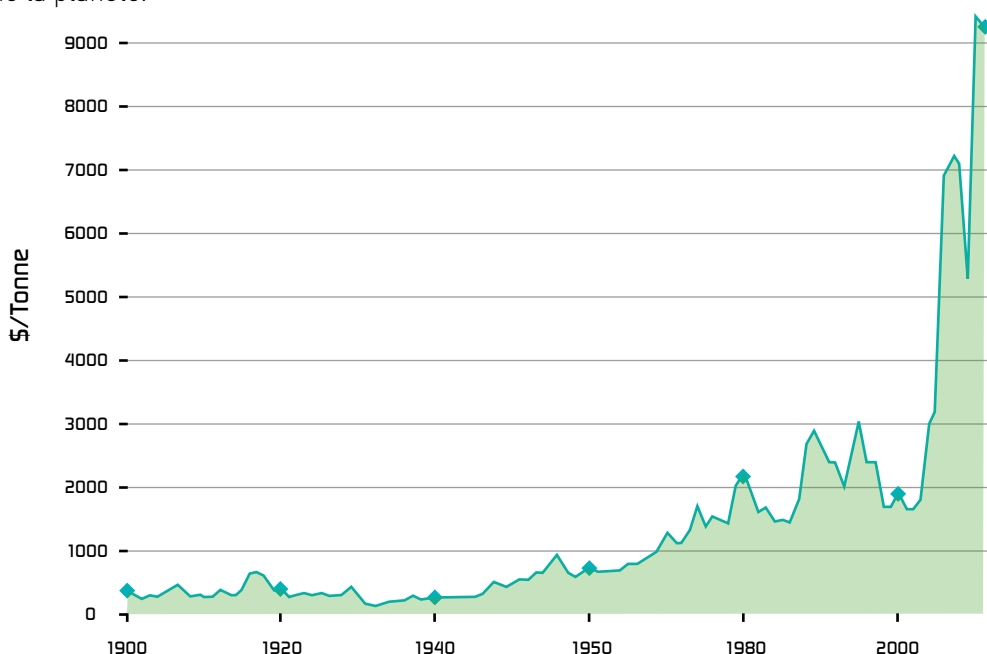


Figure 1 : Exemple d'évolution des cours du cuivre au cours du XX<sup>e</sup> siècle (source USGS).

durant les prochaines décennies, passe donc par l'apport d'une composante durable (recyclage) dans le cycle d'utilisation des métaux ainsi que par la découverte de nouveaux gisements exploitables dans des domaines encore peu explorés à ce jour. Le vaste domaine océanique dans lequel les explorations scientifiques ont mis en évidence des ressources minérales constitue donc un potentiel à étudier.

### Enjeux du domaine océanique

Dans les trente ans qui viennent, l'humanité s'appropriera de plus en plus les grands fonds, du point de vue scientifique, économique, écologique et éducatif. Une stratégie sur le long terme devient urgente ; elle se place sur le plan de la géopolitique et des enjeux économiques mondiaux. Il s'agit, pour la France comme pour l'Europe, d'engager des politiques de long terme afin de ne pas se laisser distancer au plan scientifique comme au plan économique. L'Europe doit définir sa stratégie de coopération avec les autres grands pôles mondiaux afin de conserver son rayonnement scientifique et d'éducation, de tirer des bénéfices technologiques, économiques et écologiques, et d'assurer son indépendance.

Grâce aux efforts de recherche soutenus durant les trente dernières années, et de la disponibilité de moyens d'investigation et de prélèvements de plus en plus performants, la France a acquis une expertise reconnue et est bien positionnée pour déterminer les processus géologiques conduisant à l'accumulation des minéralisations les plus intéressantes dans les océans.

Au-delà de l'exploitation au sens strict, les enjeux autour des ressources minérales des grands fonds sont multiples :

- ▶ **Enjeux scientifiques** : la connaissance des fonds marins fondée sur l'exploration scientifique est indispensable pour trouver les zones de minerais les plus riches et comprendre les processus de transfert et de concentration des métaux. Cette exploration permet aussi de déterminer la biodiversité et comprendre le fonctionnement des écosystèmes.
- ▶ **Enjeux géopolitiques et économiques** pour l'accès, dans les décennies à venir, aux matières premières minérales (métaux de base et métaux rares) à l'échelle mondiale. Ceci est à replacer dans un contexte de concurrence, à terre et en mer, avec les pays à forte croissance. De nombreux enjeux apparaissent dans la valorisation de la ZEE française et de l'extension du plateau continental *via* le programme Extraplac, comme le souligne le rapport de 2010 du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche sur la stratégie outre-mer (StratOM).

▶ **Enjeux technologiques** : comme il s'agit d'une nouvelle industrie, les pays et les sociétés industrielles qui sauront anticiper et maîtriser les technologies d'exploration, d'extraction et de remontée des minerais pourront tirer des bénéfices de leur savoir faire au niveau international. C'est le positionnement que prend, en France, la société Technip en définissant une stratégie long terme sur ce sujet.

▶ **Enjeux environnementaux** : partant du constat que les mines terrestres sont très dispersées sur la surface terrestre, l'exploration des grands fonds pour rechercher des ressources apportera des connaissances sur de vastes domaines qui ne seront jamais exploités au plan minier. Cette exploration devrait ainsi dynamiser la connaissance de la biodiversité et permettre de définir des zones à protéger, sous forme de zones de référence ou d'aires marines protégées (AMP), afin de garantir le juste équilibre entre préservation et exploitation. Les données acquises seront également fondamentales pour les études d'impact des exploitations.

▶ **Enjeux juridiques** : l'Autorité Internationale des fonds marins (AIFM, ou ISA en anglais), qui dépend de l'ONU, a mis en place une législation et gère les permis attribués sur la zone à nodules dans le Pacifique nord. Les textes juridiques concernant les sulfures polymétalliques ont été validés en mai 2010. Le texte sur les encroûtements est en préparation. Les discussions pourraient aboutir à une législation imposant que les recherches scientifiques n'auraient accès qu'à certaines zones limitées. Un positionnement de la France sur ce sujet est nécessaire pour préserver l'avance de ce pays dans la connaissance des ressources minérales et de la biodiversité des grands fonds.

### Cadrage de l'étude

Dans ce contexte général, la question centrale de l'étude est celle de l'évaluation du potentiel des principales ressources minérales marines profondes (minerais métalliques et hydrogène naturel) présentant un enjeu stratégique pour la France et l'Union européenne à l'horizon 2030.

Cette étude vise à répondre à trois questions majeures concernant ces ressources en 2030 :

1. **Quelles sont les connaissances scientifiques et technologiques** requises pour permettre leur découverte et leur exploitation ?
2. **Quelles sont les conditions socio-économiques** susceptibles de rendre compétitive leur exploitation ?
3. **Quels seraient les impacts prévisibles** de leur exploitation sur l'environnement ?



Lors de la première réunion du comité de pilotage, le 30 septembre 2009, au siège de l'Ifremer, les vingt-quatre organismes représentés, entreprises, ministères, universités, instituts de recherche spécialisés, ont décidé des caractéristiques de l'étude.

Celles-ci peuvent être résumées comme suit :

**Horizon temporel** : 2030

**Champ d'étude** : Le monde, avec une attention particulière pour la France dans l'Europe

**Technologies** : Toutes technologies liées à la mer, hors énergies fossiles

**Méthode** : Méthodes tendances - impacts et scénarios

**Délai** : un an

## 2 // MÉTHODOLOGIE

Au plan méthodologique, cette analyse s'est appuyée sur la représentation du système étudié (environnement global, état de l'art des connaissances scientifiques, filières, enjeux pour les acteurs) avant d'explorer les évolutions possibles des variables majeures, puis les conditions d'émergence de la valorisation de ces ressources. Il a été ainsi possible de dégager les dynamiques afférentes des grandes filières et d'en tirer les conséquences pour des propositions d'actions dont un programme de recherche et développement national.

Ce travail a mobilisé une trentaine d'experts sur une période de dix mois, dont la moitié au sein d'un groupe de travail stable. La méthodologie a été assurée par le cabinet Gerpa, spécialisé dans le domaine industriel. La méthode consiste à croiser les évolutions de dix-sept variables jusqu'en 2030 selon trois macro-scénarios contrastés dont les déterminants principaux sont les suivants : marchés, échanges internationaux, statut juridique des eaux internationales, intérêts nationaux et/ou multinationaux et sécurité d'approvisionnement en minerais critiques, impacts sur l'environnement profond, jeu des acteurs et perception sociétale.

Les dix réunions de travail comme les trois comités de pilotage ont été planifiés sur dix mois, ce qui a facilité la continuité des efforts et le suivi des travaux. Ces réunions se sont tenues entre le 30 septembre 2009 (premier comité de pilotage) et le 7 juillet 2010 (dernier comité). Le groupe de travail a aussi audité 14 experts pour améliorer ses connaissances sur les sujets étudiés.

F. Bourse (Gerpa) a proposé une méthode de travail en cinq étapes :

- ▶ définir le sujet, l'horizon temporel et les objectifs
- ▶ identifier les variables clefs et leurs relations
- ▶ explorer les évolutions possibles des variables clefs (jeux d'hypothèses)
- ▶ construire les scénarios exploratoires du contexte et du secteur (scénarios)
- ▶ identifier les enjeux selon les scénarios et explorer les conséquences en termes de recherche et de développement pour les technologies et en termes d'actions pour les partenaires concernés.

Dans la phase finale, le groupe a restructuré les résultats et leur présentation de manière à faciliter l'utilisation opérationnelle.

La phase de cadrage a sélectionné quatre types de sites et leurs ressources associées (fig. 2) :

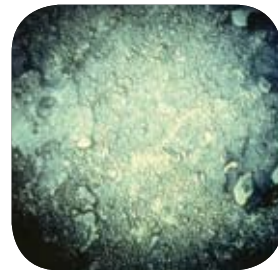
- ▶ les encroûtements riches en cobalt et platine
- ▶ les sulfures hydrothermaux
- ▶ les nodules polymétalliques
- ▶ les sites de production d'hydrogène naturel

Le groupe a mené une étude élargie du potentiel d'exploitation de ces sites en prenant en compte quatre types d'intérêt : scientifique, économique, stratégique (sécurité des approvisionnements) et patrimonial (ressources de long terme).

### Nodules



### Encroûtements



### Sulfures hydrothermaux

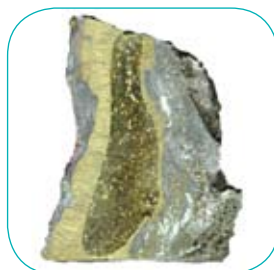


Figure 2 : Types de minéralisations dans les grands fonds.

# 3 // ENJEUX TRANSVERSAUX PAR TYPE DE MÉTAL

Les principaux métaux susceptibles d'être extraits des fonds marins se répartissent ainsi :

- ▶ **TYPE A** : métaux de base en tension économique probable : zinc, cuivre, manganèse, cobalt, nickel, plomb, baryum, argent et métaux précieux à forte valeur patrimoniale : or, argent.
- ▶ **TYPE B** : quelques métaux critiques à potentiel technologique élevé et risques d'approvisionnement majeurs : indium, germanium, cadmium, antimoine, mercure (liés au zinc) et sélénium, molybdène, bismuth (liés au cuivre) sur les

sites à sulfures hydrothermaux, Terres rares dans les encroûtements et les nodules.

- ▶ **platine et platinoïdes** sur les sites à encroûtements, avec des incertitudes sur les risques de substitution dans les usages car on compte encore 200 ans de consommation possible par les moyens d'approvisionnement actuels.
- ▶ **autre ressource : hydrogène naturel** dans les fluides hydrothermaux des cheminées sulfurées des sites hydrothermaux associés aux roches du manteau.

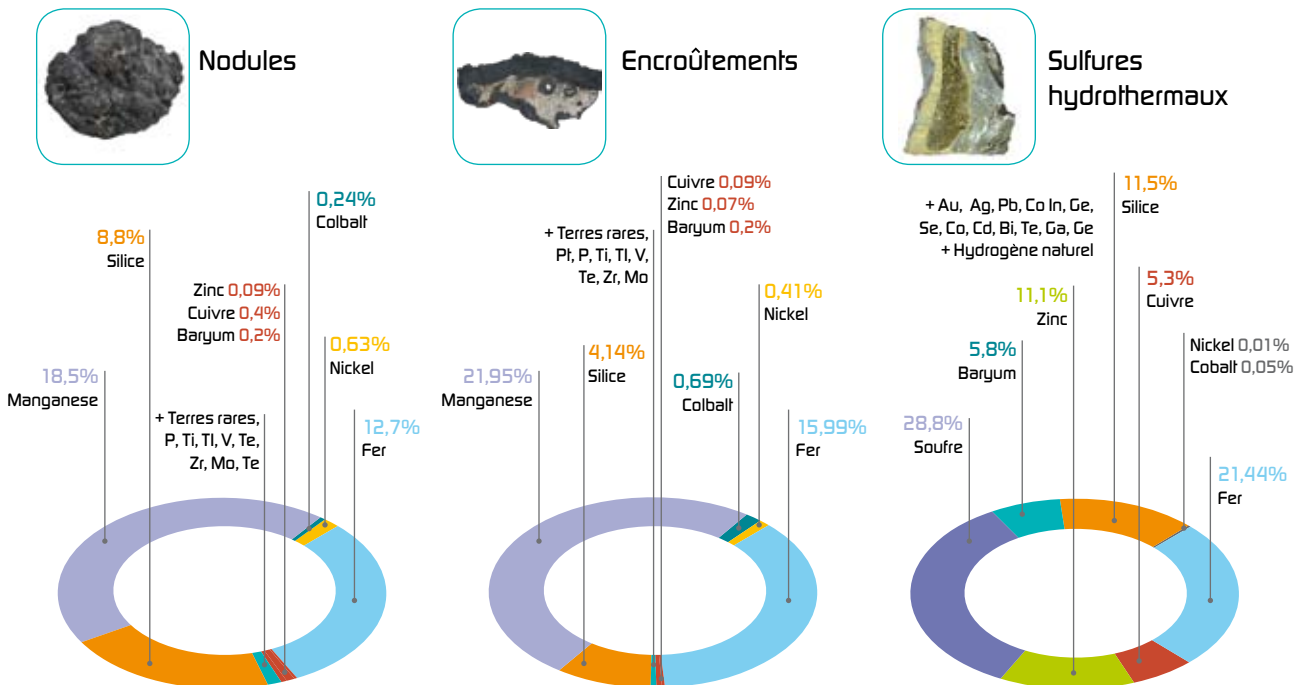


Figure 3 : Concentrations (% en poids) en éléments majeurs dans les minéralisations des grands fonds océaniques (source Ifremer).

## Sulfures hydrothermaux : certitudes relatives et incertitudes

### Connaissances

L'activité hydrothermale sous-marine est une conséquence du mouvement des plaques tectoniques terrestres et de l'activité volcanique. Ces processus génèrent la croûte océanique au niveau des zones d'écartement des plaques qui constituent les 60 000 km de dorsales océaniques. La présence de chaleur et de failles favorise la circulation des fluides dans la croûte océanique. Cette activité hydrothermale est un important mécanisme de concentration des métaux qui s'accumulent sous forme d'amas de sulfures

massifs (fig. 3, 12 et 13). Les dépôts de sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. On les trouve sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique.

Selon leur localisation, ils présentent une grande diversité dans les caractéristiques physiques et géologiques et dans les types de métaux valorisables. Ces différences sont contrôlées par des processus physiques (température, profondeur...) et surtout par la nature des roches traversées par les circulations hydrothermales (roches volcaniques variées, roches du manteau, sédiments). Ce type de minerais est bien connu dans les gisements fossiles exploités à terre et formés anciennement

sous la mer. Une partie importante du cuivre, du zinc, de l'argent et l'or exploités sur les continents est produite à partir de ce type de gisements dont certains concentrent également le plomb, le cobalt et le baryum.

Les premières minéralisations hydrothermales associées à des saumures chaudes (70°C) ont été observées en 1962 en mer Rouge. Les premiers fumeurs noirs (350°C) ont été découverts sur la dorsale du Pacifique Est en 1978 à près de 3 000 m de profondeur. Après trente ans d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux (fig. 4) démontre l'importance des processus d'extraction, de transport et de concentration des métaux associés au volcanisme sous marin. Des minéralisations sulfurées sont maintenant connues à des profondeurs comprises entre 800 m et 4 100 m. Des champs hydrothermaux ont été localisés dans les principaux contextes géodynamiques (dorsales lentes et rapides, bassins arrière-arc, arcs insulaires) et sur des substratums variés (basaltes, andésites, dacites, sédiments, roches ultrabasiques du manteau).

Les sulfures hydrothermaux se caractérisent par de forts enrichissements en métaux de base par rapport aux encroûtements et aux nodules. Les minéralisations hydrothermales sous-marines ont été étudiées par submersible et dragage. Ces deux techniques permettent d'échantillonner principalement la surface. Les zonations chimiques et minérales selon la verticale doivent être étudiées par forage. Les échantillons montrent que la surface de la plupart des dépôts est significativement enrichie en cuivre et zinc dont le total dépasse 10 % dans plus de 65 % des sites (valeurs basées sur l'étude de 75 sites et de 3 300

échantillons). Ces données de surface laissent à penser que les minéralisations hydrothermales sous-marines pourraient être aussi riches que leurs équivalents terrestres. Mis à part le cas spécifique des sédiments métallifères de la mer Rouge, il s'agit de minerais massifs qui génèrent à priori peu de déchets. Du fait de leur localisation sur le fond, leur exploitation ne nécessiterait pas le creusement de galeries comme c'est le cas à terre. Par ailleurs, les infrastructures sur les navires sont facilement déplaçables. Ces éléments techniques devraient contribuer à minimiser les coûts et réduire l'impact environnemental des exploitations.

Outre le cuivre et le zinc, la plupart des sites sont enrichis en argent et souvent en or. Certains sites spécifiques de l'Atlantique associés à des roches du manteau présentent des teneurs intéressantes en cobalt. Plusieurs éléments rares accompagnent les métaux principaux. Au cuivre, qui caractérise les minéralisations formées au dessus de 300°C, peuvent être associés des enrichissements en sélénium, cobalt, nickel, molybdène, tellure, bismuth et or. Le zinc, lié aux minéralisations formées entre 100°C et 250°C, s'accompagne d'enrichissements en cadmium, plomb, arsenic, antimoine, germanium, indium, baryum (fig. 3 et 5).

Si les conditions de formation des sites sont assez connues, l'inventaire reste très incomplet (plusieurs centaines de sites pressentis). Les technologies d'exploration permettent uniquement de localiser les sites actifs, à la différence des sites inactifs qui restent à rechercher de manière plus systématique et ne peuvent, dans l'état actuel des technologies, être localisés que par des opérations près du fond.

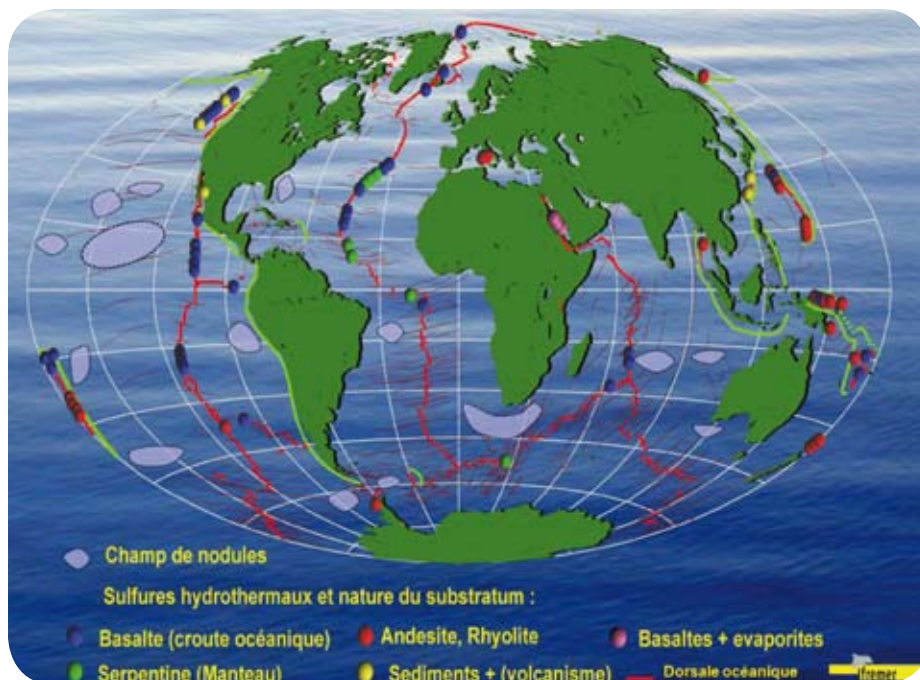


Figure 4 : Localisation des sites hydrothermaux et des champs de nodules à l'échelle mondiale (source Ifremer).

Dans les gisements étudiés, on note les caractéristiques suivantes :

- ▶ variabilité de composition et concentration minérales. Nombreux métaux liés (ex : Zn/Ge) et hydrogène natif ; connaissances à approfondir pour les métaux critiques
- ▶ variabilité de taille et de composition des gisements (formation en grappes) : de 0,5 à 100 Mt
- ▶ richesse biologique majeure sur zones actives, mais connaissance « tête d'épingle ». A approfondir sur zones inactives
- ▶ hydrogène naturel : étude scientifiques pour la quantification et la connaissance des processus géochimiques.

### Éléments sur l'exploitation potentielle

La valeur brute du minerai des amas sulfurés sous-marins est encore mal connue, faute de cas de référence suffisamment étudiés pour qu'une première idée de la valeur moyenne de la ressource puisse être établie. Sur la base des cours des métaux au 18 octobre 2010, la valeur moyenne des ressources connues du gisement de Solwara I s'établit à 834 \$ US/tonne et celle du gisement d'Atlantis II en mer Rouge s'établit à 122 \$ US/tonne. Il est possible que des gisements avec des valeurs plus élevées puissent être identifiés ultérieurement.

Les technologies d'exploitation sont connues par segment. Les procédés d'extraction sont en cours de développement / validation. Stockage, logistique et traitements du minerai sont en cours d'étude. Le projet Nautilus en cours (ZEE de Papouasie) sera riche d'enseignements. Le leadership technologique mondial dans ce domaine est français : Technip (projet pilote). Le coût d'extraction paraît globalement comparable aux coûts d'extraction de mines souterraines (90 \$ US/tonne) avec un temps de développement prévisible de deux à cinq ans.

Depuis plusieurs années, les différents acteurs se sont mobilisés au travers d'actions multiformes :

- ▶ publications des communautés scientifiques actives
- ▶ mobilisation des ONG sur la protection des sites
- ▶ montée en puissance d'acteurs économiques (Nautilus, Neptune)
- ▶ apparition d'acteurs technologiques (Technip)
- ▶ émergence de critères politiques (quatre métaux critiques sur les quatorze identifiés par la CE)
- ▶ enrichissement du champ juridique (ouverture des permis en eaux internationales et gestion des ZEE).

Les pays les plus actifs en exploration sur les ressources minérales dans les eaux internationales sont : Chine, Corée, Russie, Inde. Le cadre juridique est la réglementation ISA approuvée en mai 2010. Des demandes de permis ont été déposées par la Chine (mai 2010) et par la Russie (décembre 2010).

### Encroûtements cobalt et platine : certitudes relatives et incertitudes

#### Connaissances

Des encroûtements d'oxydes ferro-manganésifères ont été répertoriés dans tous les océans dans des environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant des millions d'années. En général, ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Ils varient de quelques centimètres à 25 centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs km<sup>2</sup>. Ils se déposent généralement sur des substratums indurés (volcans, anciens atolls immergés) à des profondeurs allant de 400 à 4 000 m. Les estimations

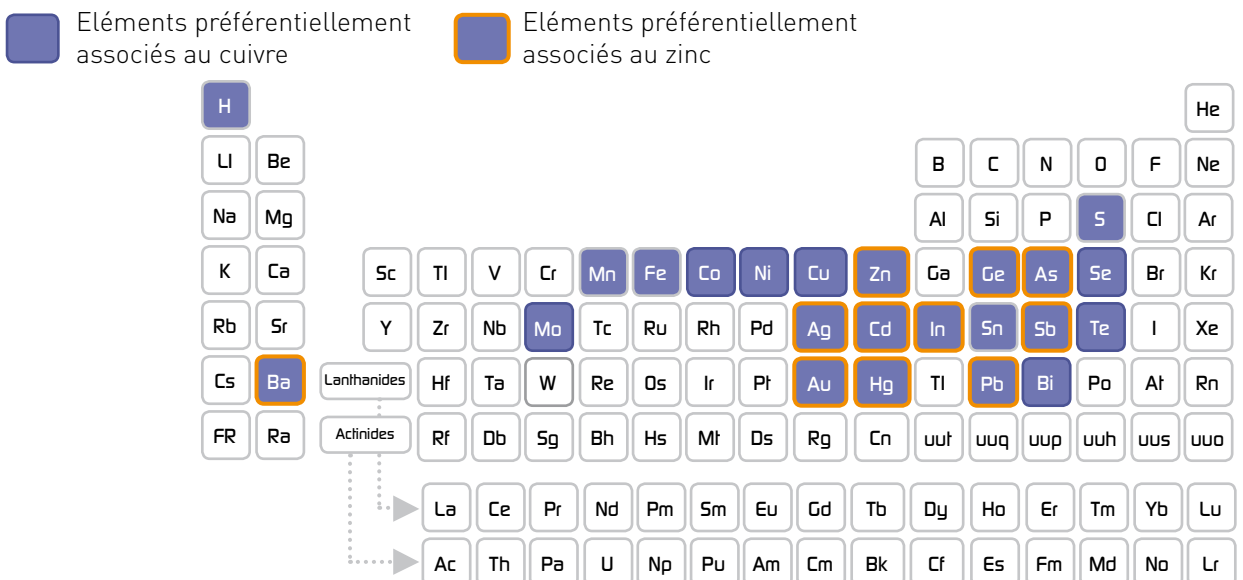


Figure 5 : Métaux enrichis dans les minéralisations sulfurées hydrothermales. Les affinités des éléments mineurs avec le cuivre ou le zinc sont précisées.

donnent une surface totale d'encroûtements d'environ 6,35 millions de km<sup>2</sup>, soit 1,7 % de la surface des océans.

Les premières investigations systématiques ont démarré en 1981 dans l'océan Pacifique central. De nombreux pays se sont intéressés depuis vingt ans à ces ressources potentielles : Japon, USA, Russie, Allemagne, France, Corée, Royaume-Uni, Brésil, Chine. Peu de volcans immergés (sur un total estimé à 50 000) ont été étudiés dans cet océan. Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont enrichis en cobalt et en platine. Ils sont tous situés dans le Pacifique et notamment dans la ZEE de la Polynésie française. Ces derniers apparaissent sur les bords externes des plateaux sous marins (ex. aux Tuamotu) et sur les volcans, à des profondeurs comprises entre 800 et 2 500 m.

Comme les nodules, les encroûtements sont surtout constitués d'oxydes de fer et de manganèse. Ils sont en moyenne trois fois plus riches en cobalt et souvent fortement concentrés en platine (fig. 3 et 6). Les concentrations les plus élevées (maximum 1,8 % de cobalt et 3,5 g/t de platine) sont situées en Polynésie, entre 1 500 et 2 000 m de profondeur. La valeur « métal contenu » est deux à trois fois supérieure à celle des latérites exploitées à terre où la teneur n'excède pas 0,4 %. Ces encroûtements pourraient constituer le premier minerai de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations. Sur certains sites, la platine pourrait s'avérer un intéressant sous-produit. Plusieurs éléments mineurs tels que terres rares (yttrium, lanthane, cérium), titane, thallium, zirconium, tellure et molybdène peuvent être trouvés à des concentrations intéressantes. Terres rares, platine et cobalt tendent à être plus concentrés dans les encroûtements que dans les nodules (rapport de 1 à 10 pour les terres rares).

La connaissance partielle du mode de concentration et de la localisation des zones les plus riches

en éléments rares justifie de progresser dans la connaissance des paramètres géologiques et chimiques qui conditionnent la formation des accumulations les plus riches.

Au plan scientifique, des efforts demeurent nécessaires pour mieux comprendre les règles de répartition, la variabilité des épaisseurs et de composition et les processus de formation. Au plan économique, beaucoup reste à faire pour évaluer les dépôts, déterminer les zones les plus riches et les plus favorables à une exploitation : terrains plats et réguliers pour ramasser sans excès de dilution. De telles zones riches en cobalt sont connues dans les Tuamotu où des croûtes forment un tapis plat et continu sur des formations sédimentaires indurées.

La localisation des sites et la richesse intrinsèque minérale sont connues à grandes mailles. La cartographie fine reste à faire, comme l'inventaire, même sommaire, de la biodiversité spécifique à ce type de formation.

### Éléments sur l'exploitation potentielle

La valeur brute du minerai est assez élevée (platine et cobalt) soit de 500 à 1300 \$/t (2010).

Les technologies d'exploitation et les coûts associés sont encore incertains pour plusieurs raisons : pas de démonstrateur, variabilité de l'épaisseur des encroûtements (de 2 cm à 20 cm), méconnaissance des fonds, difficultés d'extraction, d'où un temps de développement projeté sur dix à vingt ans.

### Jeu des acteurs

Le jeu des acteurs concerne les espaces situés plutôt en ZEE avec un investissement scientifique des pays suivants : Japon, USA, Corée, France, Chine, Brésil (eaux internationales). Il n'y a pas d'industrie et peu de publications. Le cadre juridique actuel est à l'échelle nationale. Pour les eaux internationales, il est en voie de définition par l'ISA.

 Éléments préférentiellement enrichis dans les encroûtements

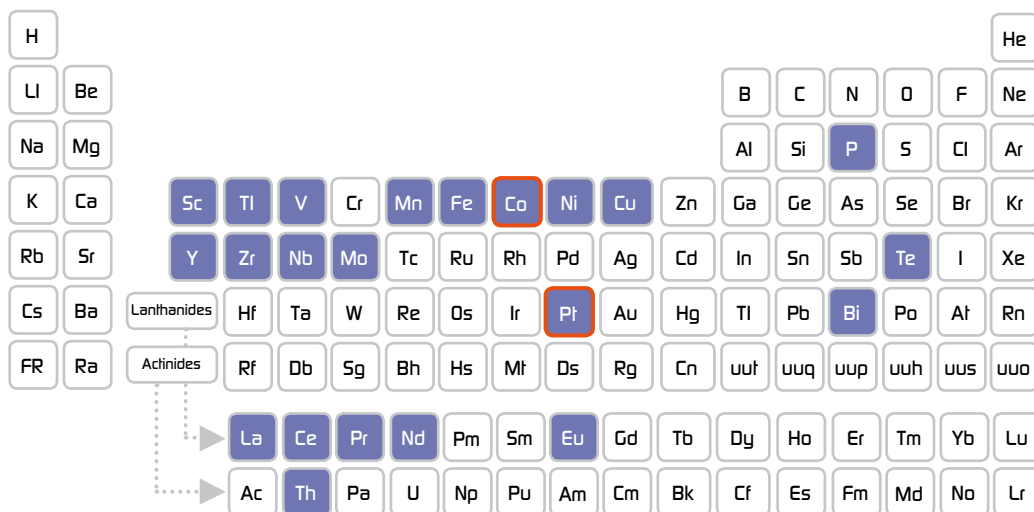


Figure 6 : Éléments enrichis dans les nodules et dans les encroûtements hydrogénétiques.

## Nodules : certitudes relatives et incertitudes

### Connaissances

Des nodules polymétalliques sont connus dans tous les océans, sous toutes les latitudes, à partir de fonds de 4 000 m et dans des zones caractérisées par un faible taux de sédimentation et des boues à radiolaires. Il s'agit en particulier de zones permettant la dissolution des carbonates en raison d'une plus grande acidité des eaux de fond du fait de la plus grande solubilité du CO<sub>2</sub> avec la pression. L'abondance sur le fond et la richesse en métaux varient beaucoup. Dès 1973, des champs à forte densité de nodules ont été trouvés le long d'une ceinture Est-Ouest dans le Pacifique nord (zone dite « Clarion-Clipperton »). Les nodules forment des boules sombres de 5 à 10 cm de diamètre contenant environ 40 % d'eau. Ils sont surtout composés d'hydroxydes de manganèse et de fer. Les couches les mieux cristallisées sont les plus riches en nickel et en cuivre qui ne forment pas de minéraux spécifiques mais sont incorporés dans les réseaux cristallins des oxydes de manganèse et de fer.

Les métaux de base contenus dans les nodules (fig. 3) sont le fer (7 à 23 %), le manganèse (7 à 26 %), le cuivre (290 à 10 200 ppm), le nickel (2 600 à 12 800 ppm), et le cobalt (2 400 à 8 000 ppm). La zone Clarion-Clipperton présentant des teneurs intéressantes en cuivre (0,82 %), nickel (1,28 %) et manganèse (25,40 %), elle fait l'objet de nombreux permis miniers. Ce sont ces métaux qui ont été considérés dans les estimations économiques. Le cuivre est en moyenne à des concentrations doubles de celles de grandes mines andines (0,5 %). Les nodules peuvent être enrichis en éléments rares comme le cérium (0,1 %). D'autres éléments tels que molybdène, tellure, vanadium, zirconium et thallium peuvent être concentrés à plusieurs centaines de grammes par tonne. Les nodules peuvent ainsi être considérés comme des réserves stratégiques pour des métaux de base et pour certains métaux rares. Plusieurs pays, dont les États-Unis et l'Allemagne, ont entrepris de reprendre les analyses de leurs collections de nodules à l'aide de moyens analytiques modernes afin de préciser les variabilités de compositions en éléments mineurs et en particulier en terres rares.

Des estimations récentes sur la zone Clarion-Clipperton montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km<sup>2</sup> (soit 15 % des fonds du Pacifique situés entre 4 000 et 5 000 m de profondeur) le poids des nodules est de 34 milliards de tonnes, soit 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt. Les nodules contiennent aussi certains métaux en traces qui suscitent actuellement un intérêt croissant.

Leur intérêt minier a été souligné dès les années 1950 du fait de teneurs en nickel égales ou supérieures à celles des gisements de latérites, de teneurs en cuivre supérieures à celles des grands gisements de porphyres cuprifères terrestres (0,5 % de cuivre) et de teneurs en cobalt similaires à celles des gisements terrestres. La valeur « métal contenu » (cuivre + nickel + cobalt = 2,4 % ; cf. fig. 3) des nodules est équivalente à celle des gisements terrestres. La prise de conscience de l'importance économique potentielle des nodules conduisit le président Johnson en 1966 à demander que les grands fonds soient déclarés « patrimoine commun de l'humanité ». Cette résolution fut reprise en 1970 par l'assemblée générale des Nations Unies.

En tant que ressources en cuivre, les nodules représentent environ 10 % des réserves continentales et ont fait l'objet de nombreuses investigations dans les années 1970 et 1980. Ces investigations n'ont pas abouti à leur exploitation pour diverses raisons : profondeur d'eau supérieure à 4 000 m, mauvaise estimation de la ressource, coût élevé des traitements métallurgiques, problèmes politiques liés au droit de la mer et baisse du cours des métaux. L'évaluation précise de leur potentiel implique de réaliser des cartes haute résolution, de comprendre les processus de formation des nodules les plus riches et de connaître la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes associés, afin de minimiser l'impact environnemental. Dans ce but, la France a obtenu deux permis miniers dans le Pacifique nord.

Sites et compositions minérales sont connus pour les métaux de base depuis la fin des années 1980. Les études sur les aspects de biodiversité sont en cours. Il est nécessaire de reprendre les collections pour approfondir la connaissance des concentrations en métaux rares.

### Éléments sur l'exploitation potentielle

La valeur brute du minerai varie des niveaux faible à moyen soit de 200 à 700 \$/t selon les années. Les technologies d'exploitation sont encore incertaines car il n'existe pas de pilote, même s'il n'y a pas de verrou technologique. Mais la profondeur d'extraction est élevée (4 000 m). En conséquence, le temps d'un développement éventuel est projeté sur dix et vingt ans.

### Jeu des acteurs

Le jeu des acteurs tourne autour de l'accès au nickel, notamment pour la Chine, d'où le renouveau récent de l'intérêt scientifique et technologique des nodules ainsi que les débats sur les aspects de protection de l'environnement et de la biodiversité. L'Allemagne et les États-Unis s'intéressent aussi à la connaissance des concentrations en métaux rares.

Le cadre juridique dans les eaux internationales est celui de l'ISA. On compte sept permis d'exploration dans les eaux internationales dont un permis français jusqu'en 2016.

## Hydrogène naturel

L'hydrogène stocké dans les minéraux des roches océaniques joue un rôle très important dans les réactions d'oxydoréduction se produisant lors des interactions de l'eau de mer avec la roche dans la circulation hydrothermale. Cette circulation hydrothermale est possible en milieu fracturé et est provoquée par la source de chaleur magmatique présente en profondeur.

L'hydrogène a un fort potentiel à se combiner avec la plupart des éléments du tableau périodique à haute pression et haute température pouvant former des hydrures métalliques, instables en présence d'eau. Ainsi, grâce à l'hydrogène, un grand nombre d'éléments, de métaux de transition, lanthanides et actinides, d'intérêt métallogénique reconnu (titane, vanadium, chrome, cobalt, molybdène, tungstène, uranium, thorium, or...) peuvent être transportés dans le manteau.

Dans les circulations hydrothermales, l'hydrogène associé au soufre ( $H_2S$ ) interagit avec les métaux extraits de la roche pour précipiter les sulfures métalliques formant les cheminées et minéralisations hydrothermales le long des dorsales médio-océaniques et dans les bassins arrière-arc.

L'hydrogène est aussi généré en grande quantité lors de la serpentinisation des péridotites du manteau

le long des dorsales lentes ou ultra-lentes et dans les zones de subduction. On sait maintenant que la production d'hydrogène et de méthane est étroitement liée aux affleurements de roches ultrabasiques présents sur le plancher océanique et sur les murs des dorsales lentes. De l'hydrogène par voie abiotique est produit à faible température (inférieure à 20°C) par diffusion et dégazage de monts serpentinisés « inactifs » ou à haute température (supérieure à 350°C) au niveau des cheminées hydrothermales « actives ». Depuis 1995, sept sites actifs de haute (supérieur à 350°C) ou moyenne (~90°C) température ont été découverts le long de la dorsale médio-atlantique en domaine mantellique, à des profondeurs variant de 1 700 à 4 100 m, tous producteurs de quantités importantes d'hydrogène. De récents travaux montrent que le phénomène de serpentinisation avec production d'hydrogène et de méthane était aussi présent sur de nombreux segments de la dorsale lente arctique ainsi que sur la dorsale indienne.

Les flux globaux d'hydrogène issus de la serpentinisation océanique sont pour l'instant mal connus. Les estimations actuelles de ces flux varient de 90 à 190 milliards de moles par an. Ces calculs très préliminaires devront être précisés par une exploration continue et approfondie des dorsales lentes apportant les données de « terrain » mais aussi grâce aux expérimentations et travaux en laboratoire qui permettront de mieux comprendre les mécanismes réactionnels et modéliser le processus naturel de production-migration et les processus géochimiques et thermodynamiques mis en jeu à grande échelle.

## 4 // ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Les ressources minérales et énergétiques marines profondes sont localisées dans des zones de l'océan très contrastées.

Sur les rides océaniques ou systèmes actifs des bassins arrière-arcs l'hydrothermalisme actif ou passé est à l'origine de la production de sulfures riches en métaux et d'hydrogène naturel.

Les encroûtements riches en cobalt et autres métaux sont généralement présents sur des monts sous-marins constitués d'anciens volcans, mais ils peuvent aussi être associés à des rides océaniques et des plateaux.

Enfin, c'est dans les plaines abyssales que l'on trouve les nodules polymétalliques. Sur ces zones, des conditions environnementales très variables déterminent le développement des communautés biologiques, elles aussi très diverses.

### La vie exubérante et extraordinaire autour des cheminées hydrothermales

Découverts dans les années 1970, les écosystèmes liés aux expulsions de fluides hydrothermaux sont connus aujourd'hui pour abriter des communautés exubérantes et extraordinaires dans le sens où leur développement est basé non sur la photosynthèse comme la quasi-totalité de la vie sur notre planète, mais sur la chimiosynthèse. Les micro-organismes sont les éléments fondateurs de ces systèmes qui comptent des centaines d'espèces d'invertébrés, souvent de grande taille et pour la plupart nouvelles pour la science. La connaissance de ces milieux et de la vie qui s'y développe est encore bien incomplète. Les avancées scientifiques dans le domaine de la compréhension du fonctionnement de ces écosystèmes, des adaptations des organismes aux fortes contraintes du milieu laissent à penser

que de nombreuses découvertes scientifiques sont encore à venir. C'est pourquoi la préservation de ces systèmes uniques est impérative. En dehors des sites hydrothermaux actifs, très peu de données existent sur la nature et la distribution de la faune associées aux dorsales océaniques et aux systèmes volcaniques arrière-arcs. Néanmoins on peut penser que la complexité de la topographie, son influence sur l'hydrodynamisme ainsi que l'hétérogénéité des substrats durs et meubles permettent la coexistence d'assemblages d'organismes spécifiques très diversifiés, avec une majorité de faune fixée suspensivore sur les substrats rocheux (avec, par exemple, des jardins de coraux solitaires ou d'éponges) et de faune mobile détritivore sur et dans les sédiments meubles.

Dans ces systèmes, l'exploitation des dépôts sulfurés aurait un impact direct sur l'écosystème benthique des dépôts métalliques inactifs (destruction du milieu et du compartiment vivant) ainsi que des impacts indirects liés à la propagation des panaches sédimentaires (modification des caractéristiques physiques et chimiques du milieu pour l'écosystème pélagique) et à leur sédimentation, par les effets mécaniques et chimiques sur les écosystèmes chimio-synthétiques des zones actives et les écosystèmes benthiques adjacents. Cet impact dépendra de la technique développée pour l'exploitation. On peut cependant noter l'existence d'un impact naturel, permanent sur plusieurs dizaines de milliers d'années, et lié à la dispersion d'éléments métalliques dissous et de particules par les panaches naturels des sources actives.

L'exploitation potentielle de l'hydrogène naturel issu des événements hydrothermaux aurait prioritairement des conséquences sur l'écosystème chimio-synthétique ; elle agirait directement sur la source d'énergie à la base de l'écosystème et modifierait chimiquement le milieu. De plus l'élimination ou la restriction du panache hydrothermal pourrait également impacter la dissémination des larves des organismes inféodés à ces systèmes, limitant les flux géniques entre sites à l'échelle régionale. Enfin les contraintes mécaniques des structures d'exploitation sur ces milieux fragiles sont inconnues.

## Particularités des monts sous-marins

Les connaissances sur les communautés biologiques associées aux encroûtements riches en cobalt sont rares. Cependant des études récentes ont montré que ces communautés sont comparables à celles des autres substrats rocheux des monts sous-marins, milieux privilégiés abritant ces ressources. Ces structures sont en général de grande taille, avec des flancs très pentus ; leur topographie peut être complexe du fait de la présence de terrasses, canyons, calderas ou cratères ; substrats durs ou meubles coexistent avec différentes

épaisseurs et compositions. Cette complexité, ainsi qu'un fort hydrodynamisme et un gradient bathymétrique élevé contribuent à structurer les communautés des monts sous-marins, connues aujourd'hui pour abriter une diversité biologique et une biomasse élevées, composées aussi de poissons qui sont déjà la cible d'une intense activité de pêche. Le taux d'endémisme des espèces ou la connectivité entre populations sont liés à divers facteurs biotiques et abiotiques, parmi lesquels les plus importants sont la distance entre monts, l'hydrodynamisme et les capacités de dispersion larvaire. On peut penser que les conséquences directes et indirectes de l'exploitation des ressources dans ces milieux seraient comparables à celles de l'exploitation des dépôts sulfurés évoqués ci-dessus.

## Diversité de la faune sédimentaire des plaines abyssales

Les plaines abyssales propices à la formation des nodules polymétalliques sont dans des zones océaniques caractérisées par un taux de sédimentation très faible et des conditions oligotrophes pour les communautés profondes. Ces grandes étendues présentent généralement des pentes faibles ; elles peuvent être entrecoupées par des collines ou des monts sous-marins aux pentes plus marquées, formés de substrats rocheux. Les plus vastes et riches champs de nodules se situent dans le Pacifique nord-oriental, entre les zones de fracture de Clarion et Clipperton à une profondeur moyenne de l'ordre de 5 000 m.

La richesse biologique des milieux sédimentaires de cette zone est essentiellement constituée d'organismes invertébrés de petite taille (de quelques dizaines de microns à quelques millimètres) et de microorganismes. Ces communautés sont concentrées dans les premiers centimètres de sédiment ; leur densité et leur diversité locale sont élevées. Les organismes de grande taille sont rares dans ce milieu oligotrophe. La structure de ces communautés varie à l'échelle de la zone, sous l'influence de l'hétérogénéité de l'habitat, générée par divers facteurs dont les gradients de production primaire (Est-Ouest et Nord-Sud), la topographie ou la présence/absence de nodules sur le fond.

L'exploitation des nodules polymétalliques aurait des conséquences directes (destruction de l'habitat sur la zone exploitée) et indirectes (re-déposition du panache de sédiments sur une zone plus large) sur les écosystèmes de la zone. L'ampleur de l'impact serait par ailleurs aggravée par la vulnérabilité des peuplements benthiques abyssaux aux perturbations, en raison de la rareté de la majorité des espèces et des faibles taux d'activité biologique liés aux conditions d'oligotrophie du milieu. Les processus de recolonisation, de restauration des peuplements pourraient donc s'étendre sur des années voire des décennies.

<sup>1</sup> Oligotrophe : pauvre en apports nutritifs



## Conséquences de l'exploitation pour l'environnement ?

De manière générale, les activités minières en milieu profond auraient différents niveaux d'impact sur l'environnement et sur la biodiversité, dont la destruction locale des habitats et des écosystèmes associés, mais aussi la perturbation du milieu (colonne d'eau et fonds) et de la diversité biologique sur une aire plus étendue et une durée bien supérieure à l'exploitation proprement dite. Le niveau de connaissances sur les différents habitats potentiellement menacés est inégal mais généralement insuffisant pour définir a priori les plans de préservation de l'environnement et de la biodiversité nécessaires en cas d'exploitation des ressources. En particulier, il est important de comprendre la variabilité naturelle d'un écosystème afin d'évaluer le niveau d'impact des activités d'exploitation ; or les informations sur ces aspects dans les milieux profonds sont rares. Il est donc indispensable de promouvoir la recherche afin de mieux comprendre la diversité biologique et la dynamique de ces écosystèmes.

## Comment préserver l'environnement ?

Dans la perspective d'une exploitation des ressources minérales dans les grands fonds, une approche générale théorique visant à proposer des solutions respectueuses pour l'environnement peut être discutée. Pendant la phase d'exploration

destinée à identifier, évaluer, répertorier la ressource et cartographier les gisements, la première étape consiste à caractériser le milieu environnant à l'échelle régionale (colonne d'eau et fonds), et la diversité biologique qu'il abrite. Dans la colonne d'eau, les paramètres hydrodynamiques, chimiques et trophiques sont les plus pertinents. En ce qui concerne les fonds il conviendra de cartographier les habitats, définis en premier lieu par la profondeur, le substrat et la source trophique, de caractériser l'environnement propre à chaque habitat et de décrire les communautés animales associées.

Après l'identification des sites à exploiter et des techniques d'extraction de la ressource, il sera nécessaire d'évaluer les conséquences directes et indirectes de l'exploitation de la ressource sur le milieu et sur la biodiversité par des approches expérimentales ou en milieu naturel ainsi que la capacité de restauration ou de résilience de l'écosystème après destruction et/ou perturbation. Un suivi à long terme en parallèle sur une zone impactée et sur une zone naturelle présentant les mêmes caractéristiques permettra de discriminer les conséquences des activités minières de la variabilité naturelle du milieu sur la biodiversité. L'ensemble des connaissances acquises au cours de ces différentes phases constituera la base indispensable à la définition et à la mise en place de zones protégées pour la préservation de la biodiversité.

# 5 // SCÉNARIOS ET ENJEUX ASSOCIÉS

L'analyse des ressources minérales marines (Remima) dans une projection à 2030 a été menée en trois temps : d'abord, l'étude de variables exogènes et endogènes pour six

compartiments de l'environnement global (en bleu dans la figure ci-dessous), puis pour le contexte intermédiaire et enfin pour les ressources minérales elles-mêmes.

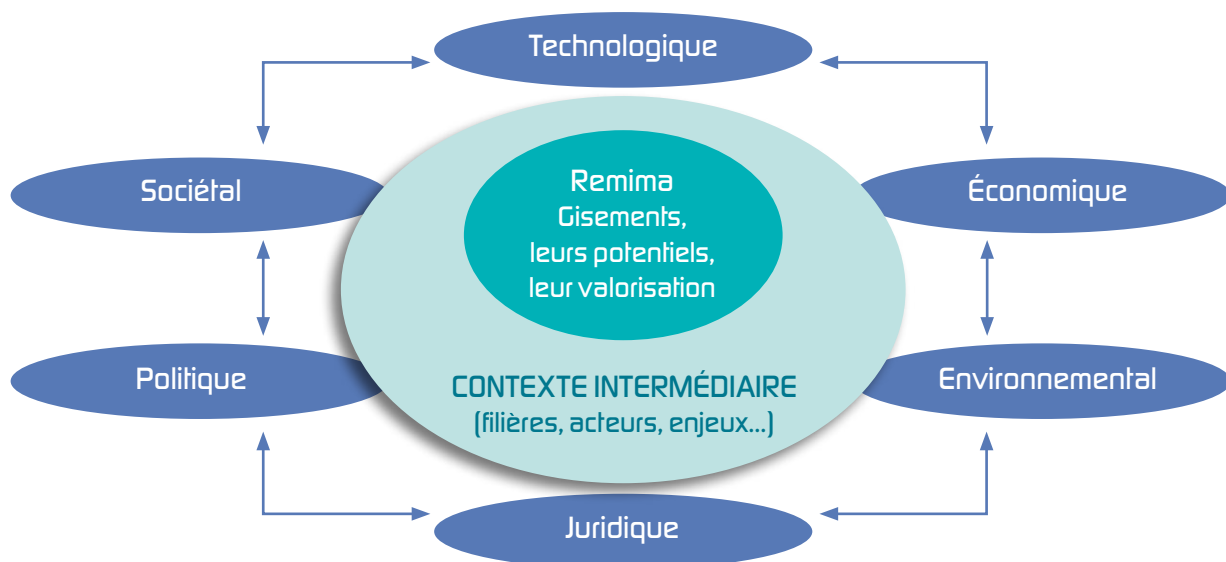


Figure 7 : Domaines d'analyse pour l'étude des variables concernant les Remima.

## Variables du système

### Variables exogènes de cadrage global

- ▶ mondialisation et croissance
- ▶ crises
- ▶ régulation du système international
- ▶ ONGs et questions environnementales (perceptions)
- ▶ trajectoires possibles pour l'Union européenne

### Variables exogènes de contexte spécifique

- ▶ évolution des tensions sur les ressources (économiques, politiques)
- ▶ place des métaux dans l'économie, métaux critiques
- ▶ place de l'espace marin et niveau de sécurité des océans
- ▶ aspects juridiques (ISA)
- ▶ jeux des acteurs : états et acteurs miniers (sécurité, accès aux technologies...)
- ▶ politiques d'approvisionnement, de diversification, de récupération, de substitution.

### Variables endogènes

- ▶ la place des Remima comme ressources
- ▶ les parties prenantes
- ▶ exploration et partage scientifique
- ▶ valorisation des gisements
- ▶ impact exploitation sur environnement
- ▶ minéralurgie et métallurgie

## Trois scénarios et enjeux pour la France

La mise en perspective collective des variables a permis de construire trois scénarios contrastés conduisant à trois types d'enjeux différents pour la France.

### « Crise et cloisonnements, tensions politiques »

#### Contexte

Des tensions géopolitiques multiples dans un monde devenu multipolaire déprécient le rôle et l'influence des organisations internationales en général et de l'ISA en particulier. En l'absence de consensus sur les règlements internationaux concernant l'espace marin, les conflits se multiplient. Ils affectent autant les questions d'accès à la connaissance, aux ressources que d'évaluation des impacts ou le simple respect des accords internationaux.

Dans ce climat de tension, on observe une moindre fluidité des marchés ce qui entraîne la mise en place de stratégies d'approvisionnement autonome dans la plupart des grands pays. Les états disposant d'une ZEE accroissent leur contrôle sur les gisements potentiels de ces zones et restreignent le choix de partenaires dans le cercle des alliés sûrs.

En conséquence, la situation des Remima oscille « entre jachère et captation ».

### Enjeux pour la France

Les Remima se présentent d'abord comme une ressource à maîtriser dans la ZEE, d'où les priorités suivantes :

- ▶ inventaire des ressources minérales dans la ZEE française
- ▶ définition des règles d'exploration et d'exploitation en ZEE
- ▶ recherche d'accords entre Etats pour les gisements potentiels d'intérêt stratégique dans les eaux internationales
- ▶ mise en place d'une capacité d'intégration scientifique et technologique régionale soit en partenariat européen soit via un accord multilatéral (ex : France- Allemagne - Russie)

#### Priorité

La priorité des campagnes d'exploration devient l'inventaire des ressources dans la (les) ZEE.

#### « Cycles as usual »

#### Contexte

Le caractère régulier d'alternance de phases de développement économique et de récession dans l'économie mondiale et l'émergence d'un plus grand nombre d'acteurs dans le domaine géopolitique conduisent à une relativisation des crises et à la recherche de coopérations renforcées entre États.

Les acteurs économiques cherchent de nouvelles filières pour entretenir leur compétitivité comme leur offre. Les États comme les industriels mettent en place des politiques de diversification des approvisionnements pour conserver un secteur minier opérationnel.

Les Remima apparaissent alors comme un gisement de ressources potentielles et de puissance car leur accès reste réservé à un petit nombre de pays avancés. Le rôle de l'ISA reste celui d'un garant des permis mais sans influence sur les stratégies des grands états (Etats-Unis, Chine, Russie, Inde, Brésil, états majeurs de l'Union européenne...).

En conséquence, la situation des Remima est celle d'une « ressource économique d'approche compétitive ».

### Enjeux pour la France

Les Remima se présentent alors comme une ressource économique à valoriser. Ceci implique de développer à terme une filière complète, de l'exploration à l'exploitation.

Cette approche « compétitive » impose la nécessité d'une bonne connaissance des gisements afin de pouvoir sélectionner les plus riches, d'où les priorités suivantes :

- ▶ Conduite de partenariats publics-privés (PPP) d'exploration et d'exploitation entre Etats et opérateurs privés (français/européens)

- ▶ Gestion du passage public/privé
- ▶ Développement d'un secteur minier (France / Union européenne)
- ▶ appui aux acteurs économiques européens technologiques (pilote)
- ▶ vente de savoir faire et d'expertise en entretenant les compétences en matière de formation supérieure

### Priorité

L'objectif prioritaire reste des campagnes d'exploration scientifique pour un inventaire des ressources dans la ZEE comme en eaux internationales tout en préparant les partenariats adaptés pour la réalisation de pilote(s) puis l'exploitation.

### « Crises globales »

#### Contexte

L'ampleur des crises récurrentes dans le domaine politique comme dans le domaine économique ou environnemental (changement climatique) conduit à une prise de conscience de la nécessité vitale de réponses coordonnées aux menaces qui concernent l'ensemble des sociétés humaines et pas seulement certaines régions ou certains continents. Cette situation restaure l'utilité des organisations internationales et valorise leur rôle. La coordination des politiques nationales et régionales devient une nécessité pour faire évoluer l'économie et les comportements vers une civilisation « post-carbone ». Les multinationales doivent s'intégrer bon gré, mal gré, à cette évolution, y compris dans le domaine des ressources minérales critiques et identifier leur importance pour les énergies vertes.

Le rôle et les pouvoirs de l'ISA s'accroissent notamment en matière d'évaluation *ex ante* des impacts

d'un projet d'exploitation sur le milieu profond. Dans ce contexte, les opérateurs industriels ont intérêt à chercher de multiples partenariats pour réduire les coûts de recherche et développement et sécuriser leurs marchés selon les normes internationales. Les espaces marins profonds apparaissent alors comme une sorte de « nouvelle frontière de ressources » sous réserve de règles d'exploitation strictes.

En conséquence, la situation des Remima devient celle de « réserve patrimoniale globale, susceptible d'une exploitation raisonnée ».

### Enjeux pour la France

Le premier enjeu est celui d'une bonne connaissance scientifique intégrant les critères de durabilité. Le second est celui d'une exploitation partagée, internationale, visant les métaux critiques post carbone (fig. 8 et 9), d'où les priorités suivantes :

- ▶ Mise au point de solutions exemplaires de valorisation et de protection (résilience, aires marines protégées ...) pour les opérations françaises
- ▶ Approche résolument européenne pour la valorisation
- ▶ Création d'un pôle de formation, expertise sur les technologies et l'ingénierie
- ▶ Multiplication des montages de type PPP-ONGs
- ▶ Politique de soutien aux aires marines protégées en ZEE.

### Priorité

Cette vision ambitieuse requiert de concentrer en un pôle visible les moyens français puis européens en matière des connaissances des gisements et de leur environnement avant de proposer des modes d'exploitation durable.

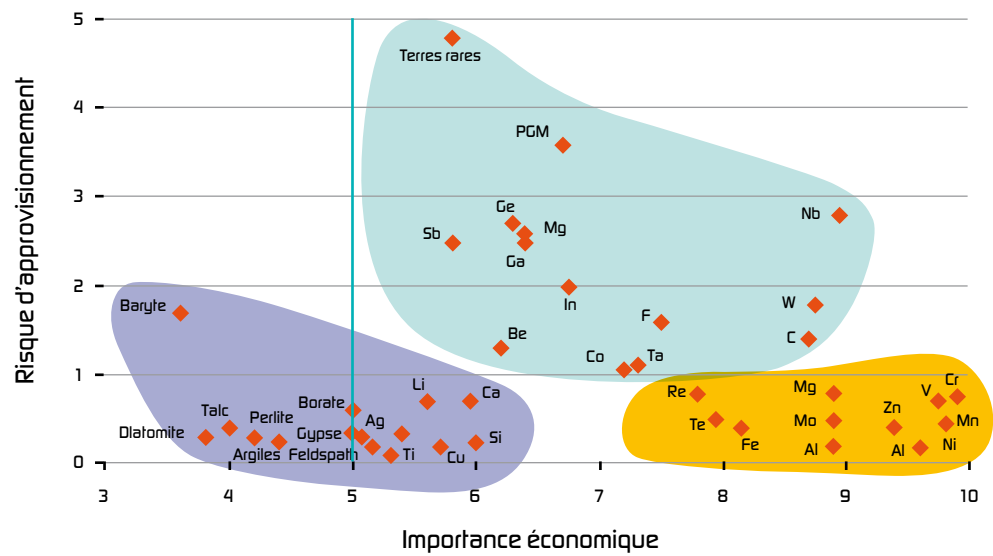


Figure 8 : Vision européenne de la position des métaux en fonction de deux critères : importance économique et risques sur l'approvisionnement (source UE, 2010).

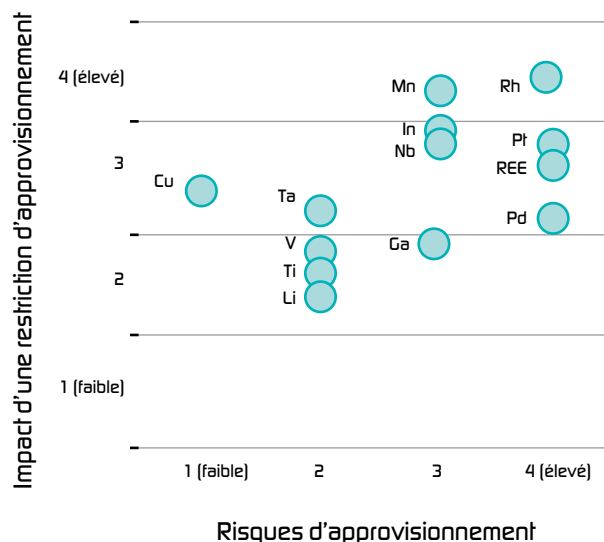


Figure 9 : Vision nord-américaine de la position des métaux en fonction de deux critères : risques d'approvisionnement et impact d'une restriction (Source : USGA, 2009).

## 6 // ASPECTS JURIDIQUES

Les ressources minérales marines ont un régime juridique dépendant de leur localisation, le plateau continental juridique ou les grands fonds marins au-delà des limites de la juridiction des États, appelée la Zone. Il convient d'expliquer pourquoi le plateau continental est qualifié de juridique et ce qu'il convient d'entendre par la Zone.

La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de 1982 (CNUDM) donne une définition du plateau continental qui rompt avec celle issue de la précédente convention datant de 1958 assez proche de la conception qu'ont les géologues du plateau continental. La CNUDM a aligné la définition du plateau sur celle de la zone économique exclusive indépendamment de tout critère de profondeur ou d'exploitabilité retenu en 1958. Le plateau continental nouveau est celui sur lequel un État côtier peut exercer des droits souverains jusqu'à la limite des 200 milles marins, mesurée à partir de ses côtes. L'harmonisation avec la ZEE a imposé le critère de distance. Cette tendance a eu un prolongement innovant, en droit, celui de la possibilité d'extension du plateau continental au-delà de la limite des 200 milles marins. Sous certaines conditions, un État peut prétendre à cette extension jusqu'à 350 milles marins, voire au-delà dans certaines conditions.

L'intérêt de l'institution du plateau continental est de reconnaître à l'État l'exercice exclusif des droits souverains aux fins de l'exploration et de l'exploitation de ses ressources naturelles. C'est l'article 77 de la CNUDM qui expose l'ampleur des droits

et leur nature. Deux éléments méritent d'être relevés : d'une part, le caractère exclusif des droits signifie que si l'État côtier n'exploire pas le plateau ou n'en exploite pas les ressources naturelles, nul ne peut entreprendre de telles activités sans son consentement. On mesure ainsi toute l'importance stratégique qui s'attache aux droits souverains attendus de l'extension du plateau continental. Le deuxième élément, d'autre part, permet de confirmer et conforter le précédent en ce que les droits souverains sont indépendants de toute occupation effective ou de toute proclamation expresse.

C'est dans ce contexte que la loi du 31 décembre 1968 sur le plateau continental (et ses décrets d'application) a mis en place le système juridique national qui sert de base à l'accès aux ressources minérales marines. Une évolution sensible est apparue s'agissant des collectivités d'outre-mer à statut spécifique, par exemple la Nouvelle-Calédonie ou la Polynésie. Ces collectivités disposent du pouvoir de réglementer l'accès aux ressources naturelles (exploration du plateau continental, exploitation). Cette tendance, qui s'est confirmée par les transferts de compétence récents de l'État, va s'accroître sur le fondement de la maîtrise, par ces collectivités, de leur développement. Ce mouvement pourrait à terme se mettre en place aussi au bénéfice de collectivités, les départements outre-mer, dont on penserait qu'elles sont encore placées sous compétence étatique pour la définition des règles relatives à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation des ressources naturelles.

La Zone est l'espace ayant une définition juridique posée dès les premières lignes de la CNUDM : on qualifie ainsi les fonds marins et leurs sous-sols au delà des limites de la juridiction nationale. Les activités qui s'y conduisent sont toutes les activités d'exploration et d'exploitation de ses ressources naturelles. La Zone et les activités sont placées sous la responsabilité d'une organisation établie à cet effet par la CNUDM, l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), à laquelle appartient la France dès sa ratification de la CNUDM en 1996.

Le cadre juridique pour les activités portant sur les ressources minérales dans la Zone est fourni par la partie XI de la CNUDM, ainsi que par l'annexe III sur les « dispositions de base régissant la prospection, l'exploration et l'exploitation ». La Partie XI est institutionnelle en ce qu'elle expose les mécanismes de prise de décision de l'AIFM, détaillant sa composition avec trois instances qui ont un rôle central, le Conseil, la Commission juridique et technique (CJT) et le secrétariat général (SG). C'est dans l'interaction entre elles que s'élaborent et sont adoptés les textes qui vont constituer le «Code» minier de la Zone.

Le premier règlement adopté fut celui relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques en juillet 2000 (fig. 10). En mai 2010, le règlement consacré aux sulfures est adopté. Les règlements ont des points communs qui tiennent aux grands axes du régime international et qui s'organisent autour du principe du Patrimoine commun de l'Humanité posé par la CNUDM dans son article 136. Ces éléments communs se déclinent ainsi :

a) la division en deux parties de valeur estimée égale de la zone à explorer, une partie permet-

- b) le choix en principe n'est pas opéré par le demandeur mais par l'AIFM ;
- c) le contrat est la modalité juridique d'une durée de quinze ans et la prolongation est possible ;
- d) le paiement de droits est exigé au moment de l'examen de la demande. Cela ne vaut que pour le contrat sulfures, le cas des nodules s'est réglé de manière différente pour des raisons historiques. Le choix est entre le paiement d'un montant forfaitaire de 500 000 \$, ou le paiement d'un droit fixe de 50 000 \$ à compléter, le moment venu, d'un droit annuel calculé en prenant en compte un type d'intéressement offert à l'entreprise comme co-contractant ;
- e) les droits du contractant sont garantis, l'exclusivité pour l'exploration.

Le règlement sulfures de 2010 et les contrats qui seront accordés dans ce cadre vont constituer le droit international minier commun. Sont directement concernés les États parties à la CNUDM qui, hors de l'hypothèse d'un permis pour eux-mêmes, doivent accorder leur parrainage à toute entité, publique ou privée, se réclamant d'eux. Cette qualité d'État patronne est appelée à être scrutée avec attention, parce que le Tribunal international du droit de la mer de Hambourg est saisi d'une demande d'avis par l'AIFM pour répondre à la question de la responsabilité d'un tel État s'il y avait défaillance de l'entité qu'il patronne. Le contentieux des obligations du contractant et le contentieux des dommages à l'environnement sont susceptibles d'être au centre de l'analyse du Tribunal.

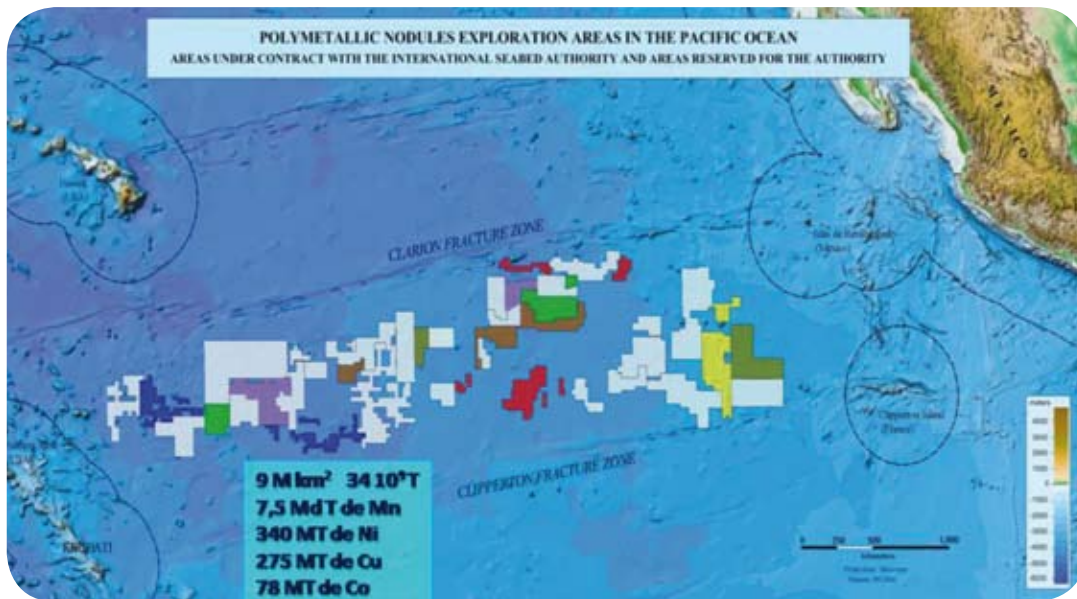


Figure 10 : Position des permis « Nodules » sur la bande Clarion-Clipperton (©ISA).

Le rôle de la CJT est de donner un avis sur la demande de permis. Elle doit en particulier s'assurer que le respect du milieu marin et l'absence d'entrave à la navigation et à la pêche sont garantis. Le rôle du Conseil est bien défini, celui de l'organe de décision qui accorde le permis et il faut noter que le refus d'un permis est envisagé à titre exceptionnel puisque le refus relève d'un vote qualifié, donc dans des conditions difficiles à réunir. La Chine, en mai 2010, et la Russie, en janvier 2011, ont déposé des demandes de permis d'exploration et il y a peu de risques que ces demandes ne soient pas acceptées, les deux demandes n'étant pas concurrentes ; la première est située dans l'océan indien et la deuxième dans l'océan atlantique.

En agissant ainsi, c'est-à-dire en ayant retenu une procédure qui permet d'aller vite et de contourner les blocages qui seraient dus à des conflits de chevauchement entre secteurs, l'AIFM entend donner une image d'efficacité et de bonne gouvernance juridique en phase avec le regain de légitimité qui se perçoit dans les instances internationales dès que sont abordées les ressources des espaces au-delà de la juridiction nationale. Il y a là une voie qu'un certain nombre d'États parties à la CNUDM entend bien explorer pour les ressources génétiques des grands fonds marins le moment venu.

De même, les perspectives de développement de l'AIFM vont tirer profit du mandat qui lui est donné, par les articles 143 et 145 de la CNUDM, de favoriser la recherche scientifique marine dans la Zone d'une part, et de veiller à la protection du milieu marin d'autre part. Les liens qui existent entre ces

éléments du mandat et les activités dans la Zone vont constituer un levier puissant de croissance de légitimité de l'AIFM. On peut, sans grand risque, prévoir une phase de consolidation de l'AIFM qui va accueillir des soutiens de plus en plus nombreux aussi bien parmi les États en développement ou émergents que développés (France, Royaume-Uni), rallier à elle la famille des ONG environnementalistes, devenir un centre de l'expertise scientifique internationale sur les fonds marins.

L'analyse des aspects juridiques ne saurait dissocier la question des contrats d'exploration des ressources naturelles de celle de l'évolution technologique de l'accès à ces ressources. En effet, la contrainte majeure qui traverse ce champ est la démonstration de la maîtrise du risque que ces activités font courir au milieu marin. L'AIFM est garante de cette maîtrise pour la Zone tout comme l'État en est le garant pour ce qui est du plateau continental placé sous l'emprise des droits souverains dont il est investi.

Ainsi, du strict droit de l'accès aux ressources naturelles marines, l'évolution des pratiques juridiques devrait vraisemblablement se faire vers du droit décliné selon le principe de précaution, en intégrant progressivement la durabilité des écosystèmes concernés dans toute exploitation.

On peut donc raisonnablement penser que l'autorité de l'AIFM ira croissant avec les années en raison de l'utilité d'une structure supranationale incontestée dans ce domaine.

## 7 // ENJEUX D'INNOVATION TECHNOLOGIQUE

L'exploitation potentielle des ressources minérales des grands fonds fait apparaître des enjeux technologiques forts. Comme il s'agit d'une nouvelle industrie, les pays et les sociétés industrielles qui sauront anticiper et maîtriser les technologies d'exploration, d'extraction et de remontée des minerais pourront tirer des bénéfices de leur savoir faire au niveau international.

Par ailleurs, le renchérissement inéluctable des matières premières sur le long terme suscite questions et inquiétudes. Les acteurs économiques de la filière concernée sont conscients de ces éléments de fragilité. Ils savent qu'il n'y a pas d'avantages acquis de manière définitive et qu'ils doivent améliorer sans cesse leur compétitivité notamment par l'innovation.

Pour cette filière industrielle nouvelle, et donc non mature, les positions de leadership ne sont pas

encore assurées au niveau international. La France peut encore se placer dans les toutes premières places à condition de valoriser sa recherche d'excellence et de faire émerger des acteurs industriels.

### Technologies d'exploration et d'observation

Le développement technologique des systèmes d'exploration adaptés aux environnements extrêmes des grands fonds et objets géologiques associés est une nécessité. La surveillance de l'impact environnemental de l'exploitation éventuelle des ressources impliquera également le développement de techniques d'observation et de mesure. Outre les navires, les technologies existantes ou à développer, pour localiser et étudier ces ressources potentielles, sont à considérer à trois niveaux :

## Technologies d'exploration régionale

C'est l'étape indispensable avant l'évaluation des ressources et avant l'étude de la biodiversité associée aux sorties de fluides. L'un des buts est de détecter les anomalies physiques ou chimiques dans la colonne d'eau afin de localiser les zones d'émission de fluides. Les outils mis en œuvre sont les outils de cartographie (sondeur multifaisceaux), d'imagerie acoustique du fond (sonars), de prélèvements d'eau pour rechercher les traceurs chimiques et de mesures physiques dans la colonne d'eau. Dans l'état actuel, ces techniques sont efficaces pour localiser les sorties de fluides actives mais des développements sont nécessaires pour localiser les systèmes fossiles les plus prometteurs pour les ressources minérales. Afin de maintenir la position française au premier plan mondial dans ce domaine, il est indispensable de mettre au point de nouveaux outils permettant de conduire des stratégies d'exploration et de localisation plus efficaces. Plusieurs pistes se dessinent : développement de la détection acoustique des sorties de fluides dans la colonne d'eau à partir du sondeur de bathymétrie et des techniques ADCP ; marinisation des techniques d'analyses chimiques *in situ* près du fond (spectromètres de masse GC-MS, permettant de détecter les traceurs organiques émis par les fluides, techniques Raman pour l'analyse des solides...). Certains de ces équipements devront être adaptés aux vecteurs tels qu'AUV<sup>2</sup> et ROV<sup>3</sup>.

## Technologies d'étude de site et évaluation des ressources et de la biodiversité

Lorsque les sites sont identifiés, la compréhension scientifique des processus géologiques, géochimiques et biologiques, implique des travaux mettant en œuvre les submersibles (engins habités, télé-opérés ou autonomes). Ces engins permettent d'affiner les explorations au niveau local et de réaliser des prélèvements précis. Comme dans la phase d'exploration, de nombreux développements sont indispensables pour garder une position de leader mondial et mener des stratégies plus efficaces. L'un des volets indispensables concerne la bathymétrie et l'imagerie à ultra haute résolution (quelques dizaines de centimètres) près du fond. Une poursuite des développements en cours est à prévoir pour dimensionner l'ensemble des vecteurs et des capteurs pour des profondeurs de 6000 m. Des outils spécifiques sont également à développer pour mieux quantifier les flux d'hydrogène et des progrès sont à réaliser pour quantifier la présence d'hydrates dans les sédiments à partir des données sismiques. L'évaluation des minéralisations implique une connaissance de leur volume et de leur composition. Pour localiser les sites fossiles et évaluer leur dimension, il faut mariner les

techniques géophysiques (gravimétrie, magnétisme, méthodes électriques). Enfin l'évaluation de la richesse et de la valeur des minéralisations en profondeur implique un échantillonnage par des outils de forage carotté opérant directement sur le fond.

## Les technologies de surveillance et préservation des environnements.

Afin de minimiser l'impact de l'exploitation des ressources des grands fonds, des outils spécifiques sont nécessaires pour établir des états de référence biologiques. Ces outils devraient aussi permettre de préciser les perturbations liées à l'activité géologique naturelle (volcanisme, tectonique, émissions chimiques et particulières par les fluides) et les perturbations anthropiques liées aux exploitations. Ces approches impliquent le développement d'outils permettant de suivre la variabilité temporelle. Un point important concerne l'observation de l'évolution temporelle des populations biologiques (observatoires) et le développement de systèmes autonomes (pièges à particules, courantomètres) pour déterminer les rejets particuliers liés aux activités humaines.

## Technologies d'exploitation

La mise au point des équipements et des techniques d'exploration et d'exploitation des grands fonds marins est l'une des grandes entreprises scientifiques et technologiques de ces 50 dernières années.

Cette double quête a amené les sociétés industrialisées à concevoir de meilleurs moyens pour explorer et exploiter la mer. Depuis le milieu du XXe siècle, on a découvert que la mer regorgeait des minéraux recherchés par l'industrie. Les explorateurs sous-marins ont commencé à rassembler des données sur ces richesses en matière de réserves d'énergie et de minerais. Mais, à bien des égards, ces richesses auraient pu se trouver tout aussi bien sur la Lune, tant il semblait difficile de les découvrir et de les extraire.

Les appareils de forage pétrolier en mer sont à présent capables de contrôler leurs trépan à six kilomètres de distance des fonds marins. Les bateaux peuvent contrôler des engins mobiles qui leur sont reliés à des milliers de mètres sous l'eau, et dans des conditions de mer parfois difficiles. Pour explorer *de visu* les profondeurs, l'homme est maintenant capable d'évoluer dans un milieu sans aucune lumière et où chaque centimètre carré est écrasé sous une demi-tonne d'eau.

Que ce soit à terre ou en mer, on ne dispose que de quatre méthodes pour recueillir des minéraux : le raclage de la surface, l'excavation, le creusement

<sup>2</sup> AUV : Autonomous Underwater Vehicle ; engin sous-marin autonome

<sup>3</sup> ROV : Remote Operated Vehicle; engin télé-opéré

d'une galerie pour accéder aux gisements sous la surface ou le forage du gisement et sa fluidification.

La différence avec une exploitation dans les grands fonds sous-marins est que les travaux doivent être effectués sous l'eau, les opérations étant commandées à distance à partir d'une plate-forme flottante en surface. À chaque étape du processus, selon la nature du gisement, la masse manipulée diminue et des déchets sont rejetés.

À ce jour, on n'a jamais procédé à des opérations de longue durée pour la collecte à des fins commerciales de minéraux solides à des profondeurs supérieures à 200 mètres; mais les premiers essais effectués en 2010 par Nautilus Minerals avec des systèmes de ramassage des sulfures polymétalliques à des profondeurs de 1 700 mètres montrent que le ramassage des sulfures est possible.

Les progrès réalisés en matière de capacité de forage, de creusement de tranchées et de production de pétrole de profondeur ont élargi sensiblement la gamme de moyens techniques disponibles mais ceux-ci devront faire l'objet de modifications importantes pour convenir aux procédés d'extraction plus sélectifs requis pour les gisements de minéraux plus durs.

À l'exception notable de celles qui sont appliquées à la mise en valeur des diamants, la plupart des techniques d'exploration et d'exploitation des fonds marins ont été conçues à l'origine pour de faibles profondeurs et leur utilisation a été étendue au fur et à mesure des besoins. Il est donc nécessaire que, pour combler les lacunes, les techniques applicables sous de grandes profondeurs soient mises au point par perfectionnement des systèmes classiques, dont un grand nombre est emprunté à d'autres secteurs industriels.

## 8 // RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS

### Résultats

Les conclusions doivent être distinguées par type de minerai et par site associé.

**Les sulfures hydrothermaux** : leur exploration et leur exploitation potentielle seront au centre de tous les enjeux: (a) géopolitiques (pour les eaux internationales) dans le cadre de la mise en place des permis ISA ; (b) environnementaux avec des conflits probables sur les conditions de protection et d'exploitation des sites ; (c) scientifiques (processus volcaniques et tectonique, géochimie des roches et des fluides, métallogénie spécifique, ressources biologiques, ...) et (d) économiques.

**Les encroûtements** : leur exploitation n'interviendrait pas avant 2030 (exploitabilité incertaine, disponibilités technologiques...) malgré un fort potentiel. Cependant les zones les plus riches se trouvent dans la ZEE polynésienne. Des travaux sur le fond sont nécessaires pour déterminer les zones intéressantes et présentant une continuité favorable à une exploitation.

**Les nodules polymétalliques** : leur exploitation apparaît possible au plan technique, hypothétique au plan économique et peu pertinente au plan national au vu des ressources terrestres.

Cependant l'intérêt des nodules et des encroûtements vient d'être relancé du fait de la présence de métaux rares (Terres rares, molybdène, tellure, vanadium, zirconium, thallium...) qui n'avaient pas été pris en compte par le passé. Plusieurs pays ont entrepris des analyses systématiques de leurs collections afin de déterminer les échantillons et les zones les plus riches en métaux rares.

**L'hydrogène naturel** : les connaissances actuelles ne permettent pas d'envisager une exploitation avant le très long terme. C'est une découverte récente réalisée par l'Ifremer sur les systèmes hydrothermaux associés aux roches du manteau. Il s'agit d'approfondir la connaissance scientifique des processus et de quantifier les flux.

La présente analyse prospective menée par l'Ifremer en lien avec l'ensemble des partenaires publics et privés concernés ainsi que les propositions du Livre Bleu « Stratégie nationale pour la mer et les océans », confortées par celles de la Commission Européenne, montrent bien la mutation des marchés mondiaux de matières premières. Outre l'envolée du cours de nombreux métaux au cours de ces dernières années (zinc, cuivre...), les États européens doivent prendre en compte leur dépendance croissante d'importations de minéraux métalliques et de



métaux dits « de haute technologie » (encore appelés métaux rares ou stratégiques) tels que le cobalt, le platine, les terres rares, gallium, germanium, indium et le titane.

Or, au rythme actuel de croissance, la demande mondiale de ce type de matériaux devrait doubler dans les cinq ans qui viennent. La demande pour certains métaux rares ou stratégiques connaîtra ainsi une croissance forte, en lien notamment avec l'évolution du marché des technologies de l'environnement, des télécommunications, de l'armement, avec des goulets d'étranglement probables sur l'offre, liés aux stratégies propres des pays disposant de ces ressources sur leur territoire (Chine, Afrique du Sud, Brésil, Russie...).

Aussi, en complément de la recherche de nouveaux gisements terrestres, il faudra de plus en plus se tourner vers la mer pour répondre à la demande mondiale en matières premières. De nouvelles perspectives se présentent sur des ressources minérales potentielles sous les océans : sulfures hydrothermaux, nodules et encroûtements de cobalt et manganèse. Ces perspectives ouvrent un champ nouveau pour l'exploration et l'exploitation, parfois déjà engagées, des ressources minérales marines profondes.

L'accès à ces métaux stratégiques passe d'une part, par la connaissance scientifique des processus géologiques et géochimiques conduisant à la formation de ces ressources potentielles, sans négliger celles de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes, et d'autre part, par le développement de nouveaux outils d'exploration, d'extraction et de transformation.

Depuis quelques années déjà, l'industrie minière s'intéresse aux minéralisations hydrothermales sous-marines. Des permis d'exploration ont été déposés sur plusieurs champs hydrothermaux offshore dans l'ouest du Pacifique par des compagnies qui préparent pour 2012 l'exploitation de dépôts hydrothermaux en Papouasie et au nord de la Nouvelle-Zélande (société Nautilus). La compétition pour l'accès aux matières premières minérales engendre une concurrence internationale de plus en plus visible. Devant cette évolution rapide, l'Autorité internationale des fonds marins a adopté lors de sa dernière session, le 7 mai 2010, un règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques dans les fonds marins internationaux qui autorise le dépôt de permis exclusifs dans les eaux internationales.

Dès l'approbation de ce texte, La Chine, via la Comra (*China Ocean Mineral Resources R&D Association*), et la Russie ont

déposé un dossier de demande de permis en décembre 2010.

Les acteurs sont donc en train de se mobiliser partout dans le monde. À l'échelle mondiale, une soixantaine de permis suffirait à couvrir la totalité des dorsales concernées. Les pays qui auront déposé des demandes de permis disposeront ainsi d'un avantage évident : ces permis sont en effet des titres exclusifs d'exploration, qui empêcheront *ipso jure*, toute autre opération sur la zone.

## Position française

Dans ce contexte, il convient de conforter et de fédérer les intérêts industriels, technologiques et scientifiques de la France, qui a été pionnière pour la technologie et la connaissance des grands fonds depuis les années 1970.

La France dispose en effet d'un ensemble cohérent d'expertise scientifique et de compétences technologiques en matière de grands fonds sous-marins ou d'exploitation minière : l'Ifremer, le BRGM, le CNRS et les universités, pour les établissements publics, Technip, Areva et Eramet pour le secteur privé. La France dispose ainsi du potentiel pour mener à bien les recherches scientifiques et développer les technologies innovantes pour l'accès aux ressources minières du futur. Elle dispose aussi de la deuxième ZEE mondiale, en cours d'extension dans le cadre du programme Extraplac. Dans ce contexte, la France se doit de définir une stratégie et des priorités.

C'est dans cet esprit qu'a été conduit en 2010 le programme « Wallis et Futuna ». Une première campagne à la mer, Futuna 2010, qui s'est déroulée du 3 août au 23 septembre 2010, résulte de l'accord sur une première exploration de la ZEE française autour des îles Wallis et Futuna, afin de rechercher des sites hydrothermaux actifs et inactifs et d'étudier la biodiversité associée. Cette campagne a été rendue possible grâce à un partenariat public/privé associant le MEDDTL, l'AAMP, l'Ifremer et le BRGM pour les organismes publics et Technip, Eramet et Areva pour les organismes privés. D'autres organismes du monde académique (le CNRS-INSU, l'IPGP, le CEA et l'UBO) y ont été associés. Elle a permis de découvrir un vaste domaine de volcanisme récent (nouvelle dorsale, nouveaux volcans) et de localiser plusieurs dépôts hydrothermaux.

# Propositions

Les actions prioritaires proposées pour la France se répartissent suivant huit axes :

## **Connaissances scientifiques et approfondissement du potentiel**

Cette action implique une recherche multidisciplinaire et partenariale axée sur la connaissance des fonds et la protection de la biodiversité, intégrant des acteurs publics et privés (notamment en matière de technologies à la mer, métallogénie...) ainsi que les ONG compétentes dans le domaine notamment en matière de biodiversité, résilience des sites... Ce travail devra être mené en synergie avec la recherche nationale et européenne sur les ressources minérales (alliances, réflexions SNRI sur l'outre-mer, ANR, PCRDT de l'Union européenne).

Cette approche devrait conduire à l'élaboration d'un programme national de recherche géologique et biologique des fonds marins, incluant une exploration ciblée de la ZEE française et des fonds internationaux, sur dix ans, intégrant les nouvelles technologies d'exploration (haute résolution, 3D, modélisation...), un programme de campagnes en mer des outils de monitoring des flux, d'évaluation de la biodiversité et la gestion de l'information produite (SIG, banques des informations sensibles...).

Pour l'immédiat, la priorité d'action est la poursuite des opérations d'exploration sur la zone Wallis et Futuna. Compte tenu de la pression internationale de demandes de permis, il faudra étendre ce type de démarche à d'autres zones, en recherchant une utilisation optimale des moyens à la mer et des forces scientifiques nationales disponibles.

Cette action devrait être conçue et pilotée par un consortium français ou à dimension d'emblée européenne.

## **Partenariat public-privé**

L'objectif est de développer un pôle minier français sur les ressources marines profondes. À partir d'une approche inspirée du type Grenelle de la mer, il s'agit de conforter un partenariat public-privé pour un projet minier, en s'appuyant sur le développement des technologies et de l'industrie françaises, tant pour les techniques d'exploration que pour la recherche technologique nécessaire à la réalisation d'un pilote d'extraction, afin d'aboutir à la réalisation d'un pilote industriel pour l'extraction des métaux (sur la ZEE de Wallis et Futuna et / ou autres zones internationales).

## **Recherche de métaux stratégiques dans les collections existantes**

Les métaux rares n'ont pas toujours été dosés dans les échantillons récoltés au cours des dernières décennies. Un important travail analytique devra être repris sur les collections existantes afin de préciser les fluctuations des concentrations en éléments rares et de comprendre les processus de concentration dans les échantillons les plus riches. Cependant les connaissances acquises montrent que plusieurs métaux rares sont concentrés dans les minéralisations océaniques. Par exemple, dans le cas des sulfures hydrothermaux, plusieurs éléments mineurs accompagnent les métaux principaux (fig. 3 et 5). Ces sites, dont la localisation est connue, pourraient être considérés comme des réserves stratégiques pour les éléments de base et certains métaux rares, si des enrichissements significatifs étaient confirmés par de telles études complémentaires.

## **Présence française renforcée à l'AIFM**

L'objectif est de renforcer la recherche française dans les eaux internationales avec des mesures associées qui englobent l'entretien du permis nodules et surtout la présence au sein de l'Autorité internationale des fonds marins. Pour cela, une forte participation est requise, à haut niveau d'expertise, à la commission juridique et technique qui va aborder les questions de gouvernance, notamment en termes de gouvernance environnementale, de zones marines à protéger et de suivi des permis.

## **Dépôt d'une demande de permis exclusif d'exploration sur les amas sulfurés**

Un dépôt de permis exclusif est à faire auprès de l'AIFM au plus tôt. Cette demande pourrait se faire sur la base d'un partenariat public - privé avec possibilité d'un parrainage par un État seul (France) ou d'un parrainage de plusieurs États européens ou autres. Dans cette perspective, les spécialistes doivent donc discuter assez vite de la sélection des zones à plus fort potentiel.

## **Contribuer à une stratégie européenne (organisation intergouvernementale sur les métaux stratégiques)**

Compte tenu de la forte position française en termes d'expertise scientifique et de compétences technologiques, la France devrait jouer un rôle majeur sinon prépondérant pour une stratégie européenne, en proposant par exemple une organisation intergouvernementale sur les métaux

stratégiques, en s'appuyant sur les démarches en cours au niveau bilatéral (Association franco-allemande pour la Science ou la Technologie, notamment avec le BGR) ou dans le cadre du G3 (IFM-Geomar de Kiel, NOC de Southampton et l'Ifremer). Les aspects de formation à l'échelle européenne devront aussi être pris en compte afin d'entretenir les capacités de recherche et développement comme de mise en œuvre des technologies dans le domaine.

### **Développement des technologies d'exploration et d'exploitation, et de l'industrie française**

Le partenariat public-privé devrait traiter autant les technologies d'exploration que celles de l'exploitation afin de favoriser les synergies et d'éviter un décalage dans le temps pour l'exploitation. Un des verrous serait la mise au point de pilotes d'extraction pour valider l'intégration de solutions technologiques connues, mais complexes. Les montages financiers et les modèles économiques restent à établir. En matière de minéralurgie et métallurgie, il s'agit d'adapter le traitement des minerais océaniques ce qui implique des capacités de recherche technologique sur certains aspects cruciaux : corrosion (SH), fiabilité, impacts, captage des événements (H<sub>2</sub> natif), et technologies d'exploration (cf. point 4.1)

### **Gestion patrimoniale en ZEE**

Le besoin d'un inventaire général des ressources potentielles et de leur localisation constitue un pré-requis pour la planification des priorités d'accès et de valorisation éventuelle. Cette démarche requiert la clarification des conditions d'exploration et d'exploitation des Remima dans les ZEE (droit minier national à compléter, droit de suite, transparence financière, définition des protocoles d'exploitation...). Pour le vivant, il est nécessaire de prévoir assez tôt la mise en place d'un certain nombre d'aires marines protégées en ZEE.

Dans ce contexte prometteur des ressources minérales marines profondes mais déficitaire en connaissances importantes dans plusieurs domaines et à plusieurs échelles, il convient de rassembler compétences et moyens afin de gagner en temps, en efficacité et en cohérence. La priorité est donc de conforter et de fédérer les intérêts industriels, technologiques et scientifiques de la France afin qu'elle reste parmi les nations pionnières majeures dans l'exploration et la mise en valeur maîtrisée des grands fonds.



Figure 11 : Cratère d'un volcan actif cartographié lors de la campagne Futuna 2010. Le diamètre du cratère central est de 5 km (source Ifremer).

# ANNEXE 1 : MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE (JUILLET 2010)

Mme / Mr	Prénom	Nom	Titre / Fonction	Ministère / Organisme	Département, service...
Mme	Ana-Paula	SEROND	Chef de la recherche et du développement	AREVA	Amont du combustible
Mr	Dominique	DELORME	Président et directeur exécutif	La Mancha	La Mancha
Mr	Patrick	CHRISTMANN	Chef du département	BRGM	Ressources minérales
Mr	Bruno	MARTEL-JANTIN	Ressources minérales Chef de service	BRGM	Economie, intelligence et devpt. durable
Mme	Nathalie	BASSALER	Chef de service	CAS (Centre d'analyses stratégiques)	Service Veille Prospective et International
Mr	Bruno	GOFFÉ	Directeur scientifique adjoint	CNRS / INSU	Direction scientifique
Mr	Alain	CHEILLETZ	Professeur	CNRS / INSU	CRPG
Mr	Jérôme	DYMENT	Chargé de mission	CNRS / INSU	Géosciences marines
Mr	Abrao	CARVALHO	Directeur	Com. Européenne	Unité G3, unité Acier, métaux
Mr	Paul	ANCIAUX	Chargé de mission	DG Industrie	non ferreux et minerais
Mr	Benoit	LEGAIT	Directeur	Ecole des mines de Paris	Direction générale
Mr	Damien	GOETZ	Directeur	Ecole des mines de Paris	Centre des géosciences
Mr	Jean Marc	MONTEL	Directeur	ENSG de Nancy	Direction
Mr	Lev	FILIPPOV	Enseignant-chercheur	ENSG de Nancy	Enseignement
Mr	Antoine	GRECO	Directeur	ERAMET	Affaires industrielles
Mr	J. Jacques	REVERDY	Directeur	ERAMET	Branche Nickel
Mme	Catherine	TISSOT-COLLE	Présidente	FEDEM	Fed. Minerais & minéraux industriels et métaux non ferreux
Mr	François	BOURSE	Directeur d'études	Gerpa	Méthodologie de prospective
Mr	Pierre	COCHONAT	Directeur adjoint	Ifremer	Dir. des programmes et de la coordination des projets
Mr	Jean Luc	DEVENON	Conseiller scientifique et technologique	Ifremer	CST
Mr	Yves	FOUQUET	Chef de projet	Ifremer	Fluides, transferts chimiques et ressources potentielles
Mr	Maurice	HERAL	Directeur	Ifremer	Dir. de la prospective et la stratégie scientifique
Mr	Denis	LACROIX	Animateur Prospective	Ifremer	DPSS / Cellule Prospective
Mr	Lionel	LEMOINE	Chef de programme	Ifremer	Programmes Ressources minérales et énergétiques

Mme / Mr	Prénom	Nom	Titre / Fonction	Ministère / Organisme	Département, service...
Mr	Walter	ROEST	Expert pour les Géosciences	Ifremer	Dir. de la prospective et la stratégie scientifique
Mr	Jean Paul	PANCRACIO	Expert en droit international marin	Institut de recherches stratégiques de l'école militaire	Direction du domaine d'études 8 : études juridiques
Mr	Pascal	BARRIER	Directeur	Institut Lasalle Beauvais	Direction
Mr	Olivier	BAIN	Enseignant- chercheur	Institut Lasalle Beauvais	Dépt. Géologie
Mr	Xavier	FOATA	Chef de bureau	MEDDTL	Bureau des ressources
Mme	Alice	METAYER-MATHIEU	Chargée de mission	MEDDTL	minérales
Mr	François	BERSANI	Président de la section Régulations & ressources	MEFI	Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies
Mr	François	CLIN	Adjoint au directeur	MESR	DG Rech. & innovation
Mr	Pierre	BARBEY	Chargé de mission risques telluriques	MESR	Service Stratégie pour la rech. & l'innovation
Mr	Gilles	BŒUF	Président	MNHN	Présidence
Mr	Jean Yves	REYNAUD	Enseignant-chercheur	MNHN	Sédimentologie
Mr	Vincent	CAMPREDON	Conseiller technique	Secrétariat d'état à l'Outre-mer	Conseil
Mr	Pierre	MARX	Conseiller défense	Secrétariat d'état à l'Outre-mer	Conseil
Mr	Christophe	Le VISAGE	Conseiller	Secrétariat d'état à la mer	Conseil
Mr	Frederick	HERPERS	Conseiller	Secrétariat d'état à la mer	Conseil
Mr	Gilbert	TROLY	Président	Société de l'industrie minérale	Conseil d'administration
Mr	Julien	DENEGRE	Business development manager	TECHNIP	Département Mining & Metals
Mr	François	LETOURNEUX	Président	Union internationale pour la conservation de la nature	UICN France
Mr	François	SIMARD	Directeur adjoint Pêches et ressources marines vivantes	Union internationale pour la conservation de la nature	UICN Siège en Suisse
Mme	Marcia	MAIA	Directrice adjointe	Univ. de Bretagne Occidentale / OSU-IUEM	IUEM
Mr	Philippe	HUCHON	Directeur	Université de Paris VI	Institut des sciences de la terre (Istep)

# ANNEXE 2 : MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL (JUILLET 2010)

Mme / Mr	Prénom	Nom	Titre / Fonction	Ministère / Organisme	Département, service...
Mr	Dominique	DELORME	Président et directeur exécutif	AREVA	La Mancha
Mr	Patrick	CHRISTMANN	Chef du département	BRGM	Ressources minérales
Mr	Bruno	MARTEL-JANTIN	Ressources minérales Chef de service	BRGM	Economie, intelligence et devpt. durable
Mme	Nathalie	BASSALER	Chef de service	Centre d'analyses stratégique	Service Veille Prospective et International
Mr	Bruno	GOFFÉ	Directeur scientifique adjoint	CNRS / INSU	Direction scientifique
Mr	Alain	CHEILLETZ	Professeur	CNRS / INSU	CRPG
Mr	Jérôme	DYMENT	Chargé de mission	CNRS / INSU	Géosciences marines
Mr	Jean Marc	MONTEL	Directeur	ENSG de Nancy	Direction
Mr	Lev	FILIPPOV	Enseignant-chercheur	ENSG de Nancy	Enseignement
Mr	J. Jacques	REVERDY	Directeur	ERAMET	Branche Nickel
Mr	François	BOURSE	Directeur d'études	Gerpa	Méthodologie de prospective
Mr	Pierre	COCHONAT	Directeur adjoint	Ifremer	Dir. des programmes et de la coordination des projets
Mr	Yves	FOUQUET	Chef de projet	Ifremer	Fluides, transferts chimiques et ressources potentielles
Mr	Denis	LACROIX	Animateur Prospective	Ifremer	PD2S / Cellule Prospective
Mr	Lionel	LEMOINE	Chef de programme	Ifremer	Programmes Ressources minérales et énergétiques
Mr	Walter	ROEST	Expert pour les Géosciences	Ifremer	Dir. de la prospective et la stratégie scientifique
Mr	Jean Paul	PANCRACIO	Expert en droit international marin	Institut de recherches stratégiques de l'école militaire	Direction du domaine d'études 8 : études juridiques
Mr	Pascal	BARRIER	Directeur	Institut Lasalle	Direction
Mr	Olivier	BAIN	Enseignant-chercheur	Beauvais	Dépt. Géologie
Mr	Xavier	FOATA	Chef de bureau	MEDDTL	Bureau des ressources
Mme	Alice	METAYER-MATHIEU	Chargée de mission	MEDDTL	minérales
Mr	François	BERSANI	Président de la section Régulations & ressources	MEFI	Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies
Mr	François	CLIN	Adjoint au directeur	MESR	DG Rech. & innovation
Mr	Pierre	BARBEY	Chargé de mission risques telluriques	MESR	Service Stratégie pour la rech. & l'innovation

Mme / Mr	Prénom	Nom	Titre / Fonction	Ministère / Organisme	Département, service...
Mr	François	LETOURNEUX	Président	Union internationale pour la conservation de la nature	UICN France
Mr	François	SIMARD	Directeur adjoint Pêches et Ressources marines vivantes	Union internationale pour la conservation de la nature	UICN Siège en Suisse
Mme	Marcia	MAIA	Directrice adjointe	Univ. de Bretagne Occidentale / OSU-IUEM	Département IUEM

## ANNEXE 3 : EXPERTS INVITÉS (JUILLET 2010)

Mme / Mr	Prénom	Nom	Titre / Fonction	Ministère / Organisme	Département, service...
Mr	Christian	HOCQUARD	Chercheur	BRGM	Ressources minérales
Mr	Fabrice	BRUNET	Chercheur	CNRS/INSU	Dept. Hydrogène
Mr	Iain	SHEPHERD	DG Industrie	Commission européenne	Ressources minérales stratégiques
Mr	Claire	NOUVIAN	Consultante	Consultante	Biodiversité et environnement profond
Mr	Philippe	MASCLET	Chef de bureau	Délégation Générale à l'Armement	Recherche & innovation ; matériaux et chimie
Mr	Alain	TATOUT	Expert	Délégation Générale à l'Armement	
Mme	Elisabeth	GIBERT-BRUNET	Expert	Délégation Générale à l'Armement	
Mr	Joëlle	GALLERON	Chef de projet	Ifremer	Projet : Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes profonds
Mr	Jean Luc	CHARLOU	Chercheur	Ifremer	Fluides, transferts chimiques et ressources potentielles/ Géochimie, métallogénie.
Mme	Odile	GAUTHIER	Directrice	MEDDTL	Direction de l'eau et de la biodiversité Environnement marin
Mme	Véronique	PERRIER	Expert	MEDDTL	
Mr	Charles	LAMIRAUX	Expert	MEDDTL	
Mr	Elie	JARMACHE	Conseiller-expert	Secrétariat général de la Mer	Service juridique
Mr	Philippe	ESPINASSE	Directeur	TECHNIP	Technologies d'extraction sous marine des minerais

# ANNEXE 4 : GLOSSAIRE RELATIF A LA MÉTHODE DES SCÉNARIOS

**Variable** : facteur ou paramètre qui influe sur le système et dont la connaissance peut contribuer à en comprendre l'état, voire à en maîtriser l'évolution. Élément du système qui exerce ou est susceptible d'exercer une influence sur le problème étudié. Une variable de prospective est souvent un mélange de facteurs et d'acteurs. Une variable est dite « exogène » si elle n'est pas spécifique au domaine étudié (ex : économie mondiale), et « endogène » si elle est liée à l'objet de l'étude (ex : technologies de la métallurgie).

**Variation-clés** : variables les plus influentes sur le système considéré.

**Hypothèse** : évolution possible d'une variable à un horizon donné.

**Composante** : ensemble de variables liées autour d'une même thématique ou d'un même groupe d'acteurs.

**Scénario** : la description du système et son évolution à un horizon donné.

**Enjeu** : problématique identifiée qui porte en elle un potentiel de changements, positifs (opportunités) ou négatifs (menaces) et qu'il est nécessaire de prendre en compte pour construire une prospective et déterminer une stratégie. L'enjeu est ce qui, sur le terrain ou le champ de bataille, peut être perdu ou gagné. Un des rôles de la prospective consiste à identifier des enjeux futurs, imaginables, et, surtout de long terme.

# ANNEXE 5 : DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE POUR LA PROSPECTIVE SUR LES RESSOURCES MINÉRALES TERRESTRES OU MARINES

## France

- 1 - Livre bleu des engagements du Grenelle de la mer (juillet 2009).
- 2 - MEEDAT - Conclusions du groupe de réflexion sur « Matières premières stratégiques et sécurité d'approvisionnement » - 2008.
- 3 - Article « Les ressources minérales du futur sont-elles au fond des mers ? » 2009, 25 p. Y. Fouquet - Ifremer - Brest. Ouvrage collectif sur la « Chimie et la Mer ».
- 4 - Article « Hydrates de Gaz et Hydrogène Naturel - ressources de la mer du futur » 2009, 22 p. J.-L. Charlou - Ifremer Brest. Ouvrage collectif sur la « Chimie et la Mer ».
- 5 - Secrétariat Général de la Mer - « Une ambition maritime pour la France » - Rapport du Groupe Poséidon - décembre 2006.
- 6 - Rapport Attali - 2008 - décembre 2010 : Sécuriser l'approvisionnement des ressources minières.
- 7 - Groupe de Travail « Stratégie outre-mer » Stratom - Rapport 2011.

## Europe

- 8 - Communication de la commission au Parlement européen et au Conseil sur une « initiative matières premières » - répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe. (4/11/2008).
- 9 - eMINEnt : *European Mineral Intelligence Network - 2009*.
- 10 - CriSys : *Critical Mineral Deposits Information System - 2009*.
- 11 - DSF (Deep Sea Frontier) « *Science Challenges for a sustainable future* » - 2008.
- 12 - « *Analysis of the competitiveness of the non-energy extractive industry in the EU* » commission staff working document - 2007.
- 13 - Communication de la commission au Parlement européen, au Conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions sur « Une politique maritime intégrée pour l'Union européenne » (10/10/2007).
- 14 - *Critical Raw materials for the EU - report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials - June 2010*.



# ANNEXE 6 : ATOUTS ET CONTRAINTES DES PRINCIPAUX MINERAIS D'ORIGINE MARINE PROFONDE

(SOURCES : BRGM, IFREMER, MEDDTL , UE, USGS)

	Métal critique Europe 2030	Métal critique USA	Présence dans Remima	Type de minéralisation océanique	Concentrations et approvisionnement
Gallium	oui	oui	à vérifier	sulfures hydrothermaux	Chine, Allemagne, Kazakhstan, Ukraine
Germanium	oui	non	oui	sulfures hydrothermaux	Chine (67 %), Russie (4 %), USA (4 %)
Indium	oui	oui	oui	sulfures hydrothermaux	Chine (52 %), Corée (14 %)
Antimoine	oui	non	sur quelques sites	sulfures hydrothermaux	Chine (89 %)
platinoïdes Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt	oui	oui Rh, Pt, Pd	oui	Encroûtements	Afrique du sud et Russie (90 %)
Magnésium	oui	non	oui	Sites hydrothermaux mantelliques	Chine (56 %)
Graphite	oui	non	non	-	Chine (73 %), Inde (12 %)
Tantale	oui	oui	à vérifier	-	Brésil (26 %), Mozambique (16 %), Rwanda (15 %)
Béryllium	oui	non	non	-	USA (89 %), Chine (10 %)
Fluor	oui	non	non	-	Chine (56 %), Mexique (18 %)
Niobium	oui	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Brésil (92 %)
Terres rares La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	oui	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Chine (99 %)
Yttrium	oui	oui	à vérifier	-	Chine (99 %)
Tungstène	oui	non	traces	Nodules	Chine (85 %)
Argent	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Pérou (18 %), Mexique (16 %), Chine (13 %)
Cobalt	non	non	oui élevé	Encroûtements et sulfures	Congo (51 %), Zambie (12 %)
Zinc	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Chine (30 %), Pérou (13 %), Australie (12 %)
Cuivre	non	oui	oui élevé	sulfures, nodules, encroûtements	Chili (34 %), Pérou (8 %), Chine (7 %), USA (7 %)
Nickel	non	non	oui	Nodules - Encroûtements	Russie (17 %), Indonésie (15 %), Philippines (10 %), Nlle Calédonie (9 %)
Or	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Chine (14 %), Australie (10 %), USA (9 %)
Titane	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Afrique du sud (19 %), Australie (18 %), Chine (10 %)
Manganèse	non	oui	oui élevé	Nodules - Encroûtements - hydrothermal BT°	Chine (21 %), Australie (18 %), Afrique du sud (17 %), Gabon (11 %)
Thallium	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Canada, Europe, USA
Vanadium	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Chine (41 %), Afrique du sud (32 %), Russie (25 %)
Lithium	non	oui	non	non	Chili (35 %), Australie (34 %), Chine (18 %)
Tellure	non	oui	oui	sulfures hydrothermaux	Japon, Russie, Pérou, Canada
Sélénium	non	non	oui	sulfures hydrothermaux	Allemagne (30 %), Belgique (9 %), Canada (8 %)

	Production annuelle Source : USGS	Indicateur de tension Europe 2030	Recyclabilité	Substituabilité	réserves	Type gisements	Teneurs d'exploitation
Gallium	106 t (2010)	4,0	oui	oui pour certaines applications	?	Bauxites	
Germanium	120 t (2010)	2,2	oui 30%	non documenté	?	Sulfures Zn	
Indium	574 t (2010)	3,3	faible	oui pour certaines applications	?	Sulfures Zn	1 à 100 ppm
Antimoine	135 000 t (2010)	0,01	faible	faible	1 800 000 t		
platinoïdes Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt	Pt : 178 t (2009) Pd : 195 t (2009)	1,3	oui (60 t en 2009)	oui entre platinoïdes	71 000 t		
Magnésium	5 Mt (2009)	-	limité	non documenté	2 300 Mt		
Graphite	1,1 Mt (2010)	-	possible		71 Mt		
Tantale	670 t (2010)	1,0	faible	potentiel	110 000 t		
Béryllium	190 t (2010)	-	faible	faible	?		
Fluor	5,4 Mt	-	faible	faible	230 Mt		
Niobium	63 000 t (2010)	0,03	oui (20%)		2,9 MT		
Terres rares La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	130 000 t (2010)	1,7	faible	oui mais perte de performance	110 Mt		
Yttrium	8900 t (2010)		faible	faible	540 000 t		
Tungstène	61 000 t (2010)	1,0	oui	faible	2,9 Mt		
Argent	22 200 t (2010)	0,8	Oui (1600 t en 2010)	oui	510 000 t		
Cobalt	88 000 t (2010)	0,4	Oui (24 % en 2010)	limité	7,3 MT		
Zinc	12 MT (2010)	-	oui	oui	250 Mt		
Cuivre	16,2 Mt (2010)	0,2	oui	oui	630 Mt		
Nickel	1,5 Mt (2010) réserves terrestres 76 Mt	-	oui	moyenne	76 Mt		
Or	2500 t (2010)	-	oui	oui	51 000 t		
Titane	6,3 Mt (2010)	0,3	non	non	690 Mt		
Manganèse	13 Mt (2010)	-	faible	non	630 Mt		
Thallium	10 t (2010)	-	non	faible	380 t	Zinc, Charbon	
Vanadium	56 000 t (2010)	-	faible	oui	13,6 Mt		
Lithium	25 300 t (2010)	-	faible	oui	13 Mt		
Tellure	non disponible → 125 t (2010)	-	non	oui	22 000 t		
Sélénium	2260 t (2010)	-	non	oui	88 000 t		

Remarque : plusieurs éléments critiques sont directement liés aux concentrations en métaux de base tels que cuivre et zinc.

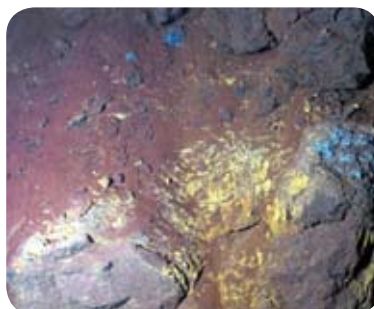


Figure 12 : Sulfure massif hydrothermal fossile (-3 500m).  
En jaune : soufre ; en bleu : chlorures de cuivre ; en brun : oxydes de fer.

# Crédits photos

## Couverture

**En fond :** © Ifremer-Nautile/Campagne Futuna 2010

*Cheminées de sulfures inactives*

## 4<sup>e</sup> de couverture

**Vignettes, de gauche à droite :**

- *Nodules*  
© Ifremer - Nautile / Nixonaut
- *Encroûtements*  
© Ifremer / Y. Fouquet
- *Cheminée de sulfure de cuivre*  
© Ifremer - Nautile / Nautilau
- *Sulfures massifs*  
© Ifremer - Victor / Serpentine

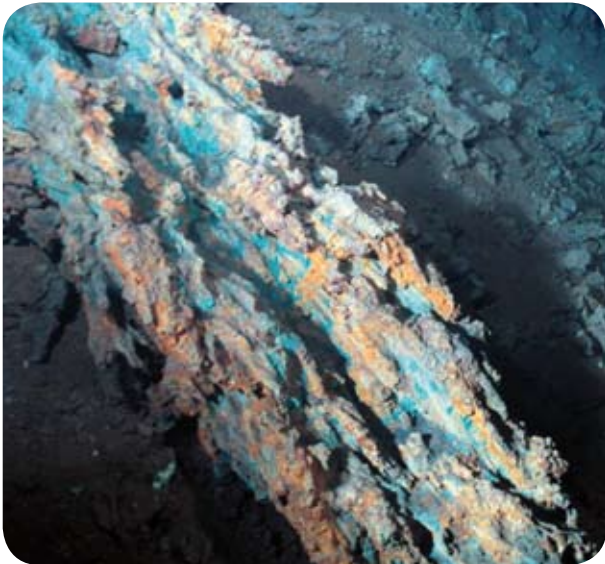


Figure 13 : Ancienne cheminée riche en cuivre (- 3 000 m).

## Pages intérieures

**Page 9 , de gauche à droite :**

- *Haut : Nodule*  
© Ifremer / Y. Fouquet  
*Champ de nodules dans le Pacifique*  
© Ifremer - Nautile / Nixonaut
- *Milieu : encroûtement*  
© Ifremer / Y. Fouquet  
*Encroûtement en Polynésie française*  
© Ifremer
- *Bas : Cheminée de sulfure de cuivre*  
© Ifremer / Y. Fouquet  
*Champ hydrothermal actif dans le Sud-Ouest Pacifique*  
© Ifremer - Nautile / Nautilau

**Page 10 , de gauche à droite :**

- *Nodule*  
© Ifremer / Y. Fouquet
- *Encroûtement*  
© Ifremer / Y. Fouquet
- *Cheminée de sulfure de cuivre*  
© Ifremer / Y. Fouquet

**Page 11** © Ifremer / Y. Fouquet

*Localisation des sites hydrothermaux et des principaux champs de nodules à l'échelle mondiale*

**Page 21** © ISA

*Position des permis « Nodules » sur la bande Clarion-Clipperton*

**Page 27** © Ifremer / Futuna

*Caldera volcanique sous-marine*

**Page 34** © Ifremer - Victor / Serpentine

*Sulfure massif hydrothermal fossile (3 500m).*

**Page 35** © Ifremer - Victor / Serpentine

*Affleurement d'anciens sulfures hydrothermaux massifs sur la dorsale Atlantique*



L'exploration des espaces océaniques profonds intègre maintenant les ressources minérales en raison de la découverte de diverses formes de minerais présentant des concentrations élevées en certains métaux. Les nodules polymétalliques ont ainsi été identifiés dès les années 1970 (fer, manganèse, nickel...), puis les encroûtements de manganèse (cobalt, platine...), les sulfures hydrothermaux (cuivre, zinc, or, argent...) et récemment, l'hydrogène naturel. Ces minéralisations contiennent aussi des métaux peu abondants mais précieux pour diverses industries de pointe. Les incertitudes sur les réserves terrestres de plusieurs métaux sur le moyen terme justifient de chercher à diversifier les sources d'approvisionnement et d'étudier le potentiel de ces ressources marines en intégrant quatre enjeux : la connaissance des gisements, les technologies d'exploration et d'exploitation, la biodiversité et les impacts sur l'environnement profond et enfin les partenariats stratégiques pour le France et l'Europe.

Concernant les gisements exploitables et les métaux associés, les conclusions distinguent :

- ▶ **les sulfures**, dont l'exploration et l'exploitation potentielle seront au centre de tous les enjeux: géopolitiques (mise en place de permis internationaux); environnementaux, scientifiques (tectonique, métallogénie, géochimie, biologie...) et économiques.
- ▶ **les encroûtements**, dont l'exploitation n'interviendrait pas avant 2030 malgré un fort potentiel.
- ▶ **les nodules polymétalliques**, dont l'exploitation apparaît possible au plan technique, et hypothétique au plan économique au vu des réserves terrestres. Mais les nodules et les encroûtements recèlent des métaux rares qui n'avaient pas été pris en compte par le passé.
- ▶ **l'hydrogène naturel** : les connaissances actuelles, scientifiques et technologiques, ne permettent pas d'envisager une exploitation avant le très long terme.

**La France dispose d'espaces profonds dans les trois océans, de moyens humains et technologiques au premier rang mondial et d'un savoir-faire de plus de quarante années d'expérience à la mer comme en laboratoire. Les ressources minérales marines profondes offrent l'opportunité pour notre pays et *a fortiori* pour l'Europe, de combiner recherche scientifique, progrès technologique, valorisation économique, sécurité pour certains métaux et participation à la mise en place collective d'une gestion durable de ce nouvel espace.**

#### Ifremer

155, rue Jean-Jacques Rousseau  
92138 Issy-les-Moulineaux Cedex  
Tél : (33) 01 46 48 21 00  
Fax : (33) 01 46 48 21 21  
[www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr)

