



Directeurs de la publication

Alain Fuchs (CNRS), François Jacq (Ifremer)

Pilotes scientifiques

Jérôme Dymont (CNRS), François Lallier (CNRS), Sylvain Lamare (CNRS), Nadine Le Bris (CNRS), Olivier Rouxel (Ifremer), Pierre-Marie Sarradin (ifremer)

Coordination éditoriale

Coralie Coumert (CNRS), Marie Morineaux (Ifremer), Julie Tourolle (Ifremer)

Contact

Sylvain Lamare (CNRS) : sylvain.lamare@cnrs-dir.fr

Le présent document constitue le rapport d'une expertise scientifique collective confiée par le **ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie** (CGDD-direction de la recherche et de l'innovation) et le **ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** (direction générale de la recherche et de l'innovation) au CNRS et à l'Ifremer.

Le rapport d'expertise et sa synthèse ont été élaborés par les experts scientifiques sous la responsabilité du CNRS et de l'Ifremer.

Ces documents sont disponibles sur les sites web institutionnels du CNRS et de l'Ifremer.

Pour citer ce document

J. Dymont, F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, J. Tourolle (coord.), 2014. Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS – Ifremer, 110 p. environ

Remerciements

L'équipe-projet remercie très vivement tous les contributeurs scientifiques, les membres du comité de pilotage et tous les personnels des ministères de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MENESR) et des Outre-mer, du CNRS et de l'Ifremer ayant contribué à ce travail.

Nous remercions tout particulièrement Claire HUBERT, Laurent BELANGER, Stéphanie THIEBAULT, Françoise GAILL, Michel DIAMENT, Patrick VINCENT, Stéphanie BELNA, Jean-Michel BRUNET, Marie-Pierre CAMPO, Pierre COCHONAT, Bernard COMMERE, Ophélie DARSES, Rémi GALIN, Quentin GAUTIER, Léa GERARD, Magali GIRARD, Bruno GOFFE, Alain LAGRANGE, Yan LE ROUX, Marcia MAIA, Loïc MALGORN, Didier MARQUER, Lionel MOULIN, Catherine RODOLPHE-MEROT, Aurélie THOMASSIN et Catherine THOUIN pour leur relecture attentive et leurs conseils avisés.



Une avancée majeure pour la recherche au service du développement durable

Le développement de l'économie mondiale dans un monde aux ressources finies entraîne de fortes tensions sur l'approvisionnement en matières premières, qui rendent nécessaire d'une part la recherche d'une économie plus sobre à cet égard et d'autre part le recours à de nouveaux gisements à exploiter. Si les explorations scientifiques menées dans les grands fonds marins depuis une quarantaine d'années ont permis de repérer de tels gisements pour les métaux stratégiques, il est indispensable de s'interroger sur les impacts de leur exploitation, notamment en matière de biodiversité, d'écosystèmes et d'habitats profonds.

La France, qui possède le deuxième territoire maritime au niveau mondial, est particulièrement concernée par ces enjeux. Forte à la fois d'établissements scientifiques très investis dans la connaissance des environnements profonds et de sociétés minières et d'ingénierie de rang mondial, notre pays a la capacité de convertir ce potentiel en véritables opportunités économiques. Mais il a aussi l'obligation de concilier ces activités avec la préservation des milieux océaniques profonds et de l'ensemble des services qu'ils peuvent rendre à la société, qui restent, pour une part d'entre eux, encore trop mal connus. Il était donc impératif d'identifier et d'apprécier, pour mieux les maîtriser, les conséquences environnementales de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes.

C'est dans cette perspective que le Commissariat général au développement durable du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, en relation avec la Direction générale de la recherche et de l'innovation du Ministère chargé de la recherche, a confié au CNRS et à l'Ifremer la responsabilité d'une expertise scientifique collective sur les impacts environnementaux pouvant résulter de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes.

Les apports d'une démarche de cette nature, qui mobilise, sous l'autorité d'organismes dont la valeur est incontestée, une vaste communauté de chercheurs, dans l'analyse rigoureuse de la littérature scientifique et technologique internationale sur l'ensemble des questions soulevées par un sujet donné, ne sont plus à démontrer. L'expertise ainsi documentée dresse en effet un état des lieux critique et exhaustif des acquis scientifiques disponibles. Elle permet, au-delà de ces acquis, de repérer les lacunes, les interrogations et les incertitudes, et d'appréhender les axes des recherches qui restent à entreprendre, pour faire encore progresser les connaissances sur des points clés dans le champ considéré.

Cette expertise scientifique collective, qui représente une avancée majeure au plan mondial, est la première réalisation du Programme national de recherche et d'accès aux ressources minérales des grands fonds marins, arrêté par le Comité interministériel de la mer du 2 décembre 2013. Destinés à l'ensemble des acteurs du monde de la mer, - élus, administrations, opérateurs industriels et technologiques, ONG, chercheurs, étudiants -, le rapport et sa synthèse ont vocation à constituer une base de travail partagée, pour orienter les travaux scientifiques et conduire l'exploration et l'exploitation dans ce domaine dans une double perspective de gestion économe des ressources et de développement durable.

Jean-Paul ALBERTINI

Commissaire général au développement durable (MEDDE)

Roger GENET

Directeur général de la recherche et de l'innovation (MESR)

Avant-propos

L'accroissement de la demande mondiale en métaux nécessite d'engager aujourd'hui une réflexion sur les potentialités d'exploitation des ressources minérales marines profondes. Face à la montée en puissance, au niveau européen et international, des projets d'exploration minière en mer profonde pour accéder aux ressources minérales des fonds marins, le développement d'activités de recherche dans le domaine des grands fonds océaniques apparaît aujourd'hui primordial. Le biome (ou macroécosystème) profond constitue le plus vaste habitat de la planète (75% de la surface océanique est comprise entre 1000 et 6000 m de profondeur). Les connaissances fondamentales concernant le biome tout comme le milieu physique sont encore très lacunaires.

C'est ainsi qu'à la demande du MEDDE, une expertise scientifique collective (ESCo) sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes a été conduite, en partenariat entre le CNRS et l'Ifremer. Elle a été réalisée en complément des prospectives publiées récemment par ces derniers, en 2008 sur les Sciences de la Terre pour l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS, en 2011 sur les ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030 pour l'Ifremer, et en 2013 avec les parutions du Programme Mer et de la prospective mer de l'Institut Ecologie et Environnement (InEE) du CNRS.

L'exploration et l'étude des écosystèmes des grands fonds, afin d'envisager les conditions d'exploitation durable de leurs ressources minérales et énergétiques, sont des grandes priorités scientifiques de nos organismes.

Les grands fonds océaniques représentent des enjeux majeurs en raison des processus géologiques et géodynamiques dont ils sont le siège, de leur potentiel en terme de ressources, de la richesse et des particularités de la biodiversité qui leur sont associées, ou encore des défis technologiques que représente leur observation. À l'heure où les pressions anthropiques s'y exercent de manière de plus en plus prégnante (pêcheries en eaux profondes, exploitations pétrolières et minières, stockage de déchets...), les effets du changement global, via la circulation des masses d'eau, ou encore le rôle des processus magmatiques, tectoniques et hydrothermaux dans le bilan global de la Terre, doivent aussi être mieux appréhendés. Préciser le fonctionnement et la dynamique de ces écosystèmes particuliers est absolument nécessaire, considérant qu'ils ne répondent pas aux rythmicités connues pour d'autres régions de l'océan.

Si les services écosystémiques qu'assurent les grands fonds marins commencent à être reconnus, les conditions permettant le maintien et le fonctionnement de la biodiversité profonde dans

des habitats instables et fragmentés, dépendant de processus géologiques eux aussi mal connus, sont mal cernées. La connaissance scientifique reste encore partielle dans le domaine des processus géologiques, hydrothermaux et métallogéniques : la science n'est pas encore en situation de répondre quant à la vulnérabilité de ces systèmes ou sur leur capacité de résilience et ainsi de contribuer efficacement à leur préservation.

Il était donc important que les principaux organismes de recherche français impliqués sur les environnements profonds unissent leurs efforts et les savoirs de leurs chercheurs pour faire un état des lieux le plus exhaustif possible concernant les milieux marins profonds susceptibles d'abriter des ressources minérales profondes et sur les ressources elles-mêmes. Les questions de recherche ainsi établies rejoignent intégralement les objectifs affichés dans le programme « Mer » de l'Alliance Allenvi.

Cette expertise scientifique collective a permis de faire le point sur les besoins de connaissances relatives aux écosystèmes et milieux profonds susceptibles d'être exploités dans le futur. Le besoin fort, ainsi établi, de conduire des travaux de recherche et d'exploration océanique sera traité dans le cadre du « programme national de recherche et d'accès aux ressources des grands fonds marins » en cours de montage sous l'égide du Secrétariat Général de la Mer, du MEDDE et du MESR.

Nos organismes, qui mènent depuis plusieurs décennies des programmes de recherche sur les environnements des grands fonds, tant sur les ressources minérales concernées (sulfures hydrothermaux, nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères) et leur genèse que sur leur importance écologique, entendent ainsi contribuer fortement à ce programme.

Le lecteur de cette expertise trouvera donc dans les pages qui suivent un état des lieux le plus exhaustif possible, permettant à chacun d'appréhender les connaissances actuelles sur ces milieux, ainsi que celles qui restent à acquérir. Elle se veut aussi être une base des savoirs permettant d'aider à l'élaboration des politiques publiques dans le cadre des futures demandes de permis d'exploration minière.

L'ambition scientifique associée à ce travail est aussi de renforcer la place importante occupée par la France par le développement d'une stratégie marine ambitieuse dans le domaine de la recherche et de l'innovation, tout en répondant aux exigences environnementales de notre planète aux ressources limitées et aux régulations fragiles.

Mieux connaître et mieux comprendre pour mieux anticiper constituent ainsi les mots clés de cette expertise collective réalisée en partenariat entre le CNRS et l'Ifremer.

Stéphanie THIEBAULT

Directrice de L'INEE
CNRS

Michel DIAMENT

Directeur par intérim de l'INSU
CNRS

Patrick VINCENT

Directeur Général Délégué
IFREMER

Sommaire

Une avancée majeure pour la recherche au service du développement durable	3
Avant-propos	5
1. Contexte et objectifs de l'expertise	9
1.1. Contexte de l'ESCo	9
1.2. Objectifs de l'ESCo	10
1.3. Méthode de l'ESCo	10
1.4. Structure de la synthèse	11
2. Les ressources minérales marines profondes	13
2.1. Cadre réglementaire	14
2.2. Connaissance et degré d'exploration des différentes ressources	16
→ Les nodules polymétalliques	17
→ Les encroûtements	18
→ Les sulfures hydrothermaux	19
2.3. Degré d'évaluation et d'exploitation actuel des ressources minérales marines	21
→ Les nodules polymétalliques	21
→ Les encroûtements	21
→ Les sulfures hydrothermaux	22
2.4. Conclusion	24
3. Techniques d'exploration et d'exploitation	25
3.1. Techniques d'exploration scientifique des ressources minérales	25
3.2. Techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds	26
3.3. Techniques d'exploitation utilisées ou en cours de développement par les entreprises et organismes de recherche	27
→ Nodules	27
→ Encroûtements hydrogénétiques (ou cobaltifères)	29
→ Sulfures hydrothermaux	29
→ Autres ressources liées à l'hydrothermalisme océanique	30
3.4. Entreprises, acteurs, états impliqués (opérateurs et fournisseurs)	30
3.5. Conclusion sur les points de vigilance	32
4. Biodiversité, milieux et écosystèmes profonds	35
4.1. Introduction	35
4.2. Description des écosystèmes directement associés aux ressources minérales	38
→ Nodules polymétalliques	38
→ Encroûtements cobaltifères	39
→ Sulfures hydrothermaux	41
4.3. Facteurs gouvernant la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes	43
4.4. Populations et communautés	47
4.5 Conclusion	52

5. Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques	53
5.1. Impacts environnementaux liés à l'exploration	55
5.2. Impacts environnementaux liés à l'exploitation	56
→ Impacts spécifiques aux nodules polymétalliques	56
→ Impacts spécifiques aux encroûtements cobaltifères	59
→ Impacts spécifiques aux sulfures hydrothermaux	62
→ Impacts spécifiques à l'hydrogène	64
→ Impacts d'exploitation communs aux nodules, encroûtements et sulfures	64
5.3. Conséquences économiques possibles	73
5.4. Conclusion.	74

6. Préservation de l'environnement et gestion des impacts	75
6.1 Les instruments de préservation de l'environnement, prévention ou précaution	75
6.2 Les stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux	80
6.3 Conclusion	84

7. Perspectives de recherche et de développement	85
7.1. Les besoins d'acquisition de connaissances fondamentales	85
7.2. Evaluer les services écosystémiques et développer des mesures en faveur de la gestion des environnements profonds	88
7.3. Conclusion	89

Annexe 1 : Cahier des charges	91
Annexe 2 : Méthodologie de l'ESCo et analyse des corpus de références	95

1. Contexte et objectifs de l'expertise

1.1. Contexte de l'ESCO

Les métaux sont des matières premières omniprésentes dans les objets de notre quotidien, aussi bien basiques que de haute technologie. L'économie mondiale, en raison d'une forte demande des grands pays émergents (Chine et Inde), traverse de profondes mutations avec des conséquences considérables pour la demande globale en ressources naturelles. Cette forte demande, accompagnée d'une envolée des cours des ressources énergétiques et minérales, a obligé les pays industrialisés à diversifier les approvisionnements en recherchant de nouveaux gisements « non conventionnels » tels que ceux rencontrés dans les grands fonds marins. A l'échelle internationale, on assiste à une relance dans l'exploration des ressources minérales, non seulement sur les continents mais aussi dans les océans, qui couvrent 71 % de la surface terrestre et dont 60 % atteignent des profondeurs dépassant les 2 000 mètres. Les ressources minérales marines profondes constituent des réserves potentielles importantes de métaux : cobalt, fer, manganèse, platine, nickel, or, argent, cuivre, terres rares, etc. Présentes dans tous les océans, elles sont généralement situées à des grandes profondeurs, variant entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de mètres, avec un accès souvent difficile.

Cette expertise se concentre donc essentiellement sur les ressources minérales, situées à plus de 300 m de profondeur, qui ont suscité un intérêt particulier en vue d'une exploitation minière :

- les nodules, souvent connus sous le terme de nodules polymétalliques ;
- les encroûtements, souvent connus sous les termes d'encroûtements (ou croûtes) cobaltifères ou hydrogénétiques¹ ;
- les sulfures hydrothermaux polymétalliques ;
- l'hydrogène naturel, associé à certains sites hydrothermaux, mais de manière plus spéculative quant à son potentiel en tant que ressource.

D'autres ressources marines profondes peuvent également être ajoutées à cette liste, mais constituent soit un intérêt ponctuel comme les sédiments et saumures métallifères de la Mer Rouge qui n'ont pas d'équivalent dans d'autres domaines océaniques, soit un intérêt marginal compte tenu de la difficulté d'extraction des ressources, comme les sédiments enrichis en terres rares.

Les argiles et boues métallifères sont également considérées mais de façon moins approfondie, la France n'y ayant pas d'accès envisageable à court et moyen terme.

L'écologie des écosystèmes associés à ces ressources minérales est encore très mal connue, de même que les liens et interactions avec les sites plus distants. Les conséquences environnementales réelles que pourrait avoir l'exploitation des ressources minérales restent incertaines.

1. hydrogénétique: formé par précipitation à partir de l'eau de mer

Par ailleurs, considérant les services écologiques rendus par ces sites, de manière plus ou moins directe, et compte-tenu qu'ils sont souvent déjà exploités directement par l'Homme, ou que certains usages passés ou présents peuvent influencer sur les conditions d'exploitation, il convient également de s'interroger sur l'impact possible de l'exploitation de ces ressources minérales sur les économies des nations établies à proximité des sites concernés.

1.2. Objectifs de l'ESCO

L'ESCO sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes répond à une demande du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Elle a vocation :

- 1)** à donner aux pouvoirs publics tous les éléments scientifiques disponibles et fiables, leur permettant d'évaluer et de répondre le plus justement possible aux demandes qui leur sont soumises sur les ressources minérales marines profondes ;
- 2)** à identifier les besoins nouveaux de connaissances et des études scientifiques qu'il conviendrait de mener pour combler certaines lacunes dans nos connaissances ;
- 3)** Les résultats de l'expertise pourront également nourrir d'autres réflexions visant à définir le cadre réglementaire que devront respecter les industriels dans la perspective d'une exploitation future des ressources minérales marines dans la ZEE française.

Le rapport d'expertise est étayé, par un corpus total d'un peu plus de 13 900 références, tous chapitres confondus, composé essentiellement d'articles scientifiques et de rapports techniques. Les experts en ont extrait, analysé et assemblé les éléments pertinents pour éclairer les questions posées, par une sélection d'environ 2 000 références considérées comme d'intérêt majeur.

1.3. Méthode de l'ESCO

L'équipe-projet est constituée de cinq pilotes scientifiques, soutenus par trois responsables de coordination. Quarante-huit autres chercheurs et ingénieurs ont été mobilisés pour leurs compétences spécifiques relevant de la géologie, de la géochimie, de la biochimie, de l'écologie, de la génétique, de l'économie, du droit...

L'expertise repose dans sa grande majorité, sur un corpus bibliographique de références scientifiques nationales et internationales certifiées (articles scientifiques, ouvrages de références...). Certaines questions, notamment technologiques, juridiques et économiques, ayant fait l'objet de très peu de publications scientifiques s'appuient néanmoins sur des données existantes, issues de rapports et de documents techniques d'organismes gouvernementaux et non gouvernementaux, nationaux et internationaux, ainsi que de données industrielles. Toutes ces informations ont été analysées et critiquées par les experts avant d'être présentées dans le rapport d'expertise.

Parmi toutes les références identifiées en amont de la rédaction du rapport, certaines se rapportaient à des documents de travail confidentiels, dont les membres de l'équipe-projet connaissaient l'existence, ou à certaines données non encore publiées (cas des données des campagnes Futuna toujours confidentielles et non publiées par exemple). Ce type d'information n'a donc pas été intégré dans le rapport d'expertise, malgré le grand intérêt qu'il représente. Il en est de même pour certaines données technologiques et industrielles.

L'ESCo ne prétend fournir ni jugement, ni émettre de recommandations en direction des pouvoirs publics et des industriels souhaitant s'investir dans l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Elle s'efforce d'être la synthèse la plus complète possible des connaissances existantes au moment de sa rédaction sur les impacts d'une exploitation minière sous-marine à de grandes profondeurs, grâce à une démarche interdisciplinaire associant géosciences, sciences du vivant et sciences juridiques, économiques et sociales.

Elle alerte sur les manques de connaissances à combler et les perspectives de recherche et de développement indispensables avant d'envisager une exploitation durable de ces ressources minières sous-marines profondes.

La synthèse du rapport d'expertise constitue une version condensée des connaissances scientifiques réunies dans le rapport. Elle met à profit des recommandations du Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel et de la Biodiversité (CSPNB), saisi par le Ministère en charge de l'Écologie d'une version préliminaire du rapport d'expertise.

1.4. Structure de la synthèse

La synthèse reprend la trame du rapport d'expertise. Les différentes ressources minérales marines profondes et leurs caractéristiques sont présentées dans le chapitre deux, ainsi que le cadre juridique des exploitations minières sous-marines en eaux profondes.

Les technologies d'exploration et d'exploitation font l'objet du troisième chapitre.

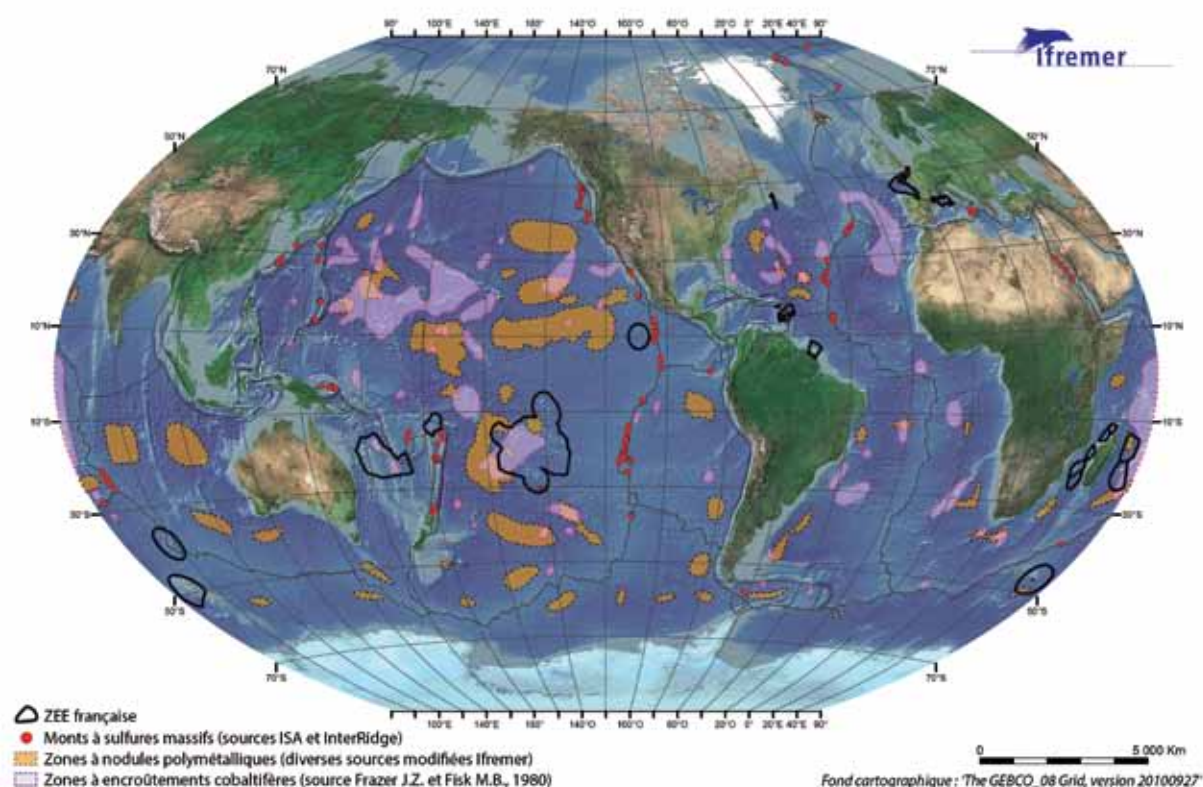
Le quatrième chapitre décrit la biodiversité, les milieux et les écosystèmes associés aux grands types de ressources minérales marines profondes et présente l'état des connaissances relatives au fonctionnement de ces écosystèmes et de leurs interactions avec les autres compartiments marins.

Le cinquième chapitre recense les impacts environnementaux potentiels et leurs conséquences économiques possibles.

Le sixième chapitre présente les méthodes de préservation et de gestion des impacts existantes. Enfin, un dernier chapitre conclusif ouvre sur les grandes questions de recherche à développer, identifiées par l'expertise.

2. Les ressources minérales marines profondes

Le Chapitre 2 a pour objectif de donner un aperçu des connaissances scientifiques actuelles concernant la localisation, la formation et la composition des différentes ressources minérales marines.



Cet état des connaissances a permis de présenter le degré d'évaluation de l'exploitation des ressources minérales qui font l'objet de permis d'exploration en vue d'exploitation minière.

Figure 1 Carte de localisation des principaux champs à nodules et zones à encroûtements ainsi que les principaux sites hydrothermaux dans les grands fonds océaniques. Source Ifremer, Laboratoire de Géochimie et de Métallogénie, InterRidge, ISBQ

Les explorations scientifiques menées depuis une quarantaine d'années ont identifié la diversité et la complexité des processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration des métaux dans les grands fonds. Les études de la circulation de fluides dans la croûte océanique, du contexte tectono-magmatique et sédimentaire, ainsi que des processus océaniques dans la colonne d'eau ont été déterminantes pour la compréhension des dépôts métallifères océaniques mais aussi de la construction et de l'évolution spatio-temporelle des habitats océaniques profonds.

2.1. Cadre réglementaire

L'accès aux ressources minérales marines aux fins d'exploration et d'exploitation n'est pas libre. Ces activités ont un régime dépendant de leur localisation : la zone économique exclusive (ZEE) et le plateau continental ou les grands fonds marins au-delà des limites de juridiction des Etats, appelée la Zone. Des conventions et des règlements internationaux et nationaux viennent petit à petit encadrer l'accès aux ressources minérales marines profondes mais la méconnaissance de ces écosystèmes induit un faible nombre de législations spécifiquement applicables à ces ressources minérales sous-marines.

La Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM), également appelée « Convention de Montego Bay » ou « United Nations Convention on the Law Of the Sea » (UNCLOS) est un traité international fondamental entré en vigueur en 1994. Il reconnaît :

- aux Etats côtiers le droit d'exercer des droits souverains sur la ZEE et le plateau continental ;
- la non-appropriation nationale des ressources du fond des mers au-delà des juridictions nationales et l'affirmation qu'elles sont réservées à l'humanité. Les fonds marins et leur sous-sol, au-delà des limites de la juridiction nationale, deviennent patrimoine commun de l'humanité.

	Phase 1- Prospection
Droits	S'opère librement. La prospection débute suite à l'envoi et l'examen d'une notification de prospection par l'Autorité.
	Les prospecteurs n'ont aucun droit exclusif sur les ressources de la zone prospectée. Des quantités raisonnables de minéraux peuvent toutefois être prélevées pour des fins expérimentales et non commerciales.
	Plusieurs prospecteurs peuvent prospecter la zone visée simultanément.
Demande auprès de l'AIFM	Envoi d'une « notification de prospection » www.isa.org.jm/files/documents/FR/Regs/Code-Annex1.pdf
	La notification peut être présentée par : - Dans le cas d'un Etat, par l'autorité désignée à cet effet par ledit Etat ; - Dans le cas d'une entité, par les représentants désignés de celle-ci ; - Dans le cas de l'Entreprise, par l'autorité compétente de celle-ci.
	Examen de la notification de prospection sous 45 jours par le Secrétaire général. Le Secrétaire général informe de temps en temps tous les membres de l'Autorité de l'identité des prospecteurs et des zones prospectées.
Durée	Non limitée dans le temps.
Terme	Mis lors de l'approbation d'un plan de travail dans la zone de prospection.
Droits afférents	Aucun
Secteur attribué	Maximum de 150 000 km ²
Délivrables	Rapport annuel
Formation à donner	Pas d'obligation de formation

* Tout ce qui concerne l'Entreprise est hypothétique et doit être relativisé car l'Entreprise est gelée dans son existence même. Les conditions de son réveil sont bien encadrées dans l'accord de 1994 et cela a fait l'objet d'un débat lors de la 19^e session en 2013. ** Ces prorogations ne sont accordées que pour des périodes ne dépassant pas 5 ans chacune et seule-

En fonction de leur localisation, les activités d'exploration ou d'exploitation des ressources minérales marines profondes ne seront pas régies par les mêmes législations :

Dans la mer territoriale (12 milles nautiques à partir de la ligne de base), chaque pays est souverain. La France y dispose par exemple du monopole de pêche et les navires étrangers d'un droit de passage inoffensif « continu et rapide ». Le sol et le sous-sol de cet espace maritime appartiennent au domaine public maritime (DPM) de l'Etat français.

Dans la zone contigüe (de 12 à 24 milles nautiques) et la zone économique exclusive (de 12 à 200 milles nautiques), la convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM) s'applique. La France exerce sur sa ZEE des droits souverains en ce qui concerne l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux surjacentes. Pour ce qui concerne l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, la mise en œuvre de la Convention de Montego Bay par la France est notamment précisée par le code minier.

Tableau 1 : Les différentes phases relatives à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques, sulfures hydrothermaux et encroûtements cobaltifères dans la Zone (juin 2013).

Phase 2 - Exploration	Phase 3 - Exploitation
Ne s'opère pas librement. L'exploration ne débute que lorsqu'un plan de travail a été approuvé par l'Autorité et qu'un contrat ait été émis.	Aucune réglementation émise actuellement (juin 2013)
Les contractants ont les droits exclusifs sur les ressources de la zone prospectée (suite à l'approbation du plan de travail).	
Un seul contractant peut explorer la zone visée.	
Envoi d'un « plan de travail » www.isa.org.jm/files/documents/FR/Regs/MiningCode.pdf , annexe 2	
Sous réserve de la Convention, le plan de travail peut être présenté par : • l'Entreprise*, en son nom propre, ou dans le cadre d'un accord de coentreprise ; • les Etats Parties, les entreprises d'Etat ou les personnes physiques ou morales possédant la nationalité d'Etats Parties ou effectivement contrôlées par eux ou leurs ressortissants, lorsqu'elles sont patronnées par ces Etats, ou tout groupe des catégories précitées qui satisfait aux conditions stipulées sans présent Règlement.	
Envoi du plan au secrétaire général qui le transmettra à la commission pour examen. C'est le conseil, sur les recommandations de la commission, qui approuvera ou non le plan de travail émis.	
15 ans, exécutés par tranches de 5 ans.	
Mis lors de : • l'approbation d'un plan de travail en vue de l'exploitation ; • le renoncement des droits par le contractant ; • la demande de prorogation du plan de travail en vue de l'exploration du contractant**.	
Des droits en dollars des Etats Unis ou l'équivalent en monnaie librement convertible doivent être payés à l'Autorité. • Nodules : 250 000 • Sulfures et encroûtements : 500 000 versés en une fois ou 50 000 dollars qui seront à compléter, lors de l'exploitation par un droit annuel qui prendrait en compte une forme d'intéressement offert à l'Entreprise, qui aurait alors la qualité de co-contractant.	
La superficie des secteurs attribués dépend des ressources visées. Sous certaine condition, une partie du secteur pourra être rendue à l'Autorité	
• Rapport annuel ; • Rapport quinquennal ; • Rapport de fin de contrat.	
Le contrat d'exploration comprend un programme de formation pratique du personnel de l'AIFM et des Etats en développement, développé par le contractant, l'AIFM et le ou les Etats patronnant la demande. Les formations sont axées sur la formation à l'exploration.	

Dans la Zone, la convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM) est appliquée, ainsi que les règlements émis par l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). Les grandes lignes des procédures émis par l'AIFM sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines profondes, les Etats ont deux types de législation à mettre en place :

- A l'intérieur de la ZEE, la législation relative à l'exploration et l'exploitation dans les espaces maritimes sous leur juridiction.
- Au-delà de la ZEE, la législation relative à leurs responsabilités dans la Zone via les entreprises qu'ils patronnent.

2.2. Connaissance et degré d'exploration des différentes ressources

Les explorations scientifiques menées depuis une quarantaine d'années ont identifié la diversité et la complexité des processus géologiques et géochimiques conduisant à la concentration des métaux dans les grands fonds. Les études de la circulation de fluides, du contexte tectono-magmatique et sédimentaire ont été déterminantes pour la compréhension des dépôts métallifères océaniques, mais aussi de la construction et de l'évolution spatio-temporelle des habitats océaniques profonds.

D'un point de vue économique, les nodules et encroûtements d'hydroxydes de fer et de manganèse sont intéressants pour leurs concentrations en nickel, cuivre et cobalt mais ils peuvent également être enrichis en platine, titane, terres rares (en particulier le cérium), zirconium, molybdène, vanadium, tellure, thallium et phosphore (Tableau 2). Selon le contexte et la nature du substratum impliqué, les sulfures hydrothermaux peuvent être fortement concentrés en cuivre, zinc, cobalt, plomb, baryum mais aussi en éléments plus rares tels que or, argent, cadmium, antimoine, cobalt, germanium, indium, sélénium, mercure (Tableau 2).

Tableau 2 : Compositions moyennes des principaux types de minéralisations des grands fonds océaniques pour les principaux environnements dans lesquels ils se forment. (Fouquet and Lacroix, 2012²)

	Nodules		Encroûtements		Sulfures hydrothermaux		
	<i>Clipperton</i>	<i>Pacific Ocean</i>	<i>Pacific Ocean</i>	<i>Polynésie</i>	<i>SW pacific</i>	<i>East Pacifique</i>	<i>Atlantic</i>
% poids							
Iron	6,90	12,70	15,99	15,08	11,22	25,45	27,64
Manganese	25,40	18,50	21,95	19,48	0,18	0,05	0,04
Copper	0,82	0,42	0,09	0,27	3,48	3,85	8,49
Zinc	0,14	0,09	0,07	0,06	16,28	10,46	6,64
Cobalt	0,24	0,24	0,69	0,79	0,00	0,04	0,11
Nickel	1,28	0,63	0,41	0,38	0,00	0,00	0,02
Titanium	0,53	0,78	1,20	0,93	-	-	-
Sulfur	-	-	-	-	21,46	33,34	31,59
Baryum	0,28	0,20	0,18	0,14	12,19	1,99	3,35
Silica	7,60	8,80	4,14	2,40	14,84	11,48	8,24
grammes/tonne							
Lead	450	820	1626	1163	14493	1180	450
Platinum	0,10	0,10	0,64	1,05	-	-	-
Gold	-	-	-	-	2,44	0,61	3,40
Silver	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	404	115	81
Arsenic	159	159	272	248	1484	351	211
Cérium	530	530	1605	702	-	-	-
Molybdenum	520	360	442	307	132	103	55
Zirconium	350	620	618	484	-	-	-

2.2.1. Les nodules polymétalliques

Les nodules polymétalliques forment des boules sombres de 5 à 10 cm de diamètre contenant environ 40 % d'eau. Ils sont principalement 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 au contraire incorporés dans les réseaux cristallins des hydroxydes de manganèse et de fer. Outre les métaux de base (cuivre, nickel, cobalt), les nodules contiennent des métaux plus rares (terres rares, lithium, thallium, tellure, molybdène) dont l'importance économique est croissante (Tableau 2).

D'une manière générale, les nodules sont abondants dans les plaines abyssales où l'océan profond est bien oxygéné et où les taux de sédimentation sont faibles (moins de 100 m par million d'années) - ces zones sont généralement éloignées des marges continentales. La profondeur à laquelle peuvent se former les nodules est essentiellement liée à la profondeur à laquelle la totalité du carbonate de calcium apporté depuis la surface est dissoute. Cette profondeur varie d'un océan à l'autre et se retrouve généralement entre 3 000 et 5 500 m. Sous cette profondeur, les sédiments appauvris en carbonate se trouvent enrichis en particules détritiques et biogéniques, formant une boue siliceuse. Dans ce contexte (bonne oxygénation, taux de sédimentation faible, sédiments enrichis en boue siliceuse à radiolaires), la dégradation de la matière organique et la présence de nucléus («noyau» souvent microscopique d'origine détritique) permet la formation des nodules sous la forme de concrétions concentriques pluri-centimétrique. La taille des nodules varie en moyenne entre 5 et 10 cm, de formes diverses et souvent composites (agglomération de plusieurs nodules) avec des répartitions hétérogènes sur le fond océanique qui impliquent un travail fin de cartographie et d'échantillonnage afin de sélectionner de manière précise les zones les plus favorables à une exploitation.

À l'échelle mondiale, la zone de Clarion-Clipperton est la plus riche en métaux et en poids de nodules au mètre carré (de 8 à 10 kg/m²). Les estimations sur cette zone montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km² (soit 15 % des fonds du Pacifique) à des profondeurs allant de 4 000 à 5 000 mètres, le poids total des nodules est de 34 milliards de tonnes. L'évaluation précise des surfaces exploitables industriellement impliquerait maintenant d'inventorier les zones les plus riches en nodules grâce aux outils modernes de cartographie et d'imagerie à haute résolution.

L'abondance en métaux (nickel, cuivre, cobalt) des nodules est contrôlée à la fois par l'abondance et la minéralogie des phases majeures de manganèse (todorokite, vernadite, birnessite) et par les différentes sources et processus impliqués dans la formation des nodules. Afin de pouvoir définir les différents types et mode de formation des nodules et leur potentiel économique, les études ont permis d'apporter des éléments de réponse à quatre questions fondamentales :

- Quelles sont les sources en éléments majeurs (fer et manganèse) et éléments trace (cuivre, zinc, nickel etc.) les composant ?
- Quels sont les processus mis en jeu pour leur formation et accumulation ?
- Quels sont les environnements privilégiant leur formation ?
- A quelle rapidité se forment-ils ?

Concernant les sources chimiques des métaux formant les nodules, il convient de distinguer :

- 1)** une source biogénique, issue de la dégradation des débris d'organismes d'origine planctonique lors de la diagenèse sédimentaire (matière organique et tests siliceux et calcaires) ;
- 2)** une source lithogénique, issue de la transformation diagénétique des phases minérales argileuses ou volcaniques constituant les sédiments ;
- 3)** un apport hydrogéné, issu de l'incorporation directe des métaux de l'eau de mer. Bien sûr, les métaux sous forme dissoute ou particulaire dans l'eau de mer peuvent être eux-mêmes influencés par les apports continentaux et hydrothermaux et recyclés par l'activité biologique.

La part relative des apports atmosphériques, biologiques ou hydrothermaux dans l'enrichissement en fer, manganèse et métaux traces des sédiments métallifères et des nodules est débattue depuis très longtemps. L'utilisation croissante des outils isotopiques, qui permettent un traçage des sources et du processus de recyclage du fer et des autres métaux tels que le nickel, molybdène, thallium et cadmium, devrait donner des informations utiles à ce sujet.

En résumé, les modèles actuels admettent une origine exclusivement sédimentaire des nodules. Les nodules se forment dans des conditions optimales qui couplent (1) l'environnement sédimentaire et géodynamique, à la fois régional et local ; et (2) les paramètres océaniques et de productivité biologique. Il existe un taux de sédimentation optimal pour la formation des nodules. Au-dessus de 10 mm pour 1 000 ans, les mécanismes de formation des nodules sont inhibés. Ces taux de sédimentation restent néanmoins largement supérieurs au taux de croissance des nodules estimé entre 5 et 10 millimètres par millions d'années. Enfin, il faut souligner l'importance de la vie à toutes les échelles dans la genèse des nodules, avec en particulier les micro-organismes qui jouent certainement un rôle important dans les processus de mise en solution puis de précipitation des métaux concentrés dans les nodules.

2.2.2. Les encroûtements

Comme les nodules, les encroûtements sont essentiellement constitués d'hydroxydes de fer et d'oxydes de manganèse de type vernadite. Ils sont cependant, en moyenne, trois fois plus riches en cobalt et souvent fortement enrichis en platine et tellure. Les encroûtements sont, parmi les dépôts métallifères, les ressources les plus riches en cobalt connues sur terre et sont une source potentielle de nombreux autres éléments métalliques tels que titane, nickel, terres rares (en particulier le cérium), zirconium, molybdène, vanadium, tellure, thallium et phosphore (Tableau 2). Les encroûtements atteignent quelques centimètres à vingt-cinq centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs kilomètres carrés. Ils se déposent généralement sur des substrats indurés et se retrouvent à des profondeurs variant entre 400 et 4 000 m.

Des encroûtements ont été répertoriés dans tous les océans (Figure 1), dans des environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation a empêché le dépôt de sédiments pendant plusieurs dizaines de millions d'années. De manière générale, ils sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques qui ont des caractéristiques qui favorisent la formation des encroûtements et le piégeage des métaux traces. Bien qu'un nombre infime de volcans immergés ait été étudié dans les océans (ex 50 000 volcans répertoriés dans l'océan Pacifique), certaines estimations montrent que 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des océans, sont potentiellement couverts d'encroûtements de manganèse. En revanche, une véritable évaluation des potentialités économiques de ces minéralisations ne pourra être réalisée que lorsque des données de terrain permettront de préciser les paramètres nécessaires pour des calculs précis des zones exploitables : continuité des dépôts, épaisseur, topographie et rugosité du substratum rocheux. Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont enrichis en cobalt et en platine, et se situent en Polynésie.

Les encroûtements se forment initialement à partir de la précipitation de fer et manganèse de l'eau de mer sous forme de colloïdes. La remontée d'eau profonde oxygénée (processus d'upwelling) favorise la formation de courants de fond qui évitent les dépôts de sédiments et permet l'apport de métaux qui sont plus enrichis dans les eaux profondes que dans les eaux de surface. La formation des encroûtements est également renforcée lorsque la teneur en oxygène de l'eau de mer sus-jacente est minimale. Cette zone de minimum d'oxygène est présente dans la plupart des océans et résulte de la forte productivité biologique en surface et de l'apport en matière organique dans les eaux plus profondes.

D'une manière générale, les métaux traces les plus abondants dans l'eau de mer se retrouvent particulièrement enrichis dans les encroûtements, tels que le molybdène, le cuivre, le nickel, et le zinc. Les éléments qui montrent les plus forts enrichissements par rapport à leur abondance dans l'eau de mer, tels que le cobalt, le tellure, le cérium et le thallium sont affectés par d'autres processus d'adsorption qui impliquent un changement de leur degré d'oxydation.

Les vitesses de croissance des encroûtements sont extrêmement lentes, de l'ordre de 1 à 6 mm par millions d'années, ce qui permet un enrichissement important en éléments traces dissous dans l'eau de mer par mécanismes d'adsorption ou de coprécipitation. Ainsi les croûtes les plus épaisses (jusqu'à 25 cm d'épaisseur) peuvent avoir des âges atteignant 60 millions d'années et offrent des informations uniques sur des processus océaniques anciens à l'échelle du million d'années. L'utilisation des encroûtements hydrogénétiques comme archive paléo-océanographique reste un domaine de recherche de premier ordre et de nombreuses zones, où de nombreux encroûtements ont été localisés, restent très peu étudiées, comme par exemple la Polynésie Française dans le Pacifique sud.

2.2.3. Les sulfures hydrothermaux

Découverts à la fin des années 70, les systèmes hydrothermaux sous-marins se retrouvent le long des 60 000 km de dorsales océaniques et dans les bassins arrière-arc. Ces zones résultent du mouvement des plaques tectoniques terrestres et de l'activité volcanique qui en découle. Les estimations montrent que la masse totale des eaux océaniques circule à travers les roches océaniques tous les cinq à onze millions d'années. L'hydrothermalisme océanique est donc un phénomène majeur à l'échelle du globe terrestre qui affecte profondément la chimie et la minéralogie de la croûte océanique et de l'eau de mer.

Les premiers dépôts observés représentaient seulement quelques dizaines de milliers de tonnes de sulfures polymétalliques. On connaît maintenant plusieurs champs hydrothermaux, dont les dimensions et les teneurs des minéralisations sont similaires à celles de mines exploitées à terre, c'est-à-dire plusieurs millions à plusieurs dizaines de millions de tonnes de minerai exploitable. Ainsi, depuis quelques années, l'industrie minière commence à s'intéresser aux minéralisations hydrothermales.

Les sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. Des minéralisations sulfurées sont maintenant connues à des profondeurs comprises entre 800 m et 5 000 m. En revanche, la profondeur à laquelle se trouve la plupart des dépôts hydrothermaux d'intérêt économique potentiel est comprise entre 1 500 m et 3 500 m de profondeur. De nombreux travaux d'exploration scientifique faisant l'inventaire des différents sites de dépôts hydrothermaux actifs ou inactifs ont ainsi permis de comprendre un certain nombre de processus favorables à la formation de ces dépôts mais il n'est pas encore possible d'établir une « carte génétique » des dépôts hydrothermaux en fonction de leur contexte géodynamique. En effet, faire un lien entre la chimie des fluides et des dépôts hydrothermaux avec la nature du substratum n'est pas immédiat et nécessite différentes approches comprenant des études géochimiques des produits hydrothermaux prélevés en submersible (fluides et roches), des études en profondeur pour contraindre l'importance des minéralisations en subsurface (forage dans le cadre des missions IODP, ODP et DSDP) mais aussi en utilisant les analogues fossiles continentaux préservés du recyclage de la croûte océanique lors de la subduction.

Les zones qui font l'objet d'un intérêt particulier d'un point de vue économique concernent essentiellement les zones à sulfures massifs qui peuvent être considérées comme inactives. Les sulfures

massifs se retrouvent généralement sous forme de dômes présentant souvent des cheminées actives à leur sommet. La formation des sulfures massifs volcanogéniques marins provient pour partie de l'accumulation et du remaniement d'anciennes cheminées effondrées et de précipitation en subsurface. Le temps de formation d'un mont hydrothermal est très variable en fonction de sa taille et du contexte géodynamique mais reste de l'ordre de 10 000 ans. Contrairement aux vastes zones exploitables des nodules polymétalliques, les sulfures hydrothermaux représentent typiquement des zones inférieures au km².

La composition chimique et minéralogique des sulfures hydrothermaux peut être très variable selon l'environnement géodynamique, la nature du substratum affecté par les circulations hydrothermales, la profondeur d'eau, les phénomènes de séparation de phase, la maturité des dépôts (Tableau 2). Le nombre important de sites hydrothermaux actuellement connus permet de classer les différents types d'édifices à la fois en fonction (i) de la température et de la composition des fluides émis, (ii) de leur forme et de leur minéralogie principale et (iii) de la nature du substratum.

- 1)** Les minéralisations riches en cuivre de haute température (> 300°C) pouvant également être enrichies en molybdène, cobalt, sélénium et nickel.
- 2)** Les minéralisations riches en zinc, pouvant également être enrichies en cadmium, arsenic, antimoine, germanium, argent, plomb.

A noter que certains métaux traces tels que l'or, l'étain, le tellure, le bismuth et le mercure ont des comportements mixtes, pouvant se retrouver enrichis dans les minéralisations riches en cuivre ou zinc en fonction des conditions physico-chimiques du fluide, du contexte géodynamique et des interactions eaux-roches en profondeur.

Enfin, il est important de souligner que seule une partie des éléments présents dans les fluides hydrothermaux émis sur le plancher océanique est déposée directement dans les édifices hydrothermaux. Environ 5 % de la matière métallifère hydrothermale s'accumule sous la forme de sulfures, le reste étant dispersé dans la colonne d'eau sous la forme d'un panache hydrothermal avant d'être déposé sur le plancher océanique. Il a été démontré que les différents minéraux des panaches hydrothermaux résistent à leur dissolution dans l'eau de mer à des vitesses différentes en fonction de leur composition, de leur minéralogie et de leur granulométrie. Les taux de dissolution très variables des différentes particules, ainsi que l'implication potentielle des micro-organismes constituent des points de vigilance importants dans l'estimation des impacts potentiels de l'émission de particules lors des opérations d'exploitation des sulfures hydrothermaux.

L'inventaire des systèmes hydrothermaux reste également très incomplet compte-tenu de la distribution des sites hydrothermaux le long des 60 000 km de dorsales océaniques, dans les bassins arrière-arc et les arcs volcaniques. 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.

2.3. Degré d'évaluation et d'exploitation actuel des ressources minérales marines.

2.3.1. Les nodules polymétalliques

Dès 1973, la présence de champs particulièrement riches avec une forte densité de nodules a été démontrée dans le Pacifique équatorial Nord, le long d'une ceinture Est-Ouest limitée par les zones de fracture de Clarion et de Clipperton d'où le nom de la zone « Clarion Clipperton Fracture Zone » ou « CCFZ » (Figure 1). Afin d'estimer les réserves potentielles en métaux des nodules et de les comparer à celles des dépôts terrestres, des efforts importants ont été menés depuis plus de 40 ans pour déterminer l'abondance en nodules et les tonnages en métaux stratégiques de la zone CCFZ, notamment sous l'impulsion de l'AIFM et grâce au travail de compilation de plusieurs organismes. Historiquement, la France (CNEXO puis Ifremer) a joué un rôle très important dans la prospection des nodules. Contrairement à l'exploration des sulfures hydrothermaux et des encroûtements qui a essentiellement été motivée par des objectifs purement scientifiques, l'exploration des nodules a ainsi été réalisée dans un cadre de prospection minière.

Les estimations montrent que les nodules de la zone CCFZ renferment six mille fois plus de thallium, trois fois plus de cobalt et plus de manganèse et nickel que la totalité des ressources terrestres globales, qui comprennent les réserves directement exploitables mais aussi celles de moindre importance économique. La zone de CCFZ a donc suscité un grand intérêt économique, avec 13 permis d'exploration (représentant chacun une zone de 75 000 km²) accordés ou en cours de signature avec l'AIFM.

Alors que la position et la stratégie des différents pays (Etats-Unis, Allemagne, France, URSS puis Russie, Inde) qui se sont lancés historiquement dans la prospection minière sont très diverses, de nouveaux acteurs sont à la base du plus grand nombre de campagnes de prospection nodules au cours des dernières années. Il s'agit de la Chine, la Corée du Sud et le consortium IOM qui effectuent notamment leurs campagnes dans des zones peu explorées du Pacifique Nord. Cinq Etats ont fait également une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration de nodules polymétalliques dans la Zone de Clarion-Clipperton devant l'AIFM en août 2012 : la république de Nauru, le royaume de Tonga, la république de Kiribati, la Belgique et le Royaume-Uni par le biais de sociétés parrainées par leur gouvernement.

Malgré les investigations et le développement actif de techniques d'exploration et d'exploitation, l'exploitation des nodules n'a pas encore abouti pour diverses raisons: incertitude sur la rentabilité d'une exploitation, coût des traitements métallurgiques, problèmes politiques liés au droit de la mer, fluctuations du cours des métaux et questions concernant l'impact environnemental de leur extraction sur de grandes surfaces. Ils constituent cependant une réserve potentielle importante qui permettrait de diversifier les sources d'approvisionnement en cas de tension sur les ressources continentales. Dans ce contexte, la France a obtenu un permis minier dans le Pacifique Nord équatorial afin de réaliser des cartes à haute résolution, de comprendre les processus de formation des nodules les plus riches et de connaître la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes associés.

2.3.2. Les encroûtements

Contrairement aux sulfures hydrothermaux et aux nodules polymétalliques, peu d'études se sont focalisées sur le potentiel minier des encroûtements hydrogénétiques. Traditionnellement, l'intérêt économique des encroûtements s'est porté sur les ressources en cobalt et, dans une moindre

mesure, sur le nickel et le platine. De par leur très faible vitesse de formation, les encroûtements sont plus épais dans l'océan Pacifique du Nord-Ouest, où la croûte océanique est la plus ancienne et les volcans sous-marins les plus nombreux. Les encroûtements du Pacifique Nord-Ouest sont également très riches en métaux, ce qui a permis de définir cette large zone comme « Zone Principale à Encroûtement » ou « Prime Zone for Crust ». Bien que toujours incertaines, les estimations de ressources qui ont été réalisées dans cette zone montrent qu'elle renferme presque deux mille fois plus de thallium, quatre fois plus de cobalt et neuf fois plus de tellure que la totalité des ressources terrestres globales directement exploitables et d'importance économique moindre réunies. A noter également que les concentrations les plus élevées en cobalt (1,8 %) et en platine (3,5 g/tonne) sont situées en Polynésie, entre 1 500 et 2 000 mètres de profondeur. En revanche, aucune estimation de ressources n'a été établie à ce jour pour le Pacifique Sud et en particulier pour la ZEE française.

Du point de vue économique, il reste beaucoup à faire pour évaluer les dépôts, localiser les zones les plus fortement concentrées en métaux et identifier des zones relativement planes et continues sur lesquelles un ramassage serait possible sans trop de dilution avec du substrat rocheux. Actuellement, il n'existe aucune méthode d'évaluation selon les codes de classification des ressources en vigueur. Ainsi, il est difficile de présenter précisément les degrés d'évaluation ou d'exploitation de ces minéralisations. Par contre, des zones prospectives ont pu être définies à partir de critères empiriques pour orienter la prospection, l'évaluation et l'exploitation des encroûtements.

Les équipes de recherches allemandes et américaines ont été particulièrement actives dans l'exploration et l'étude scientifique des encroûtements dans le Pacifique Nord et plus particulièrement dans les ensembles Hawaii - Iles de la Ligne. La France a également été active dans la prospection de sa zone économique exclusive du Pacifique Sud. En Janvier 2014, l'Autorité Internationale des Fonds Marins a accordé un permis d'exploration à la JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation). Un permis d'exploration est également en cours de signature avec la COMRA (China Ocean Minerals Resources Research and Development Association). Les demandes de la COMRA et du JOGMEC portent sur une étendue totale d'environ de 6 000 km² située dans l'Ouest de l'océan Pacifique.

2.3.3. Les sulfures hydrothermaux

Après trente-cinq années d'exploration dans tous les océans, la découverte de près de 150 sites hydrothermaux (Figure 1) démontre l'importance des processus hydrothermaux associés au volcanisme sous-marin. Les gisements de type sulfures massifs des fonds océaniques représentent les minéralisations les plus prometteuses en milieu marin. Ceci est lié à leur richesse en métaux de base (cuivre, zinc, plomb), métaux précieux (argent et or) mais également parfois en éléments rares (ex : indium, sélénium, germanium,...).

Ainsi, depuis une décennie, plusieurs compagnies privées et organismes scientifiques se sont intéressés à ces gisements et à l'évaluation de leurs ressources. L'exploitation de sulfures hydrothermaux semble désormais possible considérant un certain nombre de critères : (1) de fortes concentrations en métaux de base (cuivre et zinc) (2) l'enrichissement significatifs en métaux précieux (or et argent) ; (3) une localisation des gisements proches des côtes, ce qui explique l'intérêt particulier pour les ZEE des états côtiers ; (4) une profondeur d'eau relativement faible, de préférence moins de 2 000 m ; et (5) l'identification de plusieurs sites inactifs dans une zone relativement restreinte.

Il est important de souligner que les sites hydrothermaux actifs ne sont pas à considérer en priorité comme des sites d'intérêt minier potentiel en raison de la température (jusqu'à 400°C) des fluides qui y circulent. En revanche, les gisements matures inactifs (dont la croissance est achevée) constituent les ressources principales, ce qui nécessite de développer des méthodes spécifiques permettant de localiser et d'évaluer ces gisements.

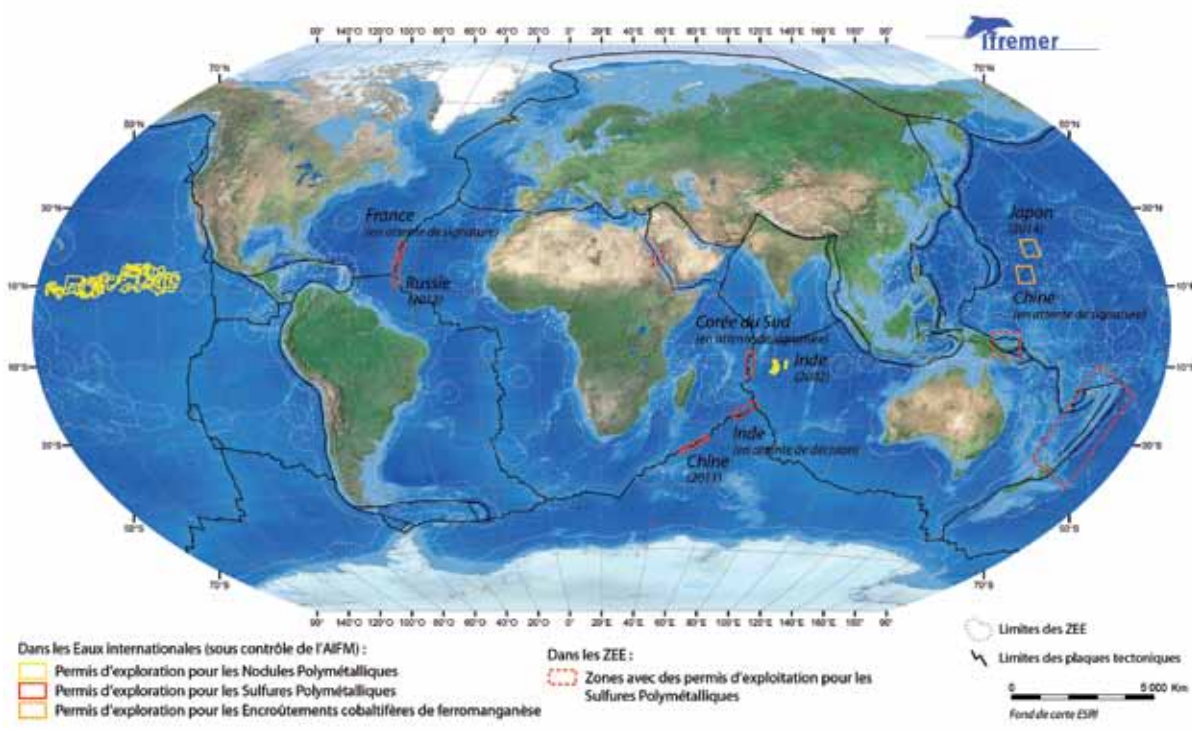
Malgré des connaissances encore parcellaires, plusieurs auteurs ont tenté d'estimer les quantités de métaux accumulés dans les minéralisations hydrothermales. Ces approches sont souvent limitées par le fait que les techniques d'exploration efficaces ne permettent de localiser que les sites actifs. En raison de leur richesse en métaux, de leur emprise minime (quelques hectares) sur le fond et de la profondeur plus faible que celle des nodules, l'exploitation des sulfures constituera sans doute, avant les encroûtements cobaltifères et les nodules, la première exploitation minière dans les grands fonds océaniques.

Les deux principales sociétés privées qui travaillent sur ce sujet sont la société Nautilus Minerals, Inc. et la société Neptune Minerals, Inc. La plupart des sites appartenant à ces deux acteurs industriels sont en cours d'évaluation et par conséquent quasiment aucune valeur de ressources n'est disponible. Toutefois, il existe deux sites situés dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle-Guinée et appartenant à Nautilus Minerals (Inc.) où les données sont suffisantes pour proposer une estimation des ressources. A part le cas de la Papouasie-Nouvelle-Guinée qui est actuellement le seul pays à avoir délivré des permis d'exploitation minière des sulfures hydrothermaux en eau profonde, d'autres pays ont délivré des licences d'exploration ou réalisé des campagnes d'exploration concernant les ressources en sulfures hydrothermaux inclus dans leur ZEE, en particulier le Royaume des Tonga (bassin de Lau), les Iles Salomon, les Fidji (bassin nord-fidjien), le Vanuatu et la Nouvelle-Zélande. Des dépôts de sulfures hydrothermaux ont également été identifiés dans les ZEE du Canada (Middle Valley), de l'Equateur (Galápagos Rift), du Japon (Okinawa Trough), de la République des Palaos et d'une collectivité d'outre-mer de la France (Wallis et Futuna). A noter également la présence de niveaux à sulfures hydrothermaux dans la fosse d'Atlantis II Deep dans la mer Rouge qui font l'objet de permis d'exploitation dans les ZEEs de l'Arabie Saoudite et du Soudan.

Concernant les activités dans la Zone régulée par l'AIFM, des contrats d'exploration des sulfures hydrothermaux ont été délivrés ou sont en attente de signature dans l'océan Atlantique au gouvernement de la Fédération de Russie et à l'Iframer. D'autres permis ont également été accordés ou sont en cours de signature dans l'océan Indien avec le gouvernement de la République de Corée, la Chine et l'Inde (COMRA).

Enfin, des permis d'exploitation ont été délivrés en 2010 et 2011 sur des champs hydrothermaux des ZEE de la mer Rouge.

Figure 2 : Localisation des permis d'exploration et d'exploitation attribués dans les ZEE et des permis d'exploration attribués par l'AIFM. Les zones en gris clair, dans les océans, permettent de visualiser les principaux champs de nodules polymétalliques. Les losanges, sur les dorsales (traits noirs, au centre des océans) indiquent les principaux champs hydrothermaux connus.



2.4. Conclusion

Les nodules et les encroûtements d'hydroxydes de fer et de manganèse sont intéressants pour leurs concentrations en nickel, cuivre et cobalt mais ils peuvent également être enrichis en platine, titane, terres rares (en particulier le cérium), zirconium, molybdène, vanadium, tellure, thallium et phosphore.

Les nodules polymétalliques sont présents dans tous les océans et sous toutes les latitudes (Figure 1). Ils se forment dans des zones caractérisées par un faible taux de sédimentation et par des boues à radiolaires. 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 ») qui a fait l'objet de nombreuses campagnes d'exploration en vue d'exploitation minière.

Les encroûtements hydrogénétiques d'oxydes ferro-manganesifères ont, quant à eux, été répertoriés dans tous les océans, dans les environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant des millions d'années. Ces encroûtements pourraient constituer le premier minerai de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations. Le platine pourrait s'avérer un intéressant sous-produit.

Les sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. Ils sont par conséquent retrouvés sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique que constituent les 60 000 km de dorsales océaniques. Selon le contexte et la nature du substratum impliqué, les sulfures hydrothermaux peuvent être fortement concentrés en cuivre, zinc, or, argent, cobalt, plomb, baryum mais aussi en éléments plus rares tels que cadmium, antimoine, germanium, indium, sélénium, mercure. En raison de la salinité de l'eau de mer et de l'augmentation de la température d'ébullition avec la profondeur, les fluides les plus profonds ont une plus grande capacité à transporter les métaux. L'exploitation des sulfures hydrothermaux semble désormais possible considérant un certain nombre de critères tels que l'enrichissement en métaux précieux (or et argent) et métaux de base (cuivre, zinc, plomb), la localisation des gisements proche des côtes, en particulier dans les ZEE des états côtiers, la profondeur d'eau relativement faible, la présence de sites inactifs pouvant être exploités dans une zone relativement restreinte.

Actuellement, un total de plus de 1,8 millions de km² de fond océanique a déjà fait l'objet de dépôts de permis d'exploration, dont la moitié concerne des activités dans les ZEEs qui ne dépendent pas de l'AIFM (Figure 2). Il est important de souligner que la très grande majorité des activités d'exploration minière pour les ressources en sulfures hydrothermaux se sont effectuées dans les ZEEs alors que les activités en lien avec les nodules concernent la Zone régulée par l'AIFM.

L'enjeu économique des ressources minérales marines est important pour la France, mais également pour l'Europe. L'économie européenne est largement dépendante, souvent à plus de 90 %, de ses importations en métaux. Toutes les recherches ne pourront pas être menées par un seul pays. L'Europe devra se positionner du point de vue géopolitique par rapport aux autres grands pôles mondiaux, financer des recherches dans les eaux internationales et ne pas se restreindre à ses seules ZEE. C'est un enjeu majeur si l'Europe veut conserver sa position de premier plan mondial du point de vue scientifique et technologique et se positionner sur les enjeux économiques que constituent les ressources potentielles des grands fonds océaniques.

3. Techniques d'exploration et d'exploitation

Ce chapitre décrit les principales techniques d'exploration des fonds océaniques puis les techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds, avant d'aborder les techniques d'exploitation envisagées pour les ressources minérales profondes suivant le type de ressources considérées. Une liste non exhaustive des principaux acteurs impliqués est ensuite présentée avant quelques remarques sur les points de vigilance à garder en mémoire.

3.1. Techniques d'exploration scientifique des ressources minérales

L'exploration des grands fonds océaniques requiert une **stratégie multi-échelles** mettant en œuvre des technologies spécifiques (directes et indirectes) pour comprendre les processus géologiques et chimiques à l'œuvre, évaluer qualitativement et quantitativement les minéralisations et caractériser les environnements et la biodiversité. Ces travaux reposent sur l'utilisation de navires hauturiers et d'une instrumentation adaptée, mise en œuvre à partir des navires, puis d'engins sous-marins déployés à proximité du fond (engins remorqués, drones sous-marins ou AUV, robots téléopérés ou ROV, et submersibles habités).

Les stratégies de recherche mises en œuvre voient se dérouler une succession de techniques emboîtées à différentes échelles, dans une **approche pluridisciplinaire** impliquant géophysique, géologie, étude de la colonne d'eau et finalement biologie. La plupart de ces techniques sont communes aux opérateurs académiques, industriels et militaires. Les investissements réalisés, lorsqu'ils sont publics, conduisent à l'archivage des données et des échantillons collectés dans des bases de données, ainsi qu'à leur mutualisation au sein de la communauté scientifique nationale et internationale.

Aucune exploration ne peut être entreprise sans disposer d'une **connaissance générale approfondie** de la zone potentiellement intéressante, connaissance qui passe par des levés de surface à grande échelle réalisés à l'aide de méthodes indirectes telles que les méthodes acoustiques (bathymétrie, réflectivité), potentielles (gravimétrie et magnétisme) ou sismiques. L'étude scientifique de ces premiers levés (morphologie, tectonique, nature du substrat...) permet de mieux comprendre le contexte géologique général (présence et, le cas échéant, épaisseur de sédiments, environnement basaltique ou ultramafique), les relations entre les structures tectoniques (failles, fissures) et les sorties de fluides. Dans le cas spécifique des sulfures hydrothermaux, la réalisation de prélèvements d'eau permet de reconnaître la présence d'anomalies physiques et

chimiques (salinité, néphélométrie, présence de méthane, de manganèse ou d'hydrogène...) dans la colonne d'eau et de cerner la localisation de sites hydrothermaux actifs, alors que seules les méthodes géophysiques permettent de repérer les sites inactifs. Dragages et carottages donnent ensuite de premiers éléments de vérité sur le terrain pour tous les types de minéralisation, offrant la possibilité d'analyser leur nature et leur composition.

L'exploration voit ensuite la réalisation **d'études *in situ*** avec la mise en œuvre d'engins sous-marins déployés près du fond sur lesquels les outils de levés cartographiques permettent la réalisation de cartes de haute résolution (bathymétrie, imagerie). Dans le cas des sulfures hydrothermaux, ces données, notamment le mode «réflectivité de la colonne d'eau», permettent d'orienter les plongées sur des cibles préalablement identifiées (panaches hydrothermaux, présence suspectée de cheminées fossiles) et de trouver rapidement des sites actifs et inactifs. Les méthodes potentielles (magnétisme et, de façon plus prospective, gravimétrie) complètent cette panoplie de techniques en présentant des signatures spécifiques permettant de détecter et de caractériser les sites hydrothermaux actifs et inactifs de différents types, notamment en fonction de leur substrat. Les observations visuelles du ROV ou des submersibles permettent ensuite une description détaillée de ces sites. Des prélèvements de roche, de faune, de fluide, des mesures et des analyses complètent l'étude de détail sur tous les types de minéralisations. Des forages plus ou moins profonds permettent enfin d'affiner la connaissance de la géométrie en profondeur et des teneurs en différents métaux des minéralisations.

3.2. Techniques de connaissance et de suivi des environnements profonds

Deux types de techniques, basées sur l'utilisation d'engins sous-marins et d'une instrumentation adaptées, sont utilisés : d'une part les techniques de surveillance ponctuelle à intervalles de temps (relativement) réguliers, d'autre part la mise en place de dispositifs d'observation continue à moyen ou long terme.

Les **techniques de surveillance ponctuelle** incluent la réalisation répétée d'observations *in situ* : images photo et vidéo ou imagerie, mosaïques photographiques de haute résolution, qui permettent la description des écosystèmes profonds et de la dynamique temporelle des assemblages hydrothermaux caractéristiques. Les prélèvements répétés d'eau, de faune, de sédiment ou de roche sont également une composante de cette observation *in situ*. L'échantillonnage de la macrofaune s'effectue de diverses manières, suivant le type de substrat (carottiers, aspirateur à faune, instruments spécifiques, pince des submersibles). Les micro-organismes sont collectés avec (et de la même façon que) le substrat qu'ils occupent. Le prélèvement des fluides hydrothermaux s'effectue par aspiration simple (seringue) ou pompage, de façon couplée à une mesure de température sur le fluide en sortie de cheminée. De nombreuses analyses sont effectuées à bord, alors que d'autres seront effectuées à terre au retour de mission. Enfin, la caractérisation physico-chimique des habitats se focalise sur les sources d'énergie disponibles (éléments réduits: méthane et hydrogène sulfuré), l'oxygène, les facteurs de stress (métaux, température, pH...), les traceurs de mélange de fluides (Mg, Mn...) sur les carottes sédimentaires ou en étudiant le mélange entre fluide hydrothermal et eau de mer, suivant la nature du substrat. Les analyseurs chimiques en flux, sondes électrochimiques manipulées par submersible, microprofileurs, et optodes sont utilisés à cet effet.

Parmi les **techniques de surveillance en continu**, le module BOB détecte le débit de bulles par

méthodes acoustiques. L'utilisation conjointe de courantomètres, qui permettent de mesurer la vitesse et la direction d'un courant à une profondeur donnée, et de pièges à particules, qui captent et concentrent les particules dans un cône de surface connue, permet d'appréhender les caractéristiques physiques des eaux autour des organismes ainsi que celles des apports énergétiques sous forme particulaire. Plus ambitieux sont les **observatoires de fond de mer**, avec la mise en place de suivis continus, et sur le long terme, de sites sélectionnés impliquant l'acquisition simultanée de multiples variables océanographiques : ces observatoires multidisciplinaires permettent une analyse approfondie du fonctionnement des écosystèmes. Deux types d'observatoires fond de mer existent. Les observatoires câblés sont reliés à la terre par un câble sous-marin qui fournit l'énergie nécessaire à son fonctionnement et permet un lien permanent et haut débit. Les observatoires non câblés sont des mouillages autonomes en énergie, qui peuvent être équipés de capacité de transmission en temps quasi réel via une liaison satellite. Ces observatoires sont développés dans le cadre de projets nationaux ou internationaux dont les plus ambitieux sont le réseau câblé NEPTUNE Canada et l'observatoire MoMAR (EMSO-Açores) qui assurent un suivi des processus géologiques et hydrothermaux actifs et de la dynamique de l'écosystème hydrothermal sur les sites Endeavour (dorsale Juan de Fuca) et Lucky Strike (dorsale médio-atlantique au sud des Açores), respectivement.

3.3. Techniques d'exploitation utilisées ou en cours de développement par les entreprises et organismes de recherche.

Les acteurs impliqués ne fournissent qu'une information limitée sur les techniques envisagées et leurs conséquences, soit que leur connaissance reste parcellaire, faute d'une réalisation en grandeur nature, soit qu'il s'agisse de protéger leurs secrets industriels.

3.3.1. Nodules

Deux impératifs techniques sont spécifiques au ramassage des nodules :

- un champ de nodules correspond à un gisement en deux dimensions : les nodules étant disposés à la surface des sédiments, il n'y a qu'une seule couche exploitable.
- les nodules sont associés à des sédiments dont les caractéristiques géotechniques conditionnent les techniques à mettre en œuvre lors d'un ramassage industriel.

Trois grandes filières de ramassage ont été proposées et partiellement testées :

- le système de ramassage par bennes attachées à un câble et tractées passivement par un ou deux navires se révèle, lors de tests de maniement, aléatoire et peu efficace, voire dangereux ;
- le système de ramassage hydraulique (aspiration des nodules dans un tuyau à l'aide de pompes actionnant de l'air ou de l'eau) implique le déplacement d'un long tube rigide ;
- le système de ramassage par préleveurs libres autonomes disjoint la fonction de ramassage du navire en utilisant des engins dédiés autonomes. Malgré les nombreuses études, aucune navette de ce type n'a été construite.

Les études menées dans les années 1980 par le groupement GEMONOD pour le chantier de ramassage français se sont appuyées sur l'expérience acquise dans les domaines offshore, minier et

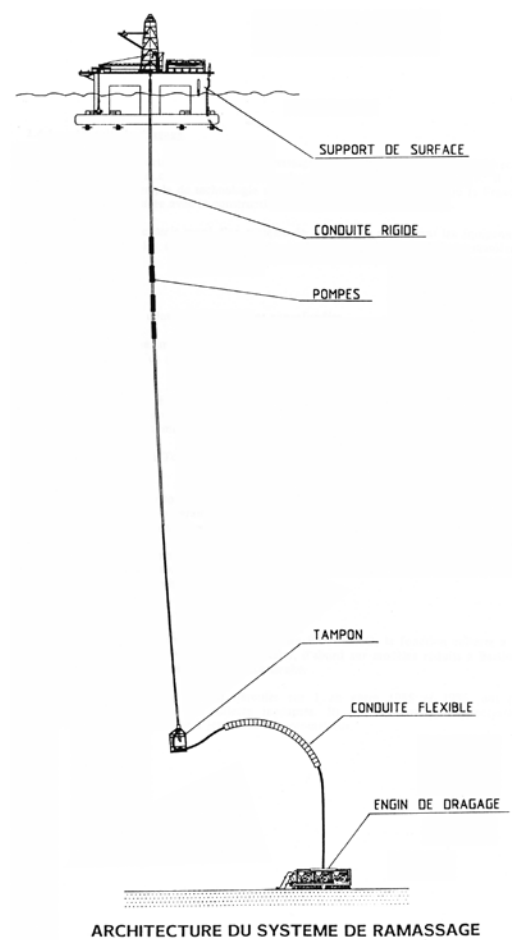
sous-marin profond. Elles ont conduit à la conception d'un système mobile, hydraulique, mettant en œuvre (Figure 3) :

- un engin de dragage (collecte, concassage et pompage des nodules avant remontée)
- le système de remontée hydraulique
- le flexible (relie l'engin de dragage à la conduite principale)
- le tampon (interface entre le flexible et la conduite métallique)
- la conduite métallique
- le support de surface

Sont par ailleurs définis une *logistique de chantier et d'exploration* et les *moyens de transport* afférents



Figure 3 : Vue d'artiste et principe du chantier de ramassage des nodules polymétalliques.



Les systèmes plus récents définis, par exemple, par *Aker Solutions Drilling Technologies* (Allemagne) ou le *Korea Institute of Ocean Science and Technology* (Corée du Sud) et présentés en 2013 reposent sur les mêmes concepts, avec le cas échéant plusieurs engins de collecte.

3.3.2. Encroûtements hydrogénétiques (ou cobaltifères)

L'exploitation des encroûtements est, sur le plan technologique, beaucoup plus difficile que celle des nodules de manganèse. La récupération des nodules est relativement aisée puisqu'ils reposent sur un substrat de sédiments meubles, tandis que les encroûtements sont plus ou moins solidement rattachés au substrat. Pour une exploitation réussie, il est indispensable de récupérer les croûtes sans enlever le substrat rocheux, ce qui diluerait considérablement la teneur en minerai.

Cinq opérations se succéderaient : la fragmentation, le broyage, l'enlèvement, le ramassage et la séparation. La méthode de récupération proposée fait intervenir un véhicule qui se déplace sur le fond marin et qui est attaché à un navire d'exploitation minière en surface, au moyen d'un système d'enlèvement hydraulique et d'un câble électrique. Le véhicule est autopropulsé et se déplace à une vitesse d'environ 20 cm/s. Dans ce cadre, le volume de la production pourrait atteindre 1 million de tonnes par an. Ce scénario offre une efficacité de 80% en ce qui concerne la fragmentation et de 25 % pour ce qui est de la dilution de la teneur en minerai lors de la séparation des croûtes du substrat.

D'autres méthodes sont proposées pour séparer les croûtes du substrat, telles que le décapage par jet d'eau, les techniques de lixiviation *in situ* et le détachement par effet acoustique.

3.3.3. Sulfures hydrothermaux

Le développement, depuis 2007, du projet Solwara 1, dans le bassin de Manus, en Papouasie Nouvelle Guinée, a conduit la compagnie canadienne *Nautilus Minerals Inc.* à définir un système d'exploitation composé de plusieurs éléments (Figure 4) :

- des engins miniers sur le fond (SPT),
- un système de riser et de pompage permettant de remonter le minerai (RALS) et
- un navire de production permettant de prétraiter le minerai avant envoi à terre (PSV).

Le système comprenant la station de pompage et le riser (RALS) est constitué d'une grande pompe et d'un conduit rigide (riser) suspendus à un navire. Ce système permet de délivrer la boue minéralisée à la surface.

Le navire de production (PSV) récupère le minerai et, par des procédés classiques, déshydrate la boue minéralisée. Le matériau ainsi obtenu est ensuite transféré sur une barge de transport amarrée au navire. L'eau de mer est renvoyée vers le fond à travers le riser et permet d'alimenter en énergie hydraulique la pompe RALS.

Les développements menés par la société *Neptune Minerals Inc.* sont très similaires.

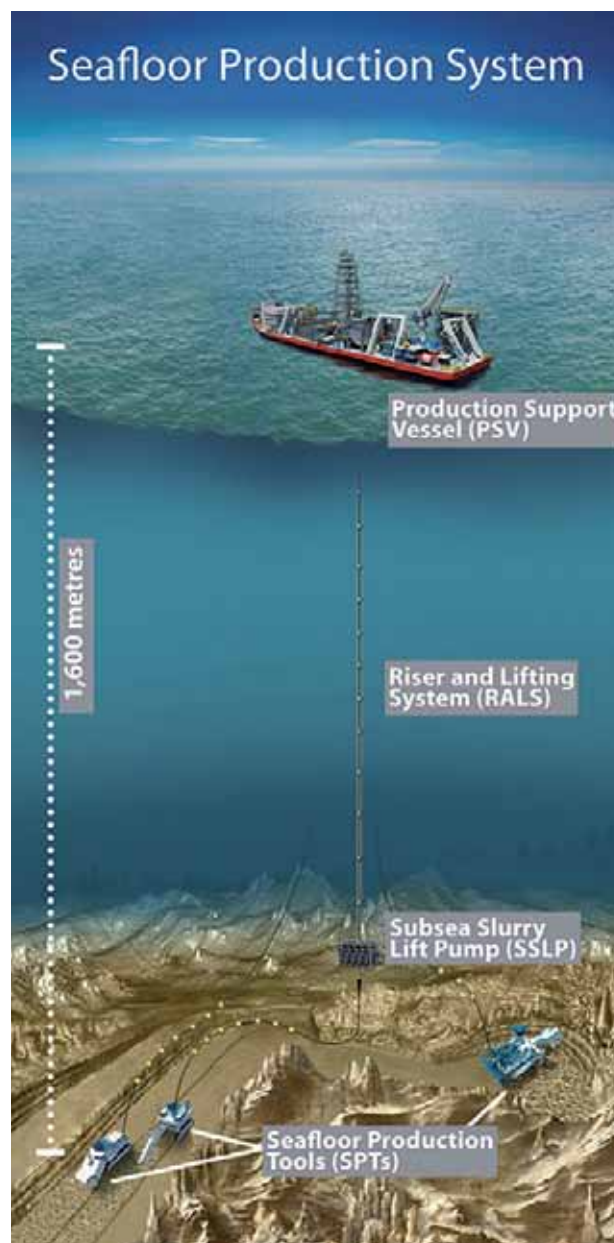


Figure 4 : Vue d'artiste du système d'exploitation imaginé par Nautilus pour le site de Solwara 1

Source : <http://www.nautilusminerals.com/s/resourceextraction.asp>

3.3.4. Autres ressources liées à l'hydrothermalisme océanique

Les ressources minérales de mer Rouge sont très spécifiques : il s'agit de **boues métallifères** riches en zinc, cuivre, argent, or, plomb... mises en place par hydrothermalisme océanique dans des cuvettes profondes qui constituent l'axe de la dorsale séparant l'Arabie de l'Afrique. Ces ressources font l'objet de droits acquis par la compagnie *Diamond Fields International*.

Un test pilote d'exploitation a démontré que ces boues minéralisées peuvent être continûment extraites et concentrées en mer en utilisant des techniques conventionnelles de flottation. Durant ce test, 15 000 m³ de sédiments et de saumures provenant de quatre sites de cette zone ont été traités. Les teneurs en métaux obtenues ont été plus élevées que prévu par les modèles.

3.4. Entreprises, acteurs, états impliqués (opérateurs et fournisseurs)

De nombreux acteurs sont impliqués dans l'exploration et l'exploitation future des ressources minérales profondes. L'exploration consiste à rechercher des indices de minéralisation. Ces indices deviennent un gisement lorsque le potentiel économique est avéré (teneur et quantité suffisantes), conduisant le cas échéant à son exploitation.

3.4.1. Organisations impliquées dans l'exploration et ayant vocation à exploiter les ressources minérales marines

Parmi les acteurs historiques de l'exploration des **nodules polymétalliques**, certains conservent une activité de maintien des permis d'exploration délivrés par l'AIFM, auxquels se sont ajoutées des compagnies soutenues par des états insulaires du Pacifique d'une part, et quelques compagnies européennes d'autre part. L'ensemble des permis concerne la zone Clarion-Clipperton dans l'océan Pacifique, à l'exception du Gouvernement de l'Inde qui dispose d'un permis dans le bassin Indien Central, dans l'océan Indien.

Les contractants historiques avec l'AIFM sont :

- le Gouvernement de l'Inde (Inde) ;
- le Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Allemagne) ;
- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (COMRA) (Chine) ;
- Deep Ocean Resources Development Co. Ltd (DORD) (Japon) ;
- l'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer (Ifremer) (France) ;
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST, ex KORDI) (Corée du Sud) ;
- Yuzhmorgeologia (Russie) ;
- Interoceanmetal Joint Organization (Bulgarie, Cuba, Tchéquie, Pologne, Russie, Slovaquie).

Les contractants avec l'AIFM apparus depuis 2010 sont :

- Tonga Offshore Mining Ltd (Tonga) ;
- Nauru Ocean Resources (Nauru) ;
- Marawa Research and Exploration Ltd. (Kiribati) ;
- UK Seabed Resources Ltd (Royaume Uni) ;
- G-TEC Sea Minerals Resources NV (Belgique) ;
- Ocean Mineral Singapore Pte Ltd (Singapour).

Deux organisations ont à ce jour obtenu de l'AIFM un permis d'exploration des **encroûtements hydro-génétiques**, tous deux situés dans l'océan Pacifique occidental :

- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (COMRA) (Chine) ;
- Deep Ocean Resources Development Co. Ltd (DORD) (Japon).

La demande du Brésil sur la ride du Rio Grande, dans l'Atlantique, est en cours d'évaluation.

Quatre organisations ont à ce jour obtenu de l'AIFM un permis d'exploration des **sulfures polymétalliques**. Ce sont :

- China Ocean Mineral Resources Research & Development Association (COMRA) (Chine) pour un permis situé sur la dorsale ouest-indienne, au sud-ouest de l'océan Indien ;
- le Gouvernement de la Fédération de Russie, pour un permis situé sur la dorsale médio-atlantique entre 10 et 20°N ;
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST, ex KORDI) (Corée du Sud) pour un permis situé sur la dorsale centrale indienne, au centre de l'océan Indien ;
- l'Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer (IFREMER) (France) pour un permis situé sur la dorsale médio-atlantique, au nord de 20°N.

Les demandes de permis du Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) allemand et le Geological Survey of Brazil (CPRM) brésilien, le premier sur la partie la plus méridionale de la dorsale centrale-indienne, le second sur la dorsale médio-atlantique Sud, sont à différents stades de préparation et d'évaluation.

Dans les zones économiques exclusives des Etats, plusieurs compagnies ont obtenu des droits d'exploration, voire d'exploitation, en accord avec les juridictions nationales de ces Etats :

- Nautilus Minerals Inc. est titulaire de nombreux permis dans les états insulaires du Pacifique Ouest, Son projet phare est le projet Solwara 1, dans la ZEE de Papouasie-Nouvelle Guinée. Ce projet, près d'aboutir à une première exploitation en 2011, a été bloqué par des difficultés juridiques opposant Nautilus Minerals et le Gouvernement de Papouasie-Nouvelle Guinée. Il semble relancé au printemps 2014.
- Neptune Minerals Plc. dispose de permis en Nouvelle Zélande, au Japon et en Papouasie-Nouvelle Guinée. Son projet-phare est situé au nord de la Nouvelle Zélande.
- Diamond Fields International a récemment racheté les droits de Preussag AG en mer Rouge, et envisage d'exploiter les boues métallifères d'origine hydrothermale qui s'y trouvent.
- Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) développe un important programme de recherches minérales dans les arcs et bassins d'arrière-arc du Japon.

D'autres organisations ou consortia mènent des recherches préliminaires.

- Un consortium français constitué d'ERAMET, de Technip et d'IFREMER travaille depuis 2010 dans la ZEE française de Wallis et Futuna.
- La société AuruMar, rassemblant les compagnies minières AngloGold Ashanti Ltd et De Beers, a recherché de l'or à l'ouest de la Nouvelle Zélande, dans ce qui était le projet Seafield lancé en 2004. Les teneurs s'étant révélées décevantes, ce projet a été gelé en 2011.

3.4.2. Organisations fournissant des services technologiques aux précédentes

Les principales compagnies de service géophysique proposent des travaux d'**exploration** grands fonds : levés géophysiques de surface ou par AUV, mesure de paramètres spécifiques, forages... Les fournisseurs d'instruments permettant ces travaux d'exploration sont trop nombreux pour être mentionnés ici.

Alors que les premiers développements technologiques relatifs à une possible **exploitation** des ressources minérales sous-marines étaient effectués de manière indépendante et dans la plus grande discrétion par chacun des consortia impliqués, les développements récents proposés combinent généralement les acquis des compagnies de service de l'offshore pétrolier et gazier profond au savoir-faire des constructeurs de machines-outils de l'industrie minière. En conséquence, la compagnie française Technip semble tenir un rôle central d'intégrateur de ces différentes technologies et propose des solutions à la plupart des compagnies privées impliquées dans une possible exploitation de ressources minérales sous-marines profondes. Plusieurs fabricants d'éléments mécaniques se sont positionnés sur le marché des outils destinés à l'exploitation des ressources minérales profondes. En France, le Cluster Maritime Français rassemble des entreprises intéressées au développement des ressources minérales profondes et a récemment préparé, en association avec les Pôles Mer Bretagne et Méditerranée, un document de synthèse sur le sujet.

3.5. Conclusion sur les points de vigilance

3.5.1. Exploration, connaissance et suivi

Les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi des grands fonds océaniques sont souvent peu ou non invasives et ne nécessitent généralement pas d'étude d'impact au sens de l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM). Seul le prélèvement de nodules pour un échantillonnage supérieur à 10 000 m², destiné à évaluer des teneurs moyennes et donc l'intérêt économique d'une zone, est soumis à une étude d'impact au sens de l'AIFM.

Outre son intérêt majeur pour la connaissance scientifique sur les fonds océaniques et les écosystèmes qui s'y développent, d'une part, et pour l'exploration de ressources minérales potentielles, d'autre part, l'ensemble de ces données joue un rôle essentiel dans l'évaluation des impacts d'une éventuelle exploitation de ces ressources, en fournissant un état initial nécessaire à toute étude de ce type. Ainsi, l'AIFM recommande la réalisation d'un état initial pour un ensemble de paramètres physiques, chimiques, géologiques et biologiques, s'intéressant particulièrement à la sédimentation en cours, aux sédiments déposés et à la bioturbation. Certains paramètres des environnements profonds, notamment les dorsales océaniques rapides, sont affectés par une variabilité naturelle importante, qui devra être contrainte par des observations répétées.

En résumé, les techniques d'exploration, de connaissance et de suivi ne demandent pas de vigilance particulière, et leur mise en œuvre est requise pour obtenir un état initial des sites.

3.5.2. Exploitation

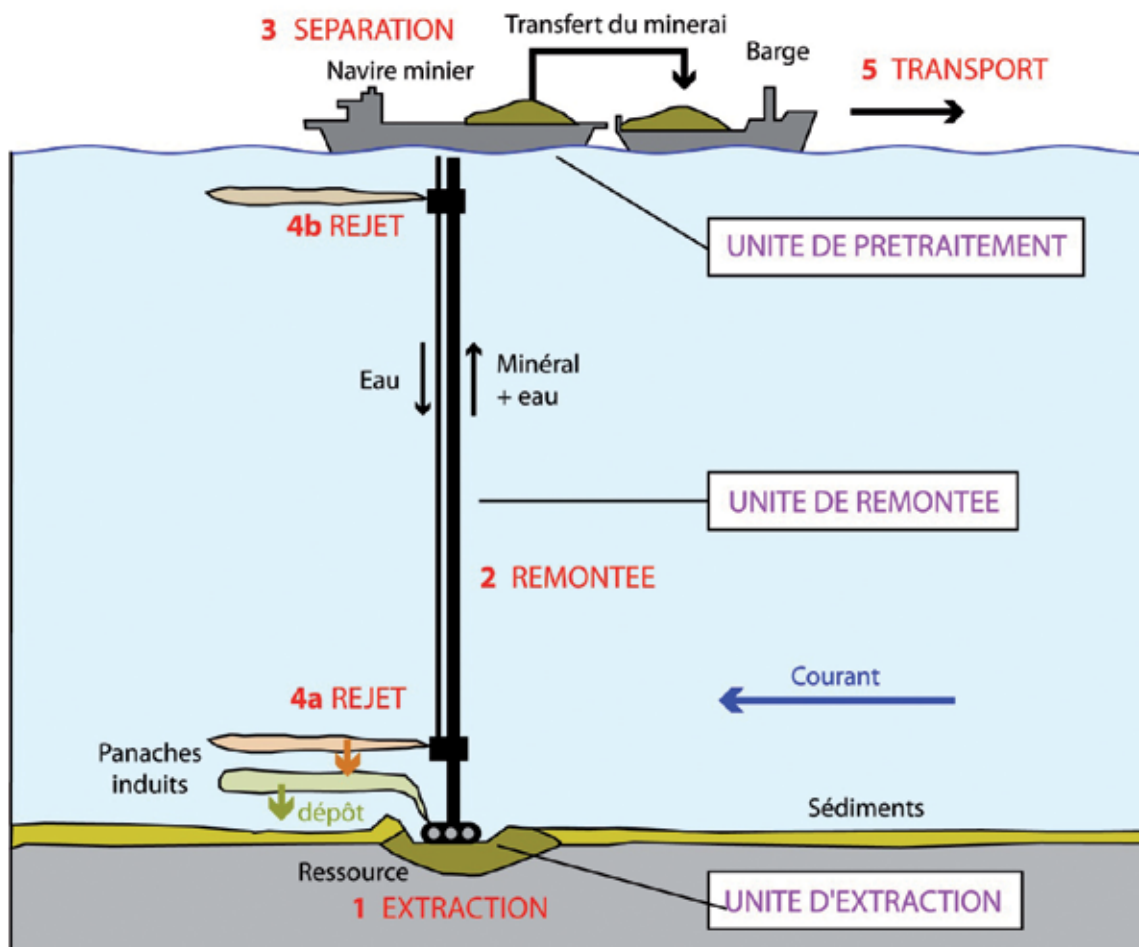
Il n'en va pas de même pour les techniques d'exploitation envisagées, qui n'en sont qu'au stade de concepts, de modèles ou au mieux de prototypes. Il est très difficile d'obtenir des industriels des paramètres précis, soit que ceux-ci relèvent du secret industriel, soit qu'ils restent très mal évalués.

La plupart des systèmes d'exploitation envisagés comportent des éléments communs, que nous énonçons avant de relever les possibles points de vigilance afférents. Ces systèmes comportent des éléments posés sur le fond, des éléments flottant dans la colonne d'eau, et un navire commandant l'ensemble depuis la surface.

On distingue généralement :

- une unité d'extraction du minerai, installée sur le fond. Celle-ci ramasse ou aspire les nodules, arrache ou concasse les sulfures, racle les encroûtements. Dans tous les cas, ce système exerce une action mécanique sur le fond pour libérer la ressource minérale recherchée. Il concentre éventuellement cette ressource en filtrant les sédiments pour ne conserver que les nodules, en réduisant la taille des blocs de sulfure par broyage... pour acheminer cette ressource jusqu'à la base du système de remontée.
- une unité de remontée du minerai. Celle-ci transporte la ressource minérale depuis le fond jusqu'au navire. Il peut s'agir de bennes, comme dans les systèmes imaginés dans les années 70 et 80 pour la remontée des nodules polymétalliques, ou de tuyaux agrémentés de pompes de manière à induire un flux d'eau ou d'air transportant les éléments de minerai, comme dans les systèmes proposés de nos jours.
- une unité de prétraitement du minerai, à bord du navire. Celle-ci vise d'abord à séparer la fraction solide du minerai de l'eau de mer, puis éventuellement à compacter le premier et à le stocker temporairement. Le minerai sera transféré sur des barges ou autres navires permettant de l'amener à terre pour traitement. L'eau sera rejetée à la mer, à plus ou moins grande profondeur et dans certains cas à proximité du point de prélèvement.

Figure 5 : Points communs à la plupart des dispositifs d'exploitation des ressources minérales marines profondes envisagés (d'après Collins et al, 2013³, modifié).
Le minerai est extrait (1) et remonté (2) jusqu'au navire, avant d'être séparé (3) de l'eau qui se voit rejetée au fond (4a) ou en surface (4b), le minerai étant ensuite transporté (5) à terre.



Les points de vigilance soulevés par de tels systèmes sont les suivants (Figure 5) :

Sur le fond :

- la destruction du milieu (habitat et faunes) provoquée par l'extraction dans la zone exploitée ;
- la mise en suspension de sédiments et de particules métalliques et l'effet de leur redéposition (par exemple étouffement des organismes fixés) ;
- les vibrations induites par l'extraction ;
- la lumière.

Au lieu de rejet en mer de l'eau remontée avec le minerai, **en surface ou à proximité du site d'extraction** suivant les cas :

- le transfert de masses d'eau de caractéristiques physico-chimiques différentes ;
- le rejet de particules fines après filtration, plus dangereuses pour les espèces que les grosses particules.

En surface :

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

A ces points de vigilance en conduite d'opérations normale s'ajoute le cas d'une dispersion accidentelle de minerai lors de transferts sur le navire ou d'éventuelles ruptures ou fuites de l'unité de remontée, qui pourrait affecter toute la colonne d'eau.

En résumé, les techniques d'exploitation font l'objet de nombreux points de vigilance, d'autant que leurs caractéristiques restent encore mal définies ou confidentielles.

4. Biodiversité, milieux et écosystèmes profonds

4.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire l'état de l'art des connaissances concernant la biodiversité, les milieux et les écosystèmes susceptibles d'être impactés par une exploitation de ressources minières dans l'océan profond. La notion de biodiversité se décline ici en diversité des espèces, diversité des habitats et diversité des écosystèmes eux-mêmes, et intègre les interactions entre les organismes et leur milieu (voir encadré). Le milieu est défini par les propriétés physiques et chimiques de l'environnement.

BIODIVERSITÉ, MILIEUX ET ÉCOSYSTÈMES : QUELQUES DÉFINITIONS

Le terme biodiversité, apparu dans les années 1980, est défini précisément dans l'article 2 de la Convention sur la Diversité Biologique (Rio, 1992) comme la « *variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes.* »

La biodiversité c'est donc tout d'abord la diversité biologique naturelle des organismes vivants telle qu'on l'observe autour de nous. Elle s'apprécie en considérant la diversité des espèces, de leurs habitats ou milieux, et celle des écosystèmes qui résultent de leurs interactions. Mais c'est aussi la diversité des gènes, dans l'espace et dans le temps, qui définit des populations distinctes susceptibles d'évoluer en espèces.

La richesse spécifique, ou diversité alpha, est une première approche de la biodiversité, consistant à dénombrer les espèces d'un habitat donné (aspect qualitatif), en estimant aussi leur abondance (aspect quantitatif). On parle également de diversité bêta, une mesure des différences et similitudes entre habitats, et de diversité gamma lorsque l'on considère tout un ensemble d'habitats reliés entre eux, au sein d'un écosystème par exemple.

La notion de biodiversité est en réalité beaucoup plus complexe car elle intègre les interactions qui existent entre les différents organismes précités, tout comme les interactions entre ces organismes et avec leurs milieux de vie, pour former des écosystèmes. Ainsi les interactions métaboliques en microbiologie et les réseaux trophiques entre organismes participent à la structuration écologique de ces écosystèmes, engendrant des flux de matière et d'énergie ou cycles biogéochimiques.

Ces activités biologiques peuvent à leur tour modifier le milieu, entraînant des modifications telles qu'elles induisent une dynamique temporelle de la biodiversité. Naturellement, des activités anthropiques, comme l'exploitation des ressources minières, en modifiant les habitats ou les cycles biogéochimiques, engendrent elles aussi des changements de biodiversité.

D'une manière générale, il faut être conscient que les connaissances sur les caractéristiques biologiques et physico-chimiques des fonds marins dans l'océan profond sont encore extrêmement parcellaires. Ceci résulte de l'importance de ce biotope (plus de 60 % de la surface du globe et plus de 90 % des régions marines), de son exploration récente et de la difficulté d'y accéder. Pour la majeure partie des fonds océaniques, seules des opérations à partir de navires de surface, par dragage, chalutage ou carottage ont été réalisées et cela depuis seulement 150 ans, permettant une connaissance très fragmentée de la biodiversité abyssale. Longtemps limitée à la mégafaune et à la grande macrofaune, ce n'est que depuis une cinquantaine d'année que l'on explore la biodiversité globale en incluant la méiofaune et le compartiment microbien, mais encore rarement de façon systématique. L'observation directe, par submersible ou caméra tractée, n'existe que depuis une cinquantaine d'années, et les possibilités d'échantillonnage ciblé, couplé à des analyses physico-chimiques à haute résolution spatiale et temporelle, ne sont réellement opérationnelles que depuis le début des années 1980. Ce n'est donc que très récemment que la connaissance de tous ces compartiments, associée à celle des propriétés physico-chimiques de l'habitat, et de leurs interactions est devenue accessible et qu'il a été possible de commencer à comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes profonds et les relations qu'ils entretiennent entre eux.

Cette contrainte d'accessibilité est d'autant plus forte que les écosystèmes concernés sont fragmentés et localisés dans l'espace. Les échelles de variabilité spatiale de ces assemblages varient de plusieurs centaines de kilomètres pour la faune des sédiments sur les plaines à nodules au décimètre pour celle des sulfures à proximité des zones hydrothermales actives. L'effort d'échantillonnage et de mesure nécessaire pour étudier ces écosystèmes est donc très inégal et les techniques utilisées ne sont pas extrapolables d'un milieu à l'autre. L'hétérogénéité de l'habitat définit donc la stratégie d'étude de la biodiversité des milieux et des écosystèmes, mais cette hétérogénéité elle-même reste mal connue pour de nombreux environnements qui n'ont pas fait l'objet d'efforts d'échantillonnage suffisants. En particulier, si les différences entre monts sous-marins ont été décrites à partir de chalutages, la caractérisation de la distribution spatiale à l'échelle d'un mont par des observations et des prélèvements ciblés en submersible commence à peine.

Encore faut-il y ajouter une dimension temporelle, et donc *a minima* répéter les observations dans le temps sur un même site ou mieux encore suivre la diversité et les propriétés du milieu en continu. Compte tenu de la découverte récente de ces écosystèmes et de la difficulté d'accéder à ces environnements, cette dimension temporelle est celle sur laquelle les connaissances manquent très largement pour comprendre et anticiper la dynamique et l'évolution de ces écosystèmes, que celles-ci soient naturelles ou induites par des perturbations anthropiques telles que l'exploitation minière envisagée dans cette expertise.

A ces circonstances s'ajoute l'intérêt scientifique de certains modèles biologiques ou écologiques exceptionnels, notamment pour leurs adaptations à des conditions environnementales extrêmes, et sur lesquels se sont largement focalisées les recherches. Ces priorités de recherche et la difficulté d'accès aux milieux profonds expliquent en grande partie le caractère parcellaire des connaissances que nous avons aujourd'hui de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes d'intérêt dans cette étude. Elles sont très limitées en ce qui concerne les encroûtements cobaltifères, plus fournies pour les champs de nodules polymétalliques, et relativement plus abondantes pour les sulfures. Encore que, dans ce dernier cas, nos connaissances ne concernent quasi-exclusivement que l'environnement des sites hydrothermaux actifs et leur périphérie immédiate et rarement les zones inactives qui sont directement ciblées par les projets miniers. Zones actives et inactives sont cependant liées par le phénomène de circulation hydrothermale et sont, dans l'état actuel des connaissances, souvent situées à proximité des sites visés par l'exploitation. Les communautés des sources actives pourraient donc être également concernées par des impacts directs.

Des progrès techniques récents ont permis une exploration plus systématique. Les liens étroits entre les communautés d'organismes et un environnement physico-chimique fortement hétérogène dans le temps et l'espace apparaissent comme des facteurs déterminants de la dynamique des écosystèmes profonds concernés par l'exploitation des ressources minérales. Cette hétérogénéité est le fait de contraintes hydrodynamiques qui s'exercent de l'échelle décimétrique (panaches de sources diffuses, nodules, terriers et agrégations de faune) à l'échelle de plusieurs kilomètres (circulation autour des flancs des monts sous-marins et des dorsales, transport à grande échelle de panaches hydrothermaux,...). Reflétant ces contraintes, la colonisation des habitats est caractérisée par une distribution très structurée des espèces dans l'espace et dans le temps.

La synthèse de l'analyse bibliométrique développée dans ce paragraphe s'appuie sur un corpus bibliographique comprenant près de 5 000 références de 1990 à 2012. Ces publications concernent l'écologie des environnements profonds potentiellement impactés et ont été principalement limitées aux articles publiés dans des revues à comité de lecture et chapitres de livres, référencés dans le Web of Science pour limiter les redondances ou les travaux non validés par les pairs. La recherche bibliographique a été réalisée par croisement de deux listes obtenues, l'une relative aux types de ressources et leur localisation et l'autre relative à la biodiversité et aux écosystèmes. Pour tous les types de ressources minérales, l'analyse s'appuie sur un corpus dont la plus grande partie a été publiée depuis les années 1990 qui marque une intensification de l'effort de recherche dans ce domaine.

Cependant, parmi toutes les publications référencées à la fin de 2012, seulement 200 concernent directement les impacts sur les écosystèmes de l'exploitation des ressources minérales et leur capacité à répondre aux perturbations de leur environnement. Ces articles sont principalement consacrés aux zones de nodules qui ont fait l'objet de programmes de recherche dédiés dès les années 1990. L'analyse concerne donc plus largement les connaissances acquises sur des écosystèmes profonds remarquables, leur biodiversité et les milieux associés, en se limitant à ceux qui recèlent potentiellement des ressources minérales de type sulfures minéraux, encroûtements de manganèse ou nodule polymétalliques. L'analyse de ces données a permis de préciser les spécificités de chaque type d'écosystème, en termes de biodiversité et de fonctionnement, et d'identifier leurs caractéristiques communes ou au contraire de souligner leurs différences fondamentales. Le domaine est relativement récent et la production scientifique est encore largement dominée par les pays pionniers dans le développement des moyens submersibles de grande profondeur dédiés à l'exploration scientifique. La communauté scientifique française fait partie des acteurs majeurs du domaine, rejoints dans la dernière décennie par d'autres pays acteurs en Europe, Asie ou Amérique, dont plusieurs pays émergents.

Ce chapitre est structuré en deux parties complémentaires, tenant compte des spécificités biologiques et environnementales mais aussi de caractères génériques comme la topographie du fond et son effet sur les courants marins, ou encore l'importance des métaux dans l'environnement. Une première partie de ce chapitre s'attache à décrire l'état de l'art sur la description de la faune et du compartiment microbien associés aux environnements dans lesquels sont rencontrés les trois types de ressources que sont les nodules polymétalliques, les encroûtements cobaltifères et les sulfures hydrothermaux, ainsi que des données sur leur structuration et leur dynamique spécifiques. La seconde partie du chapitre est consacrée aux connaissances que nous avons des processus qui gouvernent le fonctionnement et la dynamique de ces écosystèmes, tant au niveau de l'habitat local que de l'évolution des populations et communautés et des interactions avec les écosystèmes adjacents.

4.2. Description des écosystèmes directement associés aux ressources minérales

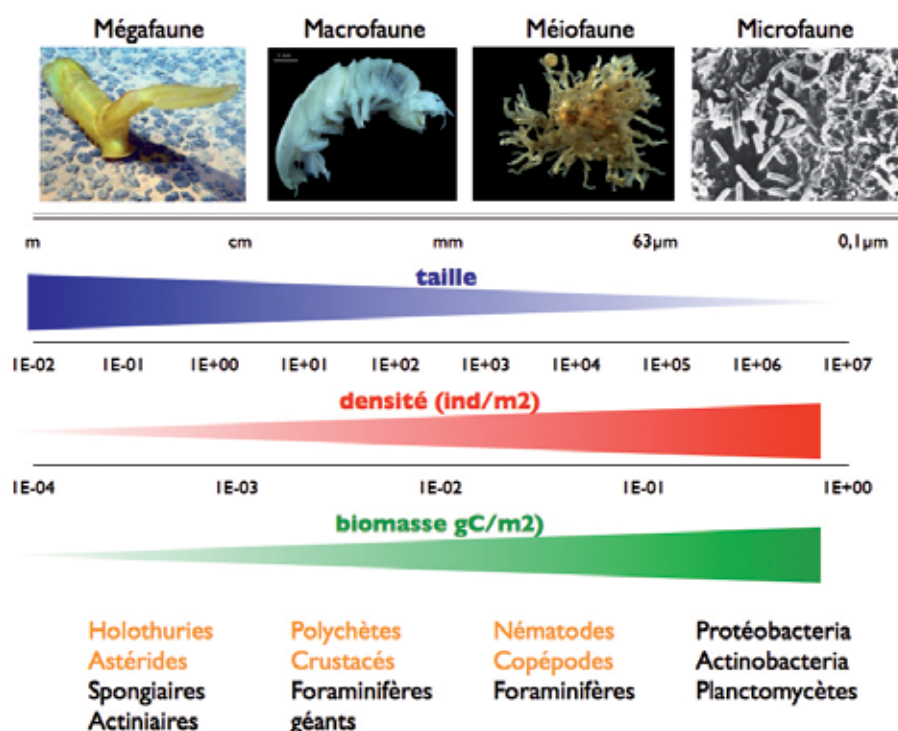
4.2.1. Nodules polymétalliques

Les études portant sur la faune abyssale associée aux zones à nodules ont été principalement motivées par l'évaluation des risques environnementaux liés à une exploitation potentielle de cette ressource en tant que minéral. Elles se sont focalisées sur trois zones géographiques : le bassin du Pérou dans le cadre des projets allemands DISCOL et ATESEPP, le bassin central indien dans le cadre du projet INDEX et la zone de fracture de Clarion-Clipperton dans le Pacifique nord oriental. Cette dernière a fait l'objet de nombreux programmes d'étude pilotés par la NOAA aux Etats-Unis ou par des organismes des 12 pays ayant contracté un permis d'exploration dans la Zone, tels que l'InterOceanMetal Joint Organization (IOM) en Pologne ou l'Ifremer en France.

La faune abyssale des zones à nodule est classiquement divisée en trois classes de taille, correspondant à trois entités fonctionnelles distinctes : la mégafaune, la macrofaune et la méiofaune, sans oublier le compartiment microbien formé par des organismes unicellulaires, procaryotes et eucaryotes. Leurs densités et leurs biomasses décroissent de manière exponentielle avec la profondeur mais à des taux variables suivant les groupes fonctionnels. Au-delà de 4 000 m de profondeur en moyenne, la méiofaune tend à dominer le compartiment benthique, tant en densité qu'en biomasse. Les ordres de grandeur des densités et biomasses de la mégafaune/macrofaune/méiofaune, à 4 500 m de profondeur, sont respectivement de $10^{-2}/10^2/10^5$ ind.m² et $5.10^{-3}/5.10^{-2}/10^{-1}$ gC.m⁻².

Figure 6 : Synthèse des principales caractéristiques de la faune des zones à nodules.

La densité et la biomasse, typiquement faibles en milieu abyssal, augmentent lorsque l'on considère les groupes fonctionnels de taille décroissante. La faune sédimentaire est dominée par des taxons mobiles (en orange) alors que les nodules eux-mêmes permettent l'installation de faune fixée. La diversité microbienne des sédiments et des nodules, en partie similaire, semble néanmoins présenter des particularités propres à chaque substrat. Photos : de gauche à droite, © Ifremer Nodinaut 2004 ; Bionod 2012 ; Bionod 2012 ; © Burnett & Neelson 1981⁴.



En résumé, si l'étude des zones à nodules a débuté dès les années 1960, seules les dernières campagnes à partir des années 1990 ont bénéficié de l'apport des submersibles permettant une analyse des peuplements en place, à petite échelle, seule approche à même de distinguer les habitats sédimentaires (endofaune) et ceux constitués des nodules (épifaune), la faune de ces derniers étant nettement moins bien connue.

De façon générale, la faible résolution taxonomique, associée à une faible abondance rendent difficiles la comparaison des résultats dans l'espace (biogéographie) et dans le temps (dynamique temporelle). La meiofaune, compartiment majoritaire à ces profondeurs (> 4 000 m), est très diversifiée avec cependant quelques espèces qui semblent inféodées aux nodules eux-mêmes. A noter l'importance des protistes dans cette faune endémique, notamment des foraminifères, eucaryotes unicellulaires parfois de grande taille dont le rôle fonctionnel reste à préciser.

La diversité microbienne, négligée dans les premières études par défaut de moyens d'analyse performants, s'est révélée élevée dans les études les plus récentes, tant dans les sédiments que sur les nodules. La microflore spécifiquement associée aux nodules semble jouer un rôle dans leur formation ou leur évolution mais on manque encore d'analyses fonctionnelles détaillées pour le préciser.

4.2.2. Encroûtements cobaltifères

Les encroûtements cobaltifères sont associés aux élévations sous-marines intra-plaques, aux monts sous-marins isolés et aux alignements volcaniques. Ces reliefs sous-marins sont caractérisés par des courants importants générés par leur topographie particulière qui, lorsqu'ils se situent dans des domaines océaniques à faible taux de sédimentation, résulte en une absence de sédimentation pendant de très longues durées (millions d'années). La persistance d'un substrat dur affleurant sur de telles périodes de temps va favoriser l'installation d'une **faune fixée à longue durée de vie**, comme les **coraux** profonds ou les **éponges**, d'autant que les conditions courantologiques locales (upwelling) peuvent favoriser l'apport d'éléments nutritifs. Cette faune fixée constituée d'espèces ingénieuses constitue généralement une **matrice propice à l'installation de nombreuses autres espèces**, y compris, lorsque la profondeur n'est pas trop importante (moins de 2 000 m), les espèces de poissons visées par la pêche commerciale profonde depuis le milieu des années 1970. Les monts sous-marins constituent donc des oasis de vie isolées par de grandes surfaces de plaine abyssale. Ainsi, l'étude scientifique des monts sous-marins a été guidée à la fois par des préoccupations fondamentales d'écologie évolutive et des considérations économiques liées aux pratiques halieutiques.

Au-delà des études sur la composition faunistique, peu de données sont disponibles concernant le fonctionnement et les caractéristiques écologiques de ces communautés. Parmi ces études écologiques, très peu d'études utilisent des méthodes d'observations vidéo *in situ*, et encore moins des moyens d'échantillonnage direct par submersible. Ainsi nos connaissances sur la structure des communautés et le fonctionnement de ces écosystèmes, nécessitant d'intégrer les connaissances de tous les compartiments et de les étudier « en place », restent encore très limitées.

De ces études, pour la plupart centrées sur des zones singulières, des généralisations ou des hypothèses fortes ont pourtant été proposées au cours du temps. Par exemple, ces structures sont souvent décrites comme associées à une grande biodiversité, de fortes biomasses, de fortes productivités, ou encore à de forts taux d'endémisme. Ces caractérisations sont souvent accompagnées d'hypothèses explicatives (isolement insulaire, effet oasis, piège à particules, etc...). Les débats dont la littérature se fait l'écho montrent que ces propriétés spécifiques des monts sous-marins et les hypothèses proposées pour les expliquer se fondent sur un trop petit nombre de données pour décrire correctement l'écologie des communautés associées à ces habitats et *a fortiori* la résilience ou la fragilité de ces écosystèmes face aux perturbations anthropiques. La longévité des organismes filtreurs du benthos pourrait en partie également expliquer ces biomasses importantes même si cette hypothèse reste à tester. Or la longévité des organismes est un élément important

dans l'analyse de la vitesse de restauration d'un habitat et donc pour sa résilience face aux perturbations anthropiques.

Du point de vue fondamental, biologique et écologique, les monts sous-marins sont intéressants par la biodiversité et la productivité biologique qui leur sont associées, avec des corollaires importants en biogéographie et en évolution des habitats profonds. Leur intérêt économique pour la pêche profonde et ses conséquences destructives sur ces écosystèmes ont également motivé nombre d'études sur leur résilience et leur capacité de restauration depuis la fin des années 1970. L'intérêt pour les ressources minérales potentielles que recèlent les encroûtements cobaltifères est plus récent, avec quelques études dès la fin des années 1980 et un accroissement notable des publications après les années 2 000.

D'une manière générale, les monts sous-marins forment des habitats hétérogènes. Ils couvrent une large gamme de profondeurs, dans des contextes océanographiques et géologiques variés. Il n'est donc pas étonnant que ces paramètres environnementaux contraignent fortement la composition spécifique de la faune des monts sous-marins de façon comparable au milieu benthique profond en général. Il est par conséquent impossible à l'heure actuelle de généraliser sur la composition, l'abondance ou la structuration des communautés animales des monts sous-marins. Quant à l'influence des encroûtements cobaltifères sur ces caractéristiques, elle n'a été abordée que de façon indirecte dans quelques travaux aux résultats contrastés (Figure 7).

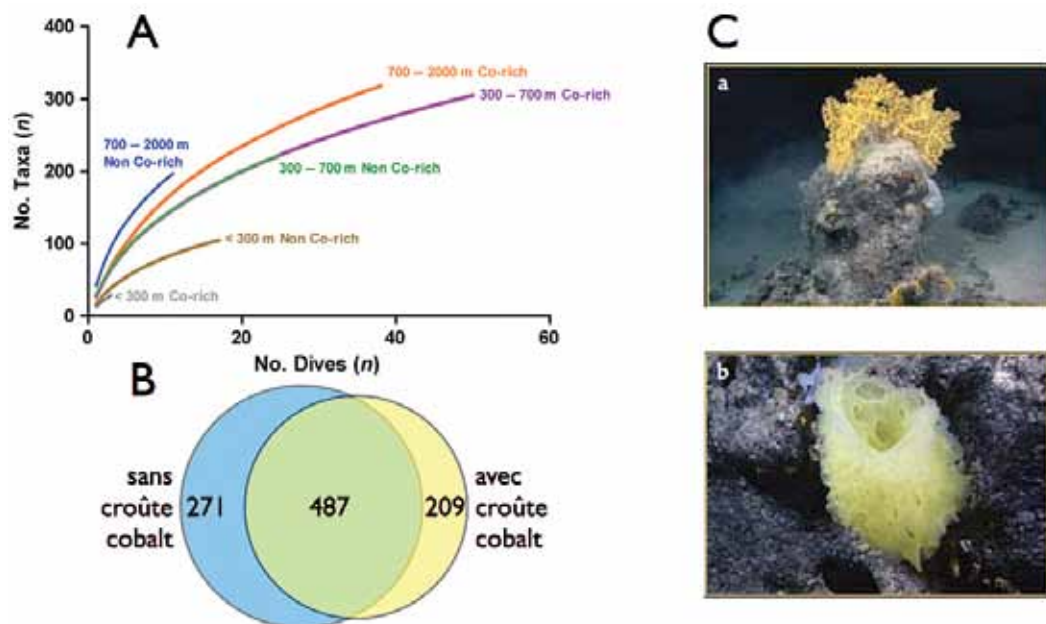


Figure 7 : Faune des encroûtements cobaltifères.

A. Courbes d'accumulation spécifique comparant la diversité (nb taxons) en fonction de l'effort d'échantillonnage (nb plongées) selon la gamme de profondeur et le potentiel en encroûtements cobaltifères (Co-rich/Non Co-rich). D'après Schlacher et al. 2013⁵.

B. Analyse des taxons associés à des sites potentiellement cobaltifères ou non d'après les données de Clark et al., 2011⁶. L'intersection montre qu'une majorité d'espèces s'établit indifféremment sur les sites, qu'ils soient potentiellement cobaltifères ou non

C. Deux exemples d'espèces des monts sous-marins de l'Atlantique Nord-Est : un corail scléroractinaire (a) et une éponge (b). © Univ. Rhode Island, DASS Sc. Party (dans Shank, 2010⁷).

En définitive, la connaissance de la diversité de la macrofaune des monts sous-marins a certes bien progressé ces dix dernières années mais ce n'est pas le cas des compartiments meiofaune et microbien dont l'étude n'est encore qu'ébauchée. Les résultats les plus récents tendent à modérer le caractère exceptionnel de ces structures en termes de biodiversité et d'endémisme. Cependant, le lien des espèces et des communautés décrites avec les encroûtements cobaltifères est rarement établi, la fragmentation de ceux-ci sur les monts sous-marins – qui doit être mieux caractérisée – nécessitant une approche à petite échelle qui fait encore largement défaut.

5. Schlacher, T. A., A. R. Baco, A. A. Rowden, T. D. O'Hara, M. R. Clark, C. Kelley and J. F. Dower (2013). Diversity and Distributions, 20(5): 491-502.

6. Clark, M. (2011). Fauna of Cobalt-rich Ferromanganese Crust Seamounts: Report, Internat. Seabed Authority.

7. Shank, T. M. (2010). Oceanography 23(1): 108-122.

4.2.3. Sulfures hydrothermaux

L'immense majorité de la littérature concerne les sites actifs sur lesquels l'attention des chercheurs s'est portée depuis leur découverte en 1977. Celle-ci a constitué une véritable révolution conceptuelle en biologie et écologie fondamentales par l'originalité de la production primaire chimiosynthétique qui sous-tend ces écosystèmes. Le caractère endémique et les biomasses exceptionnelles de la faune associée ont focalisé l'intérêt scientifique ces trente dernières années, aux dépens des zones périphériques inactives dont la faune visible est apparue plus proche de celle des milieux abyssaux en général. Pour autant, l'imbrication des zones actives et inactives peut concerner des échelles relativement restreintes et ne permet pas de conclure à l'absence d'espèces endémiques ou vulnérables sur les zones inactives ni d'exclure que certaines communautés des zones actives soient impactées par les activités d'exploration et d'exploitation des zones inactives.

Microbiologie

Dès la découverte des sources hydrothermales profondes, l'intérêt marqué des microbiologistes pour les micro-organismes chimiotrophes et extrémophiles a permis de progresser rapidement dans leur étude et d'aboutir aujourd'hui à une relativement bonne connaissance de leur diversité phylogénétique et métabolique. Ces micro-organismes, Archaea ou Bacteria, sont notamment impliqués dans les cycles biogéochimiques des métaux (Fe, Mn), du soufre, de l'azote, du méthane et de l'hydrogène, avec des métabolismes carbonés auto- ou hétérotrophes variés. Malgré cette connaissance, la compréhension de la structuration et de la dynamique temporelle des communautés microbiennes reste difficile en raison de la très grande complexité des micro-niches formées par une cheminée hydrothermale active, cette complexité étant pour partie due au métabolisme des micro-organismes eux-mêmes. Par contraste, l'étude microbiologique des édifices inactifs n'en est qu'à ses débuts. Ces premiers résultats font état de communautés microbiennes distinctes de celles des édifices actifs mais néanmoins abondantes et diverses.

En revanche les connaissances sur les micro-organismes eucaryotes ou les champignons liés aux sites hydrothermaux sont encore beaucoup trop fragmentaires pour pouvoir proposer quelque hypothèse que ce soit sur leur rôle constitutif ou fonctionnel dans les communautés hydrothermales.

Faune

Comme le montre les études de diversité de la macrofaune sur les différents sites hydrothermaux à l'échelle globale, il y a un fort contraste entre des zones bien explorées (Northeast Pacific, East Pacific Rise, Mid-Atlantic Ridge-Nord), et des zones encore insuffisamment décrites (Western Pacific, Indian Ocean, Mid-Atlantic Ridge-Sud), sans parler des dorsales encore quasiment inexplorées (Arctique, Pacifique-Antarctique). Les assemblages faunistiques montrent des compositions variées d'une zone à l'autre, définissant des **provinces biogéographiques** bien distinctes mais connectées. Mais il faut noter que même sur les zones les mieux décrites, de nouvelles espèces continuent à être découvertes.

A l'échelle régionale ou locale, les grands principes de la distribution spatiale des espèces de macrofaune sont comparables, contraints par les gradients thermiques et chimiques, avec des espèces ingénieuses étroitement associées à des bactéries (ecto- ou endosymbioses, voir encadré). Mais si cette distribution est assez bien comprise pour certains habitats (moulières, gastéropodes, siboglinidés,...), elle l'est beaucoup moins pour d'autres (alvinellidés, caridés,) plus difficiles à appréhender. Il manque néanmoins encore des données sur le compartiment meiofaune pour pouvoir comprendre et comparer la globalité des réseaux trophiques qui s'établissent autour des sites hydrothermaux actifs. En revanche, extrêmement peu de données sont disponibles pour les sites inactifs, même lorsque l'on connaît leur existence à proximité des sites actifs.

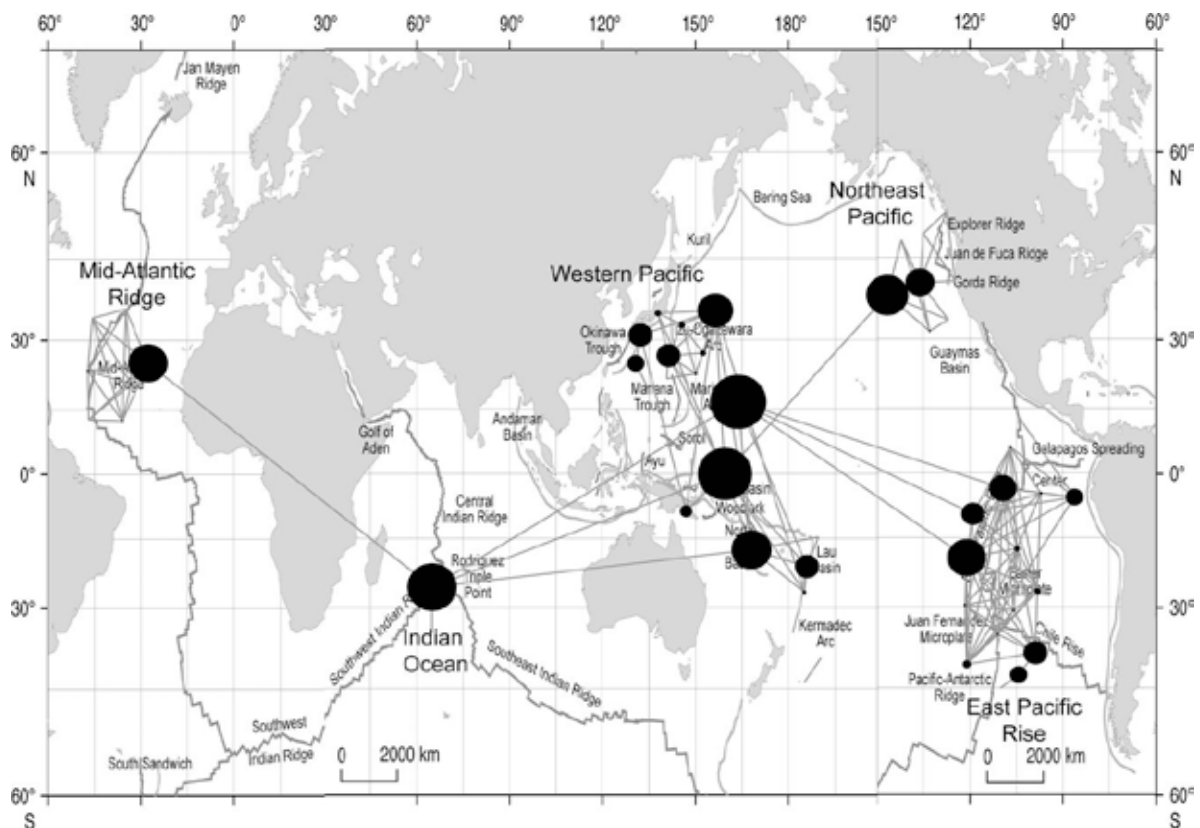


Figure 8 : Provinces biogéographiques

SYMBIOSE, UN MODE DE VIE PRIVILÉGIÉ AUTOUR DES SOURCES HYDROTHERMALES



L'une des caractéristiques principales des écosystèmes hydrothermaux est leur dépendance vis à vis de la production primaire chimiosynthétique bactérienne. Les animaux les plus abondants et les plus emblématiques de ces écosystèmes ont la particularité d'être en réalité des symbioses avec ces bactéries.

C'est le cas des espèces du pôle le plus chaud, étroitement associées aux cheminées hydrothermales, comme le ver *Alvinella pompejana* (EPR) et la crevette *Rimicaris exoculata* (MAR). Ces deux espèces sont des épibioses, des communautés spécifiques de bactéries colonisant des parties bien circonscrites de leur corps : dos d'*Alvinella* ou cavité branchiale de *Rimicaris*. Ces bactéries remplissent un rôle trophique bien établi mais permettent sans doute également à leurs hôtes de modifier le caractère toxique de leur habitat extrême, en particulier pour ce qui concerne les sulfures et les métaux.

Pour les modioles, comme *Bathymodiolus azoricus* (MAR), c'est une double symbiose avec des bactéries thiotrophes, utilisant H_2S , et des méthanotrophes, utilisant CH_4 . L'association est beaucoup plus plastique et la proportion des deux types de bactéries peut varier au cours de la vie de l'individu, sans doute en relation avec les variations de son environnement.

Un peu à l'écart des cheminées, mais toujours dans la zone de diffusion active, on trouve cette fois des endosymbioses, associations physiologiquement plus intégrées entre animal et bactérie. C'est le cas du ver tubicole *Riftia pachyptila* (EPR), dont le symbiote bactérien, *Endoriftia persephone*, logé dans le tronc de l'animal, dépend complètement de son hôte pour ses besoins métaboliques en O_2 , H_2S et CO_2 . L'association s'établit une fois au cours de la vie de l'animal, lors de son recrutement sur un site hydrothermal.

4.3. Facteurs gouvernant la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes

4.3.1. Habitats : hétérogénéité spatiale et processus biogéochimiques associés

Hétérogénéité spatiale

L'hétérogénéité de l'habitat est une caractéristique majeure, commune aux écosystèmes associés aux ressources minérales profondes. Cette hétérogénéité tient autant à l'imbrication de substrats durs (roches et minéraux constitutifs des ressources) et meubles (sédiments), qu'à la mosaïque de peuplements qui les caractérisent à différentes échelles spatiales. Les espèces dominantes elles-mêmes participent à la structuration de l'habitat. Cette fragmentation implique des approches à échelles multiples. Seuls des travaux *in situ* avec des engins submersibles peuvent appréhender cette hétérogénéité, que ce soit pour la cartographie par imagerie, l'échantillonnage des communautés biologiques ou l'étude expérimentale des processus écologiques, de l'échelle d'un champ de nodule ou d'un mont sous-marin à l'échelle sub-centimétrique pour la faune, voire micrométrique pour les communautés microbiennes.

Les environnements associés aux différents types de ressource se distinguent fortement par la nature des habitats concernés ; les habitats sédimentaires ou « substrats meubles » dominent sur les plaines à nodules, tandis que les sulfures sont caractérisés par l'importance des substrats durs. Les encroûtements sur les monts sous-marins associent les deux types de substrat en y ajoutant la présence d'habitat biogénique de type coraux ou gorgones. Les échelles représentatives de la variabilité de ces milieux et de leur biodiversité sont liées à la nature du substrat et donc au type de ressources.

La plupart des études à grande échelle portent surtout sur le compartiment sédimentaire qui a bénéficié d'approches quantitatives grâce à des échantillonnages par dragage ou carottage à partir de navires. Ces approches autorisent des inventaires comparatifs de la biodiversité dans l'espace et le temps qui ont été mises en œuvre dans le cas des zones à nodules, en lien avec la densité et la composition des nodules et la profondeur.

D'une manière générale, les habitats associés aux ressources minérales sont caractérisés par une forte hétérogénéité à multi-échelle de l'habitat, décrite notamment pour les champs hydrothermaux sur les dorsales océaniques et des monts sous-marins. L'hétérogénéité spatiale est la caractéristique principale des habitats associés aux sulfures, à différentes échelles, du micron au kilomètre, et constitue la principale difficulté dans l'application de méthodes quantitatives. Sur les environnements rocheux, associés aux sulfures mais aussi aux encroûtements, la capacité de décrire cette distribution à l'échelle du mètre au kilomètre est facilitée par les outils actuels permettant de construire des mosaïques photographiques à partir d'acquisition d'images sous-marines. Ces cartographies sur des distances de plusieurs centaines de mètres montrent, à l'échelle d'un champ hydrothermal, un patchwork d'habitats plus ou moins imbriqués autour des zones d'émission de fluides.

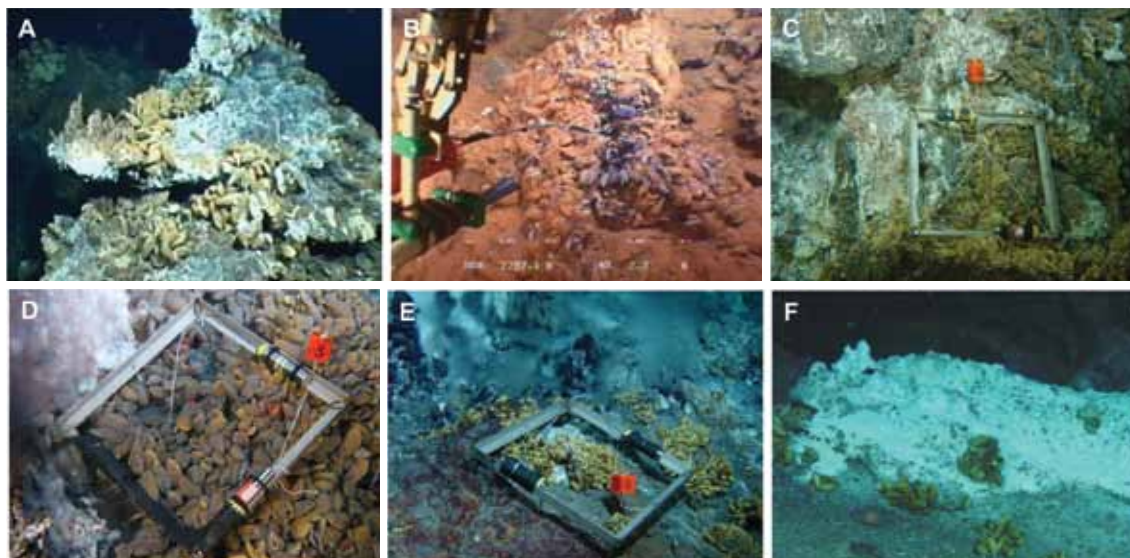


Figure 9 : Assemblages de moules hydrothermales sur différents sites de la dorsale médio-atlantique sur les champs hydrothermaux Menez Gwen, Rainbow et Lucky Strike (Le Bris and Duperron 2010⁸).

Les gradients physico-chimiques à échelle inférieure au mètre sont caractérisés grâce à des mesures *in situ* et prélèvement ciblés à l'aide du bras robotisé du submersible (B).

Les quadrats (50 x 50 cm) sont équipés de sondes de température pour l'enregistrement des fluctuations naturelles du mélange fluide-eau de mer.

Les conditions environnementales qui leur sont propres, souvent extrêmes au regard des conditions moyennes de l'océan, exercent des contraintes auxquelles se sont adaptées les espèces au cours de l'évolution, fournissant de nombreux modèles d'étude de mécanismes évolutifs, physiologiques et écologiques.

Les échelles inférieures au mètre, caractéristiques des assemblages de faune des sources hydrothermales ou des flancs de monts sous-marins, sont impossibles à appréhender de la surface. L'étude de la dynamique et du fonctionnement des communautés de substrat dur reste donc essentiellement liée à l'utilisation de submersibles permettant des approches à petite échelle centrées sur les processus qui offrent des capacités de manipulation et de cartographie fine. Les échelles micrométriques qui caractérisent les habitats microbiens réalisées en laboratoire impliquent elles aussi des échantillonnages ciblés de roches ou de sédiments.

Processus de transformation des métaux et chimiosynthèse

Les écosystèmes associés aux ressources minérales profondes sont le siège de transformations biogéochimiques importantes, qui les distinguent des milieux abyssaux classiques. Alors que les masses d'eau profondes sont oligotrophes et homogènes chimiquement sur de très larges échelles, les environnements associés aux ressources minérales offrent des ressources énergétiques variées qui permettent à des communautés faunistiques et microbiennes spécialisées de s'établir. Dans ces habitats benthiques où des gradients physico-chimiques marqués favorisent les échanges d'électrons entre composés réduits et oxydants, une production de biomasse chimiosynthétique est possible par fixation de CO₂ à partir de composés inorganiques.

A l'échelle de l'écosystème, des interactions étroites sont ainsi établies entre micro-organismes chimioautotrophes et une variété de substrats minéraux (dissous ou précipités) sous l'influence

d'espèces animales ingénieuses. Celles-ci jouent un rôle majeur dans les transferts d'énergie au sein de l'écosystème. Ce rôle de la chimiosynthèse microbienne ne se limite pas aux communautés spécialisées et fortement productives des zones hydrothermales actives, mais concerne également les zones de nodules, encroûtements et sulfures via les processus d'oxydoréduction des métaux et des sulfures minéraux. Dans les environnements associés aux dépôts sulfurés inactifs, les sédiments des champs de nodules ou des encroûtements de manganèse, les composés réduits sont présents sous forme solide d'oxydes ou de sulfure métalliques. Peu d'études sont encore disponibles pour caractériser la diversité des communautés microbiennes propres à ces habitats mais leur proximité avec celles des cheminées hydrothermales, du plancher basaltique, des sédiments hydrothermaux ou des profondeurs de la croûte fracturée est probable. La libération de métaux et leur biodisponibilité dans l'environnement est une conséquence des couplages entre production, dégradation de matière organique et processus d'oxydo-réduction des métaux. D'autres types d'habitats 'chimiosynthétiques' existent et jouent un rôle comme habitats-relais dans la dispersion de certaines espèces communes à grande échelle mais ce rôle n'est pas établi pour les espèces-clés endémiques des écosystèmes concernés par l'exploitation des ressources.

4.3.2. Stabilité des habitats

D'une manière générale, la variabilité à micro-échelle spatiale des habitats associés aux ressources minérales est identifiée, mais sa composante temporelle est très peu connue. Les fluctuations naturelles du milieu à l'échelle de quelques heures voire même de quelques secondes caractérisent les environnements hydrothermaux et les contraintes physiologiques qui en résultent sont déterminantes pour l'établissement de la diversité sur ces zones. L'importance de ces fluctuations à court terme doit être précisée pour les environnements associés aux encroûtements et sulfures minéraux inactifs, car elle détermine la sensibilité des communautés présentes aux variations de température, d'oxygène, de pH et, potentiellement, de toxicité induites par l'exploitation des ressources.

Un nombre très limité d'écosystèmes profonds a fait l'objet d'un suivi à long-terme. Même pour les environnements abyssaux classiques, ces études ont mis fin au paradigme selon lequel l'océan profond est un milieu stable. Sur cette base, il est possible d'inférer pour les milieux concernés par l'exploitation des ressources minérales une dynamique saisonnière générale.

Il est également acquis que les environnements associés aux ressources minérales, en dehors des zones de nodules sur les plaines abyssales, sont soumis à d'autres contraintes dynamiques. A l'hydrodynamique particulière de ces milieux s'ajoute l'instabilité géologique des zones d'accrétion où s'établissent les circulations hydrothermales. Certains sites de l'Ouest Pacifique par exemple sont caractérisés par une activité volcanique intense. L'étude expérimentale de la recolonisation de certains sites hydrothermaux actifs a illustré l'importance de ces perturbations naturelles majeures dans les patrons de biodiversité. Même sans événement majeur, la composition des communautés hydrothermales est variable dans le temps et se modifie au gré des changements de régime de flux, à des échelles qui peuvent varier de la semaine au mois. En dehors de quelques rares sites ayant fait l'objet d'acquisition d'images en continu, cependant, seules des observations annuelles ou multi-annuelles sont disponibles pour illustrer cette variabilité temporelle (Figure 10).

S'il est possible d'identifier des mécanismes fondamentaux qui permettront de modéliser les impacts potentiels, il n'est pas possible d'extrapoler directement les observations réalisées sur certains sites modèles à l'ensemble des écosystèmes concernés par l'exploitation. Il est important de souligner, notamment, que les échelles temporelles caractéristiques diffèrent nettement entre sulfures minéraux, encroûtements de manganèse ou nodules. Il faut également reconnaître la spécificité des sulfures sur le plan de la dynamique temporelle des habitats par rapport aux autres environnements tant pour les propriétés des habitats spécifiques que les processus de recolonisation.

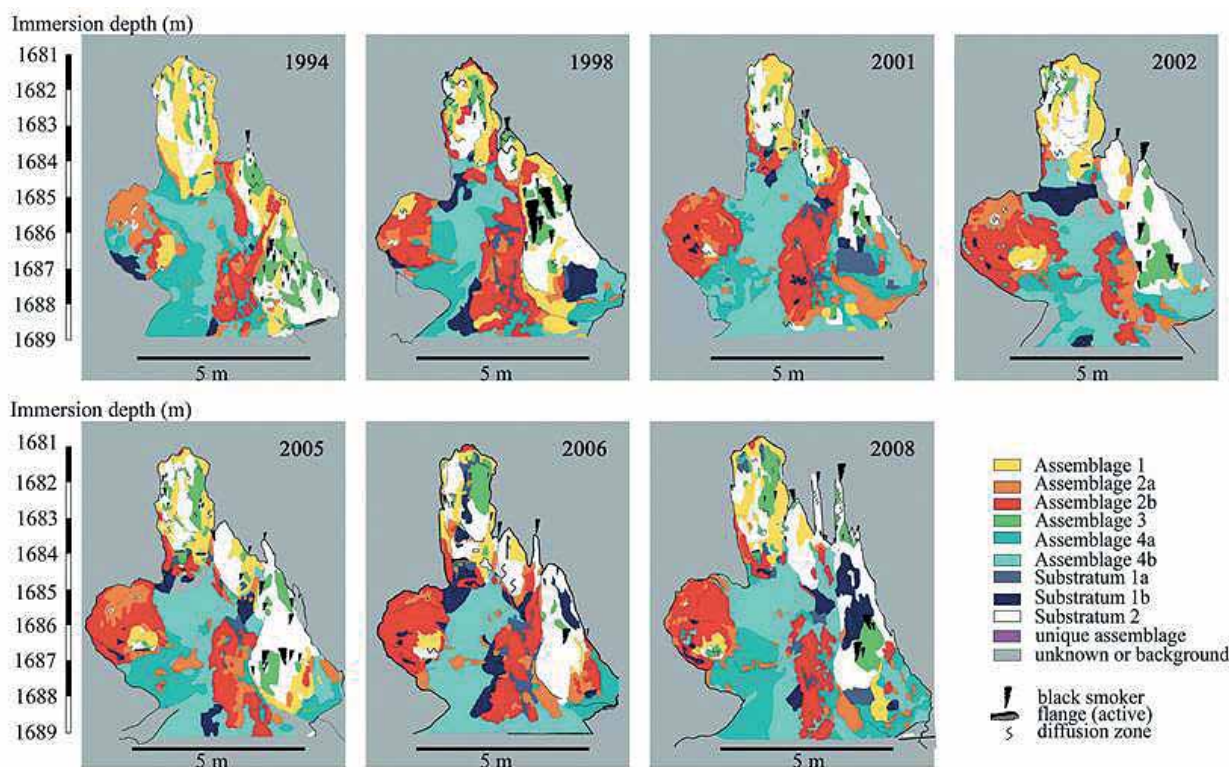


Figure 10 Modification de la distribution des assemblages caractéristiques et du substrat minéral sur l'édifice hydrothermal Tour Eiffel entre 1994 et 2008 (Cuvellier et al. 2011⁹).

4.3.4. Interactions espèces-habitats

Des stratégies originales d'adaptation à des conditions extrêmes de température et de toxicité ont été mises en évidence pour certaines espèces endémiques associées aux milieux hydrothermaux actifs. De nombreux organismes hydrothermaux présentent des adaptations permettant de limiter la teneur en sulfure libre dans leurs organes et certaines espèces présentent des adaptations respiratoires qui leur permettent de survivre à des milieux pauvres en oxygène. La tolérance vis-à-vis des conditions thermiques et chimiques définit des assemblages hydrothermaux types, dominés en biomasse par un petit nombre d'espèces.

Le caractère exceptionnel des adaptations biologiques (génomiques et phénotypiques) des espèces inféodées à ces milieux extrêmes justifie leur intérêt, tant comme modèles scientifiques que comme source de nouvelles molécules pour des applications médicales ou biotechnologiques. Par exemple de nombreuses études se sont intéressées aux propriétés du sang de ces organismes, et en particulier aux pigments respiratoires (hémoglobine ou hémocyanine) à forte affinité pour l'oxygène (Figure 11).

Ces espèces dites « extrémophiles », issues de lignées évolutives uniques, ne sont pas directement la cible des activités minières puisqu'elles sont associées aux habitats de haute température. Ce n'est pas le cas des espèces qui colonisent les sources diffuses potentiellement rencontrés à proximité ou sur les dépôts sulfurés parfois éloignés des fumeurs et qui risquent d'être plus directement impactées.

La découverte de lignées exceptionnelles est récente sur les zones d'activité hydrothermale et l'inventaire reste inachevé. De nombreuses propriétés adaptatives sont encore à explorer. La spécificité génétique et les adaptations des espèces associées aux zones inactives restent par contre à ce jour quasi inconnues, tant sur le plan microbiologique que faunistique.

A l'inverse, les zones de nodules et d'encroûtements ne sont pas *a priori* soumises à ce type d'anomalie chimique. Au contraire, la stabilité des propriétés des eaux profondes (acidité, oxygène, température) doit être considérée pour appréhender les risques d'acidification, d'appauvrissement en oxygène et autres perturbations liés aux panaches.

Figure 11 : Crabe *Bythogrea thermydron*.
Espèce endémique de la dorsale Pacifique,
dont les adaptations respiratoires ont été
particulièrement étudiées.



4.4. Populations et communautés

4.4.1. Connectivité des populations

La capacité de maintien des populations doit être évaluée au regard du degré d'endémisme propre à chaque site et des patrons de diversité génétique qui reflètent la connectivité avec d'autres sites distants, et de leur capacité de recolonisation d'un habitat fragmenté. A ce jour, seules les études menées sur les espèces hydrothermales, naturellement soumises à des phénomènes d'extinction-recolonisation, renseignent sur ces questions et montrent la grande disparité des capacités de dispersion et de recrutement larvaire.

Dans la grande majorité des cas, et notamment lorsque les espèces présentent une phase larvaire benthopélagique, ces études ont montré que les espèces sont capables de recoloniser rapidement de nouveaux sites et de maintenir un flux génique relativement important entre populations sur des milliers de kilomètres. L'étude fine de la structure génétique des espèces hydrothermales montre cependant que la plupart des espèces suivent un modèle de dispersion en pas japonais. La colonisation et les échanges entre sites actifs se fait alors de proche en proche, la distance géographique entre deux sites faisant œuvre de barrière.

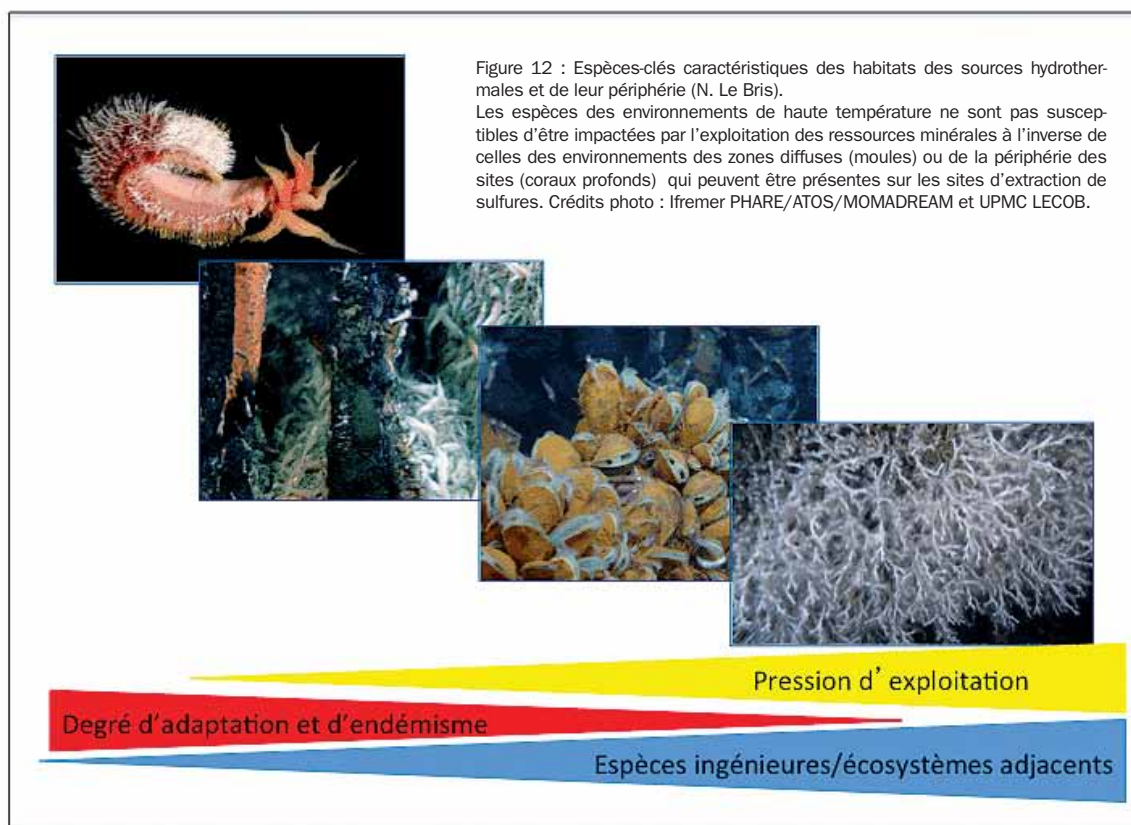
Les modèles couplés de transport et de biologie larvaire commencent juste à être définis pour prédire les échelles spatio-temporelles de recolonisation des sites. Ces simulations montrent qu'un système instable tend à favoriser les stratégies de dispersion les plus extrêmes en sélectionnant des espèces qui colonisent l'habitat de proche en proche (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) ou des espèces à larves très dispersives ayant la capacité d'être transportées sur de longues distances en état de dormance. Certaines espèces pourraient même avoir des stratégies de dispersion alternatives selon l'état de l'environnement, notamment lorsque l'activité hydrothermale diminue. Ce type de stratégie mixte n'a cependant pas encore été mis en évidence jusqu'à présent. Il convient donc de rester extrêmement mesuré dans l'exploitation minière à proximité des champs hydrothermaux et notamment de proscrire l'exploitation d'un champ dans sa globalité, ce dernier pouvant servir de pierre de gué à la dispersion à une échelle spatiale plus large. De même, augmenter le taux d'extinction des sites par l'exploitation minière pourrait avoir des conséquences opposées sur les espèces selon le type de stratégie de dissémination sélectionnée. Dans ce type de modèle, la qualité de l'habitat et son influence sur le recrutement larvaire et la croissance des organismes, sont généralement ignorées. Le rôle des propriétés physico-chimiques du milieu sur la dynamique de recolonisation et le maintien des metapopulations à grande

échelle est aujourd'hui quasi-inexploré sauf peut-être pour les coraux profonds. La résilience de certaines espèces face aux impacts multiples du changement global (réchauffement, acidification) et de la destruction par les activités de pêche commence à faire l'objet d'études spécifiques de la qualité de l'habitat.

4.4.2. Espèces clés

La recherche consacrée aux milieux ciblés par l'exploitation des ressources minérales, ou leur proximité immédiate, met l'accent sur des espèces-clés inféodées à ces habitats ou d'autres espèces ingénieuses plus communes des écosystèmes profonds, telles que les coraux d'eaux froides. Dans les écosystèmes hydrothermaux, les symbioses multiples constituent une stratégie particulièrement avantageuse, qui se reflète par des taux de croissance exceptionnels pour l'océan profond comme par exemple pour les moules du genre *Bathymodiolus* de plusieurs centimètres par an. La notion d'espèces ingénieur se confond alors avec celle d'espèce fondatrice lorsque celle-ci favorise les échanges d'énergie. La vulnérabilité des écosystèmes impactés par l'exploitation des ressources minérales dépend en particulier de la sensibilité de ces espèces-clés aux perturbations.

Des espèces ingénieuses dans les environnements profonds sont également identifiées en dehors des écosystèmes chimiosynthétiques. Les espèces profondes de gorgones et coraux formant des récifs ou des canopées sont décrites comme abondantes sur les monts sous-marins, et plus largement toutes les surfaces minérales susceptibles de présenter des encroûtements. Les coraux froids scléactiniaires sont notamment rencontrés dans de nombreuses régions du globe et notamment celles susceptibles d'être impactées par les activités minières, comme par exemple la dorsale médio-Atlantique. L'influence sur les propriétés hydrodynamiques du milieu de ces espèces est clairement identifiée, mais c'est surtout leur rôle de refuge pour différentes espèces



et particulièrement leurs stades juvéniles qui a conduit à inscrire ces espèces sur la liste des espèces protégées. Par exemple, *L. pertusa*, une espèce constructrice de récif, est répertoriée sur la ride Reykjanes et la dorsale Atlantique et associée avec une mégafaune (crinoïdes, éponges, bivalves, galathées) 1,6 fois plus importante dans ces habitats coralliens que dans les zones dépourvues de coraux.

Différents facteurs biotiques et abiotiques peuvent influencer le taux de croissance des coraux, tels que l'apport de nourriture, la turbidité, la température, l'hydrographie et la chimie de l'eau de mer. Parmi ces facteurs limitants, la teneur en particules apparaît comme un paramètre fondamental, dans le contexte d'exploitation des substrats profonds.

La gestion raisonnée des écosystèmes potentiellement impactés nécessite également une connaissance préalable de la dynamique temporelle des communautés et du mode de fonctionnement des métapopulations d'espèces qui composent ces communautés.

Dans les sédiments associés aux nodules, le rôle d'espèce ingénieur n'a pas été particulièrement souligné et réfère probablement plus aux espèces communément considérées comme espèces ingénieurs dans les environnements sédimentaires ; notamment les espèces qui forment des terriers et favorisent ainsi l'oxygénation des sédiments et les transferts de matière.

4.4.3. Transfert de matière et d'énergie

Réseaux trophiques

Deux types de production primaire alimentent les réseaux trophiques profonds. La matière organique produite par la photosynthèse, en surface et transportée vers le fond, et la chimiosynthèse microbienne dans les régions obscures de l'océan. La disponibilité de la ressource d'origine photosynthétique diminue considérablement des zones d'encroûtements sur les monts sous-marins aux profondeurs abyssales des zones de nodules, tandis que la production microbienne chimioautotrophe est à la base d'écosystèmes profonds de forte productivité à proximité des zones de sulfures.

L'importance de ces différentes contributions est une question-clé pour l'évaluation de la spécificité et des services écosystémiques associés aux écosystèmes concernés par l'exploitation des ressources. La grande majorité des études actuelles sur les réseaux trophiques basés sur une production microbienne chimiosynthétique concerne les milieux associés aux circulations hydrothermales. Compte-tenu des faibles quantités et de la qualité réduite des apports d'origine photosynthétique vers l'océan profond, l'origine de la matière organique et la contribution de cette production primaire locale exportée en périphérie des sites actifs sont des facteurs potentiellement importants.

Les approches isotopiques identifient cependant une influence de la fixation du carbone par les micro-organismes aussi sur les zones sans circulation de fluides (encroûtements et sulfures inactifs). La complexité des apports trophiques est cependant mal maîtrisée tant sur les zones en périphérie des sources hydrothermales actives que sur les flancs des monts sous-marins où une augmentation de la ressource d'origine photosynthétique peut résulter d'un accroissement de la production primaire de surface et de son transport vers le fond par le mélange vertical des masses d'eau.

Relations avec les écosystèmes adjacents

Les relations entre les écosystèmes associés aux ressources minérales et les écosystèmes pélagiques et benthiques adjacents sont aujourd'hui quasiment inconnues. On peut s'appuyer cependant sur des connaissances générales concernant la circulation des masses d'eau océaniques profondes qui lient les environnements associés aux ressources minérales aux écosystèmes péla-

giques à plus ou moins grande échelle, l'existence d'écosystèmes particuliers étant liée à la topographie et ses effets sur la circulation régionale, et en particulier les habitats abritant des coraux profonds et les communautés qui leurs sont associées sur les flancs des monts sous-marins ou des dorsales océaniques.

La dimension régionale du mélange vertical des masses d'eau commence à être mieux connue et révèle l'importance potentielle de l'hydrodynamique à petite échelle dans le transport de matière entre écosystèmes benthiques et pélagiques adjacents. Plusieurs campagnes récentes ont permis de mettre en évidence un mélange abyssal accru au-dessus des zones de forte variation de la topographie, des dorsales océaniques, des monts sous-marins, ou des bassins arrière-arcs caractérisés par une topographie complexe, ainsi que l'influence de la topographie sur la courantométrie locale jusqu'à présent peu étudiée. Elle apparaît comme un élément-clé du fonctionnement des écosystèmes impactés. De la circulation océanique locale dépend notamment la capacité de maintien des populations par la dispersion de larves, et du transport de particules et composés minéraux dissous, dont les métaux remobilisés lors de l'exploitation des ressources. La densité des espèces suspensivores qui dominent les environnements périphériques des sites hydrothermaux actifs ou encore les flancs des monts sous-marins met par ailleurs l'accent sur les implications locales de ces phénomènes hydrodynamiques, tant sur la diversité des apports de matière organique que sur les propriétés physico-chimiques des habitats.

La structure des courants profonds demeure très mal connue à l'échelle synoptique du fait du manque d'observations systématiques. Dans les régions équatoriales, il existe des courants équatoriaux, dirigés soit d'ouest en est, soit d'est en ouest, avec des vitesses de 5-10 cm/s à des profondeurs intermédiaires et s'étendant jusqu'à au moins 1 200 m de profondeur. Ces jets mis en évidence de façon ponctuelle par des campagnes dédiées bénéficient aujourd'hui d'observations à plus large échelle grâce aux profileurs Argo mais demeurent limitées aux 200 m supérieurs de l'océan. Ces résultats très récents illustrent la complexité et la variabilité de la circulation océanique à l'échelle régionale, notamment dans l'Ouest Pacifique qui concentre de nombreux sites d'intérêt pour les activités minières. En dessous de ces profondeurs les connaissances sont encore très largement parcellaires.

S'il n'y a pas nécessairement de relation directe avec l'existence d'encroûtements cobaltifères ou de dépôts de sulfures, le contexte régional de circulation favorise le couplage entre topographie et hydrodynamique des eaux profondes, compte-tenu de la topographie des environnements dans lesquels sont rencontrées ces ressources minérales (monts sous-marins ou flancs de dorsales). Ces propriétés hydrodynamiques à mésoéchelle jouent un rôle fondamental dans les relations entre écosystèmes adjacents. C'est un élément déterminant du transport larvaire entre écosystèmes distants de même nature, comme ceux des monts sous-marins où sont rencontrés les encroûtements ou ceux des sources hydrothermales. A ce titre, elles jouent un rôle majeur dans la connectivité entre populations d'espèces sinon endémiques, au moins spécifiques de ces habitats associés aux ressources minérales.

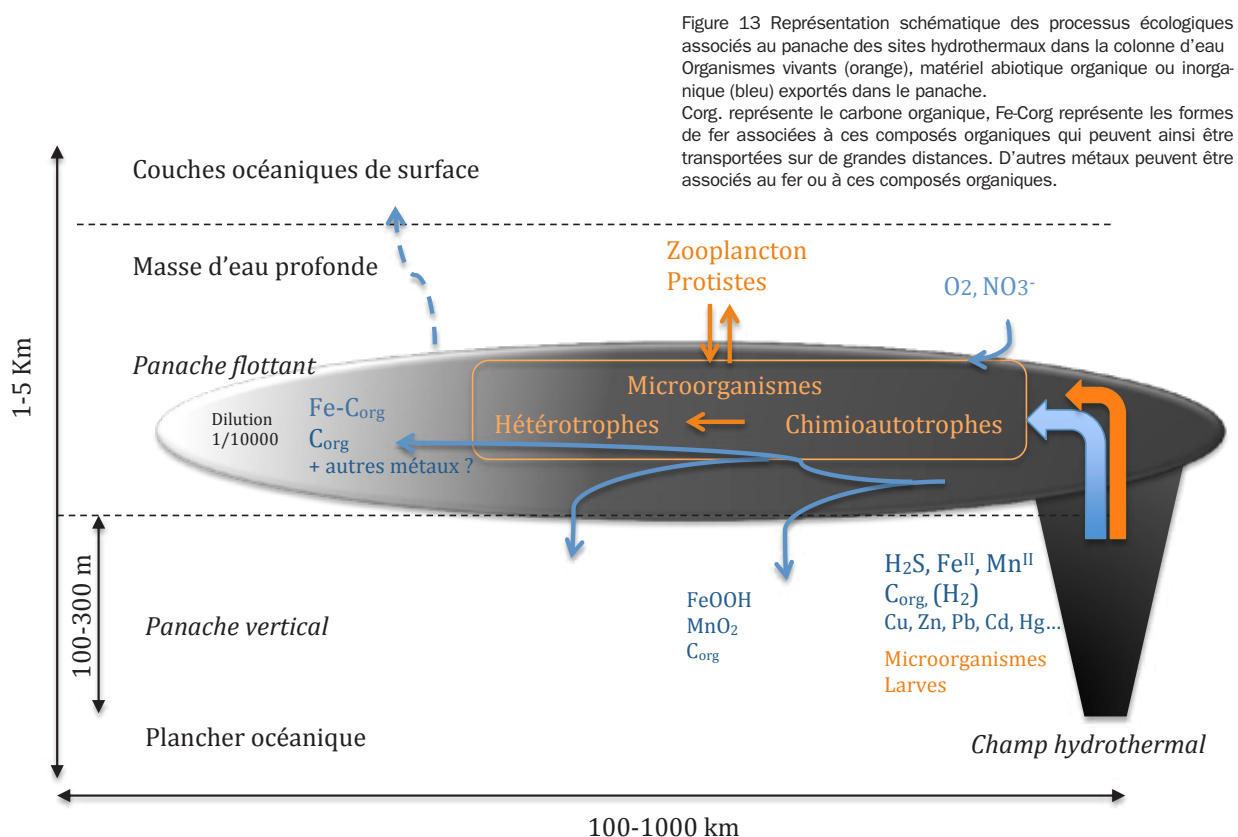
Les structures hydrodynamiques particulières formées par ces anomalies topographiques sont également connues pour favoriser l'import vers la surface de nutriments minéraux et l'export vers le fond de matière organique produite en surface. Ces environnements forment des points chauds de diversité et d'abondance dans la colonne d'eau, qui se reflètent, par exemple, dans l'analyse de données de capture de pêche à l'échelle globale sur les monts sous-marins. Certaines études suggèrent que ce phénomène existe aussi sur les dorsales océaniques bien que nettement moins documenté du fait d'un nombre restreint de travaux dédiés.

L'une des conséquences importantes de ce phénomène est également l'existence de populations de coraux d'eau froide et d'autres suspensivores. Les environnements où sont présentes les ressources minérales peuvent ainsi constituer un habitat propice aux coraux froids et aux nom-

breuses espèces associées, comme cela a été montré par exemple sur les monts de sulfures inactifs de Papouasie Nouvelle Guinée. Mieux documentées sur les marges continentales, la distribution, la diversité et l'abondance de ces communautés commencent à être mieux connues sur les monts sous-marins mais restent peu explorées sur les dorsales médio-océaniques et autres environnements associés aux sulfures.

Influences directes et indirectes sur le cycle du carbone océanique

Si de plus en plus d'études s'interrogent sur la contribution au cycle du carbone global des processus chimiosynthétiques dans les régions obscures des océans, l'importance régionale de ces phénomènes n'a été considérée jusqu'à présent que de manière anecdotique. Pour autant, les émissions locales de CO_2 issues de l'activité magmatique ou de méthane formé par l'interaction des roches du manteau et de l'eau de mer peuvent constituer localement des flux importants, eux-mêmes régulés par les communautés chimiosynthétiques. Le fer et d'autres métaux biologiquement actifs, issus des émissions hydrothermales ou de la remobilisation de formes labiles, contribuent aussi potentiellement à la fertilisation des eaux de surface océaniques.



Pour l'instant, l'importance de ce phénomène n'est considérée que sur de larges échelles temporelles et des effets plus locaux sur la colonne d'eau avec des pas de temps plus courts sont suggérés, notamment dans les zones côtières ou de moyenne profondeur.

4.5. Conclusion

Seule une fraction réduite de la production scientifique appréhende directement les questions de ressources et d'impacts, tandis que la description de communautés originales et de nombreuses espèces nouvelles s'accélère à mesure que s'intensifie l'effort d'exploration des fonds marins associés aux ressources minérales, dorsales océaniques et de zones de subduction, monts sous-marins et plaines à nodules. Cet inventaire encore largement incomplet révèle l'ampleur de ce patrimoine biologique et sa complexité biogéographique et écologique. La communauté scientifique française fait partie des acteurs majeurs du domaine, rejoints dans la dernière décennie par d'autres pays acteurs en Europe, Asie ou Amérique, dont plusieurs pays émergents. Malgré cette mobilisation internationale, les efforts d'inventaires sont cependant très inégaux et les connaissances manquent encore largement pour de nombreux compartiments tels que la faune et la flore microbienne des environnements hydrothermaux anciens éloignés des zones actives ou la microbiologie des environnements de nodules et des encroûtements.

Les grands programmes de recherche dédiés aux projets d'exploitation des nodules, eux-mêmes, ont non seulement révélé un grand nombre d'espèces nouvelles mais ont également souligné la difficulté d'approches statistiques robustes permettant une comparaison et donc une extrapolation des études, du fait de l'hétérogénéité des habitats. Celle-ci est bien plus importante encore, en termes de contraintes physico-chimiques et de sources d'énergie exploitées, pour les communautés profondes associées aux autres types de ressources minérales, tels que les sulfures et les encroûtements. D'une manière générale, l'inventaire de la diversité des espèces dans les environnements profonds, miroir de la diversité des habitats, reste largement incomplet, même si des progrès considérables ont été réalisés grâce aux outils de la microbiologie et de la taxinomie moléculaires et les moyens accrus d'exploration tels que les ROVs.

Parmi les manques identifiés pour l'anticipation des impacts potentiels, la dimension temporelle des écosystèmes et les processus qui gouvernent la dynamique des communautés (dont la connectivité) sont particulièrement soulignés. Ceci nécessite de s'interroger sur les relations entre communautés sur des échelles plus larges que les environnements directement ciblés par l'exploitation des ressources minérales et s'appuie, entre autre sur la connaissance de la circulation hydrodynamique profonde à meso-échelle. L'intégration des connaissances impliquant différents types d'interactions dans les écosystèmes, comme le transport et les transformations microbiennes des métaux ou l'influence de la méiofaune et d'espèces ingénieuses sur les transferts d'énergie et la structuration des habitats, est par ailleurs indispensable pour une compréhension globale des écosystèmes susceptibles d'être impactés et de leur capacité à répondre à des perturbations. Enfin, les relations entre écosystèmes adjacents ne sont pour l'instant considérées qu'au travers de questions très spécifiques telles que l'impact des panaches hydrothermaux et doivent être plus systématiquement prises en compte en s'interrogeant sur les fonctions écologiques.

5. Impacts sur l'environnement et les services écosystémiques

Indéniablement, les processus miniers vont avoir des impacts sur l'environnement. Ces impacts pourront être très localisés ou au contraire très étendus, d'une durée plus ou moins longue, et seront plus ou moins spécifiques selon la nature de la ressource exploitée, les spécificités des communautés biologiques associées à cette ressource, les caractéristiques de l'environnement, la vulnérabilité et les capacités d'adaptation des écosystèmes face à ces impacts. Si certains impacts ont été confirmés et précisés grâce à des simulations en laboratoire ou à des tests in situ à petite échelle, nombreux sont ceux qui restent à l'état d'hypothèses, construites à partir des connaissances actuelles sur les technologies d'exploration et surtout d'exploitation, ainsi que sur la biodiversité, les écosystèmes et les milieux associés aux ressources.

La biodiversité, les écosystèmes et les milieux associés aux ressources minérales marines profondes ou susceptibles d'être impactés par des opérations connexes à l'extraction du minerai, rendent ou pourraient rendre un certain nombre de services aux sociétés humaines : les services écosystémiques.

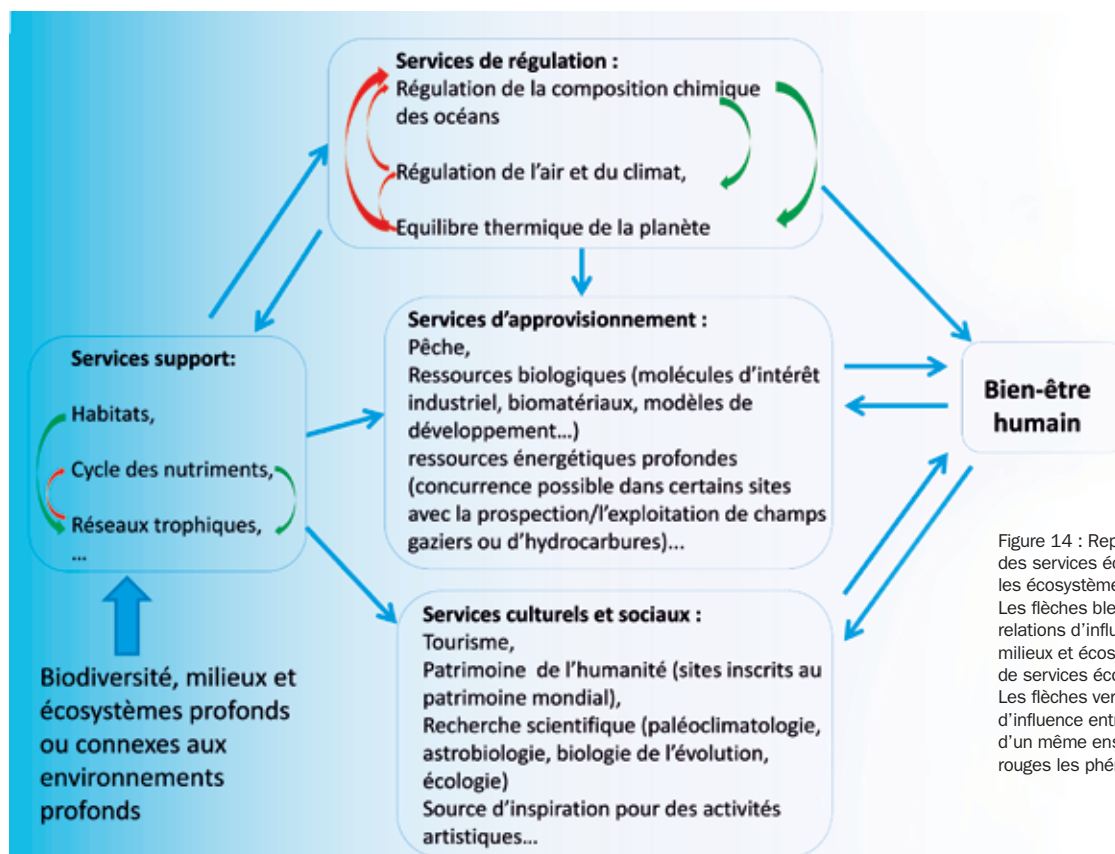


Figure 14 : Représentation schématique des services écosystémiques rendus par les écosystèmes profonds. Les flèches bleues désignent les relations d'influence entre la biodiversité, milieux et écosystèmes et les ensembles de services écosystémiques. Les flèches vertes désignent les relations d'influence entre les services au sein d'un même ensemble et les flèches rouges les phénomènes de rétro-action.

La terminologie « services écosystémiques » désigne les bienfaits rendus aux hommes par les écosystèmes. Ces services se répartissent en quatre grandes catégories et, plus spécifiquement pour les milieux marins, concernent :

- **les services support**, à la base de tous les autres services rendus par les écosystèmes, pouvant subir un impact plus ou moins direct : **habitats, cycles des éléments, réseaux trophiques...**
- **les services d'approvisionnement**, qui permettent d'obtenir des biens directement commercialisables : **pêche, ressources énergétiques profondes, modèles en recherche médicale et source de molécules innovantes pour de nombreuses industries** (pharmaceutique, biotechnologique, cosmétique, alimentaire, papetière, textile, pétrochimique, minière, des biocarburants, des détergents, des adhésifs, des peintures,...), **pépinière** pour la restauration de certaines espèces de **coraux** précieux...
- **les services de régulation**, qui sont des bénéfices obtenus par la régulation du milieu par des processus soutenus par les écosystèmes : **équilibre thermique** de la planète, régulation de l'**air** et du **climat**, régulation de la **composition des océans, absorption et détoxification d'éléments toxiques** (mercure, zinc, cuivre...).
- **les services culturels et sociaux**, non matériels : **tourisme, écotourisme autour des cétacés et des requins, tourisme d'aventure en eaux profondes, patrimoine historique et héritage de l'humanité** (zones classées à l'Unesco ou protégées), **paléoclimatologie, recherche sur l'origine de la vie, les adaptations du vivant et le fonctionnement d'écosystèmes en conditions environnementales extrêmes ou encore source d'inspiration** pour des activités créatrices.

La valeur économique associée à ces services est définie comme « une relation d'équivalence subjective entre les biens, qui dépend de leur utilité et de leur rareté »¹⁰. L'« utilité » de la biodiversité et des services écosystémiques se perçoit :

- d'une part, à travers leur contribution au « bien-être » humain ;
- et d'autre part, à travers ce que la perte de la biodiversité entraînerait comme coût pour les humains ou comme changement de comportement/sociétal.

S'il existe de nombreuses méthodes d'évaluation des services écosystémiques, aucune ne fait aujourd'hui l'unanimité dans la communauté des économistes, l'évaluateur se retrouvant à devoir choisir entre les méthodes, en fonction :

- des données disponibles,
- de ses objectifs,
- des types d'usages faits de l'écosystème qu'il étudie.

Parce qu'il s'agit de liens de causes à effets plus ou moins indirects, il reste extrêmement difficile de cerner toutes les conséquences des impacts sur les environnements liés à l'exploitation, sur nos modes de vie et de chiffrer leur valeur économique précisément, tant à court terme qu'à long terme.

Ce chapitre recense néanmoins pour chaque type de ressources, les impacts potentiels sur les écosystèmes et leurs services rendus.

5.1. Impacts environnementaux liés à l'exploration

L'exploration, destinée à localiser les gisements de nodules, les encroûtements cobaltifères et les amas sulfurés susceptibles d'être exploités, peut avoir des impacts négatifs sur les environnements considérés.

Les principales techniques d'exploration utilisées sont :

- 1. Les analyses minéralogiques, chimiques, météorologiques et courantologiques.** Les analyses minéralogiques et chimiques faites à bord des navires ou leur conditionnement pour des analyses à terre recourent à des méthodes physiques non polluantes (microscopes, spectromètres). Ces techniques ne présenteraient aucun impact.
- 2. Les prises d'échantillons (géologiques et biologiques).** Ces techniques d'échantillonnage concernent des échantillons relativement petits. Leur impact serait très limité. Cependant, l'utilisation de certaines techniques peut générer des déchets abandonnés sur le fond (lestes abandonnés sur place, ancres, autres outils, instruments perdus ou endommagés lors de la remontée...)
- 3. Les rigs de forage** (méthode la plus adaptée au forage de sites hydrothermaux). Lors d'une opération de forage sur le fond, le rejet de l'eau de mer utilisée comme fluide de forage peut amener la création d'un panache de boue limité, mais dispersable par les courants. Certains forages peuvent ouvrir de nouveaux chemins de migration et favoriser les mélanges en subsurface avec l'eau de mer environnante avec pour résultat la recolonisation de nouvelles sources tandis que l'extinction d'autres sources conduirait à l'extinction des populations locales associées à ces sources.
- 4. Les techniques photographiques et vidéo (lumière).** La photographie et la vidéo n'engendrent des perturbations que par les moyens d'éclairage mis en œuvre. Les organismes benthiques étant dépourvus de capteurs fonctionnels pour la vision, ils sont probablement insensibles à cet éclairage, mais aucune preuve scientifique ne le démontre de façon irréfutable.
- 5. Les méthodes acoustiques.** L'impact des méthodes acoustiques a été étudié, et ne semble pas avoir d'impacts majeurs sur la faune concernée. Certaines procédures de précaution et de mitigation des émissions ont cependant été préconisées et mises au point par certains organismes de recherche.

Ces techniques, destinées à réunir suffisamment d'informations pour élaborer les stratégies ultérieures d'extraction, les techniques et technologies associées ainsi que les méthodes connexes de traitement ne diffèrent pas fondamentalement de celles couramment employées pour la recherche scientifique marine. Elles sont considérées comme ayant des effets nocifs très limités sur l'environnement marin.

Cependant, la nécessité de connaître, d'affiner et de contrôler l'extension du gisement et sa teneur en minerai reste capitale afin de définir la stratégie future d'exploitation; la réalisation de nombreuses phases d'exploration sur une emprise spatiale plus importante pourrait alors présenter un impact significatif.

5.2. Impacts environnementaux liés à l'exploitation

Pour les nodules, ressources minérales profondes qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études, les méthodes d'exploitation sont encore loin d'être définitivement établies. Celles pour l'exploitation des sulfures et les encroûtements cobaltifères sont encore en cours de développement.

D'une manière générale, l'exploitation comporte trois stades :

- La récupération du minerai.
- Son transport d'abord jusqu'au bateau, en surface, puis vers un port de débarquement.
A noter que dans le cas des nodules, une partie du traitement peut éventuellement être réalisée sur les bateaux, consistant en une étape de fabrication d'une pulpe concentrée.
- Son traitement métallurgique dans une usine à terre.

La troisième étape, le traitement à terre, dépasse le domaine du rapport d'expertise. Elle n'est donc pas traitée dans cette étude.

5.2.1. Impacts spécifiques aux nodules polymétalliques

Plusieurs groupes d'industriels et de scientifiques ont réalisé des tests d'exploitation minière ou de perturbation des couches sédimentaires du plancher océanique. Ces tests, menés dans les années 70 à 90, portent exclusivement sur les nodules polymétalliques. Certains de ces tests ont été complétés par des expériences, dans le Pacifique et l'Océan Indien, avec pour but la prédiction des impacts environnementaux potentiels de l'exploitation minière en eaux profondes. Des travaux scientifiques supplémentaires menés en 2006 et 2011 complètent et réactualisent ces données sur les nodules.

Les résultats de ces différentes études ont montré que le système minier, opérant dans des conditions physiques, chimiques, biologiques et géologiques mal connues, influait significativement sur l'ampleur des impacts environnementaux.

Cela explique en partie les différences relevées dans la littérature entre estimations quantitatives et conclusions sur leur importance. Enfin, les différences d'échelles (temporelle et spatiale) et l'évolution de la technologie rendent délicate l'extrapolation d'un certain nombre des résultats obtenus par ces tests.

Les études menées sur les nodules ont permis d'identifier les impacts suivants :

Destruction partielle des habitats

Les nodules forment un substrat dur qui alterne avec les sédiments mous sur lesquels ils reposent sur plusieurs milliers de km². Ces habitats de substrats durs sont irrémédiablement détruits par l'activité d'extraction minière, compromettant le développement des espèces locales qui en dépendent (micro-organismes, coraux, gorgones...). S'il est admis qu'à ces profondeurs (généralement autour de 5 000 m, exception faite de la Mer de Barents), les conditions d'opération et de manœuvre des collecteurs ne permettent pas un ratissage systématique du champ de nodules ; il restera quelques nodules, mais cette quantité résiduelle, ne permettra pas une recolonisation et un maintien de ces populations d'espèces à leur niveau initial.

Le poids des collecteurs tassera les sédiments sur toute la distance parcourue lors du ramassage, détruisant à la fois l'habitat et les organismes sessiles sur leur passage. Leur passage laissera un mélange de sédiments déstructurés et d'agrégats de sédiments resédimentés après

leur mise en suspension par le passage des machines et le prélèvement des nodules, formant une couche très molle à forte teneur en eau. Les organismes benthiques rencontreront alors une forte variabilité de substrats, probablement plus grande qu'à l'origine.

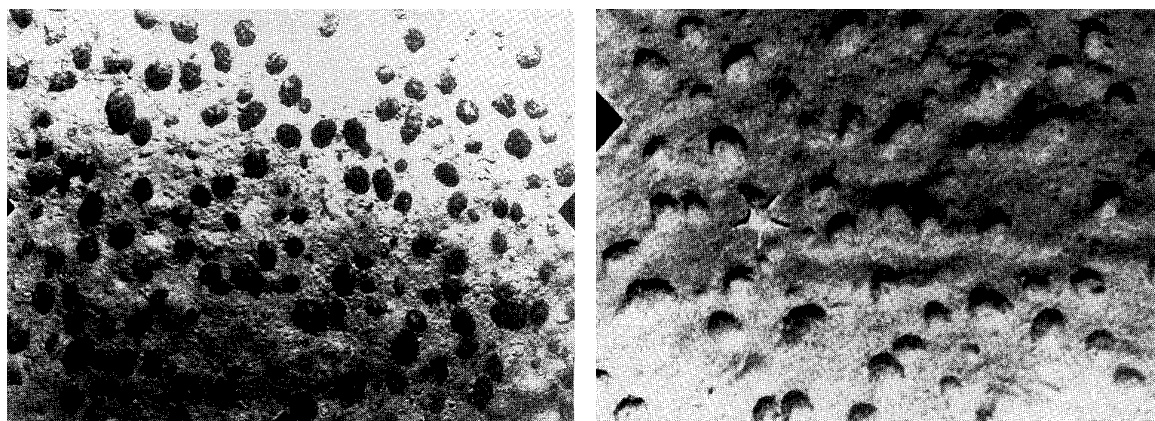
Si le système de collecte utilisé est un système à bennes, la collecte des nodules entraînera un prélèvement plus important de sédiments, abritant d'autres espèces, comme les étoiles de mer, des nématodes, des copépodes... Les systèmes à jet d'air ou d'eau et à drague vont eux aussi endommager le sédiment en pénétrant de plusieurs centimètres le sol et en le retournant. Or, les espèces abyssales enfouies, comme les polychètes, ne vivent que dans les 10 premiers centimètres de sédiments. La modification profonde de la qualité des sédiments aura un impact très important sur la recolonisation des espèces inféodées à cet habitat, et les temps de résilience sont difficilement prévisibles.

Pour les autres espèces qui ne sont pas particulièrement inféodées à l'un ou l'autre des substrats, comme les holothuries, l'importance des impacts dépendra de leur capacité à s'adapter aux changements de structure du plancher océanique.

Formation de nuages de particules fines et grossières

Le système de propulsion du collecteur, tout comme le ramassage, soulève des particules fines (moins de 10µm) ou plus grosses. Les particules en suspension, en fonction de la courantologie locale, sont capables de former un nuage de particules s'étendant sur de grandes distances. Ainsi, plus la proportion de particules fines sera importante, plus la vitesse de resédimentation sera réduite dans la zone d'extraction et plus l'impact environnemental sera important. Des mesures ont été faites au-dessus du site d'extraction, à 5, 7 ou 10 m de hauteur selon les expériences, et la présence de particules remises en suspension a été démontrée. Des mesures tout au long de la colonne d'eau seront nécessaires pour savoir jusqu'à quelle hauteur les particules peuvent remonter. L'une des expériences réalisées a étudié le déplacement spatial des particules : selon les courants et la typologie du terrain, les particules peuvent être déplacées de 2 à 20 km autour du site expérimental.

Figure 15 : Effets de la redéposition des sédiments sur la mégafaune lors de l'expérience JET (Fukushima, T., Y. Shirayama and E. Kuboki (2000)¹¹.
L'image de gauche est une photo d'une zone où il y a peu de resédimentation de particules.
La photo de droite est celle d'une zone où les particules sédimentaires se sont redéposées.



L'étendue de l'impact dépendra donc non seulement de la modification des habitats d'extraction et adjacents par la resédimentation des particules, mais aussi de la valeur nutritive du matériel remis en suspension et resédimenté sur une zone spatialement plus importante.

11. Fukushima, T., Y. Shirayama and E. Kuboki (2000). «The characteristics of deep-sea epifaunal megabenthos community two years after an artificial rapid deposition event.» Publications-Seto Marine Biological Laboratory 39(1): 17-28.

La collecte des nodules s'accompagne de la destruction directe et indirecte d'un certain nombre d'animaux et de micro-organismes au niveau du plancher océanique

Avec l'étape de broyage et de leur remontée, les micro-organismes vivant dans et sur les nodules vont périr à cause de la décompression rapide. Les animaux prélevés avec les nodules ne survivront probablement pas aux contraintes mécaniques et à l'action combinée de l'abrasion, de la décompression et de l'augmentation de la température dans le conduit de récupération.

Des organismes sessiles (échinodermes, crinoïdes, échinides, ophiurides, astérides, cnidaires fixés, spongiaires, mollusques fixés, brachiopodes et urochordés) seront tués ou blessés par le simple passage des engins miniers. Parmi les espèces de poissons vivant dans ces champs de nodules, certains restent immobiles pendant des heures. Il n'existe pas d'étude éthologique permettant de prévoir leur comportement à l'approche des engins miniers. Vont-ils fuir, rester immobiles ou s'enfouir dans le sédiment ?

Les organismes ayant survécu seront indéniablement confrontés à une perturbation structurelle de leur milieu de vie. Le plancton ou les autres particules dont les suspensivores et les filtreurs se nourrissent risquent d'être entraînés par les courants avec le panache de particules, bouleversant profondément les communautés et la stabilité du réseau trophique.

Toutes les expériences menées sur les nodules concluent ainsi à une diminution immédiate et significative de la biodiversité dans le sillon de dragage.

Modification des propriétés géochimiques du sédiment et de l'eau de fond

Le retournement des sédiments sur plusieurs centimètres entraîne un mélange des couches oxiques et suboxiques. Cela provoquera une modification des gradients d'oxygène et de pH (acidification, les eaux interstitielles étant moins alcalines que l'eau de mer) qui, selon certains auteurs, favoriseront un enrichissement des eaux interstitielles en métaux lourds : plomb, tellure, cadmium, arsenic. Le mélange de ces différentes couches (ou « horizons » chimiques) induira une modification de la répartition de la proportion d'éléments métalliques et entraînera une perturbation des cycles biogéochimiques dans le sédiment dont la dynamique de retour à un état stationnaire reste aujourd'hui encore indéterminée.

Augmentation de la concentration de composés toxiques dans le milieu ; modifications des conditions physico-chimiques des masses d'eau environnantes

Dans les nodules (suivant leur composition, et dans des proportions variables) se trouvent du plomb, de l'arsenic, du cadmium, du cuivre, de l'argent... Le broyage qui précède la remontée du minerai va engendrer une production de fines particules métalliques toxiques. Les eaux profondes appauvries en oxygène pourraient favoriser le relargage de métaux lourds associés aux oxydes de fer et de manganèse constituant la matrice principale des nodules en limitant leur oxydation et leur libération dans l'eau.

Les expériences de suivi menées dans le Pacifique, le bassin du Pérou et l'océan Indien ont abouti à des observations semblables :

- Les traces laissées par les différents dispositifs expérimentaux sont recolonisées en quelques années. Cependant, les espèces ne sont pas toutes égales dans leur capacité à réinvestir le milieu et de nouvelles communautés s'établissent : généralement composées

des mêmes espèces, pour celles qui ont été observées, mais les dominances au niveau des familles et la composition des groupes ont changé.

- Les espèces qui bénéficient dans un premier temps des modifications environnementales sont des espèces très spécifiques qui sont présentes normalement en faible abondance dans la communauté d'origine.
- Le milieu redevient favorable à la plupart des espèces lorsque la couche la plus superficielle du plancher océanique est reconstituée et que les sillons sont comblés par accumulation de matériel transporté latéralement des zones voisines.

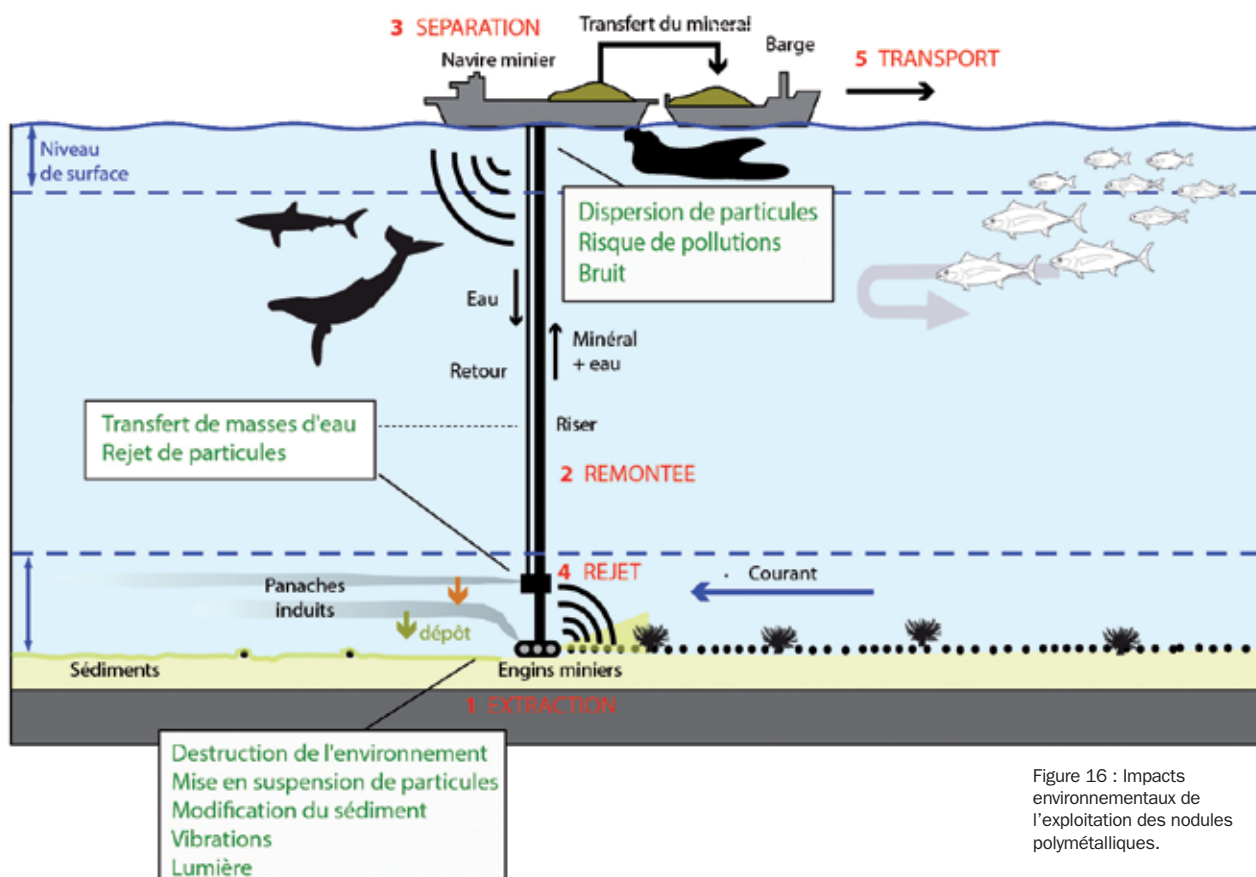


Figure 16 : Impacts environnementaux de l'exploitation des nœuds polymétalliques.

Les traces ou sillons laissés par les dispositifs semblent être très longs à combler. Vingt-six ans après les expériences dans le bassin du Pérou (plus long recul disponible jusqu'à présent), les sillons sont toujours visibles.

Les impacts sur la composition géochimique du sédiment semblent également très longs à disparaître. Les nœuds mettant des millions d'années à se former, leur extraction et la destruction complète de leur épifaune entraînent des changements radicaux et à très long terme dans l'écosystème benthique local.

5.2.2. Impacts spécifiques aux encroûtements cobaltifères

Dans le cas des encroûtements cobaltifères, la méconnaissance de la diversité des technologies utilisables et de la biodiversité de ces environnements rend la prévision d'impacts plus délicate mais pas impossible. Les modèles de collecteurs actuellement envisagés (voir le chapitre 3) ont beaucoup de points communs avec ceux développés pour les autres ressources.

Les impacts potentiels dans le cadre d'une exploitation des encroûtements cobaltifères sont les suivants :

La destruction de l'habitat

Les encroûtements cobaltifères, couches dont l'épaisseur varie de 1 à 26 cm, servent de substrats durs (comme les nodules) à des communautés microbiennes complexes et à de nombreux organismes sessiles tels que les coraux, gorgones ou éponges. Les espèces arborescentes servent elles-mêmes d'habitat à d'autres nombreuses espèces. La récupération de ce substrat dur modifiera profondément l'habitat et aura un impact indéniable sur les communautés initialement présentes.

Formation de nuages de particules fines et grossières

Comme pour les nodules, le procédé de broyage est envisagé pour les encroûtements, au niveau de l'engin de récupération du minerai, opération créant une quantité potentiellement importante de particules riches en éléments métalliques.

Les monts sous-marins sur les flancs desquels se développent des communautés denses, avec une productivité primaire très importante, se situent à des profondeurs extrêmement variées. Ces encroûtements peuvent être recouverts par endroits d'une couche sédimentaire plus ou moins importante. La quantité et la nature des particules remise en suspension seront donc fortement dépendantes :

- des caractéristiques locales du site d'exploitation,
- de leur dispersion par les courants locaux.

L'emprise spatiale de l'impact apparaît fortement dépendante de la technologie de broyage, mais aussi de la quantité présente initialement dans les sédiments, ainsi que des contraintes physiques, géologiques et courantologiques.

Destruction directe et indirecte d'un certain nombre d'animaux et de micro-organismes au niveau du plancher océanique

Lors des opérations de collecte et de broyage, certaines communautés d'organismes seront détruites par le passage des collecteurs et par les dispositifs de collecte et de broyage. Les particules en suspension poseront aussi aux organismes survivants les mêmes problèmes d'ensevelissement, de difficulté à se nourrir et de changement dans l'hétérogénéité du substrat que pour les nodules.

La principale différence tient au fait que les encroûtements se trouvent à des profondeurs et dans des environnements très variés : de 400 à 4 000 m de profondeur et sur des monts sous-marins isolés, des volcans, sur le bord externe de plateaux sous-marins, au niveau des élévations sous-marines intra-plaques, ou encore dans les formations coralliennes d'anciens atolls immergés. Les récifs coralliens et les monts sous-marins sont connus pour être en règle générale des points chauds de biodiversité. L'ampleur de la perte en termes de biodiversité sera fortement dépendante de chaque site, et ne peut être extrapolée d'un site à l'autre, même si les causes sont sensiblement bien identifiées.

Augmentation de la concentration de composés toxiques dans le milieu

Si, comme pour les nodules, l'opération de broyage risque d'entraîner la formation de particules fines riches en métaux et susceptibles d'être redisséminées dans le milieu, les capacités technologiques de récupération des métaux des encroûtements, par lixiviation *in situ* constitue un risque

supplémentaire. Ce procédé faisant intervenir classiquement des acides forts, très réactifs, crée un risque majeur de modification des conditions physicochimiques des eaux sur des échelles importantes et de pollution par les métaux ainsi mis en solution.

Introduction dans le milieu d'espèces étrangères potentiellement invasives

Des méthodes de biolixiviation seraient également en cours de développement et pourraient avoir des conséquences importantes avec pour risque majeur l'introduction d'espèces microbiennes non-indigènes transformant l'équilibre existant au sein de la communauté microbienne locale. Les connaissances scientifiques actuelles tant sur les procédés envisagés que sur les communautés endogènes restent insuffisantes pour permettre d'appréhender et prévoir finement les impacts potentiels.

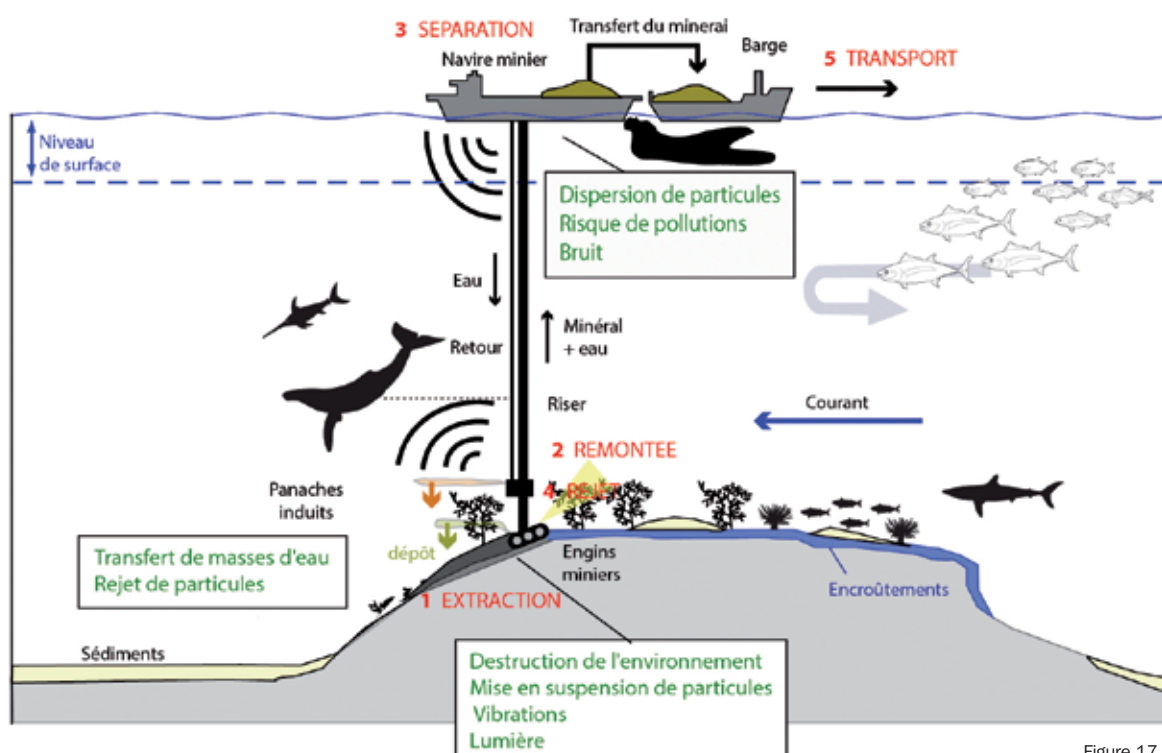


Figure 17 : Impacts environnementaux de l'exploitation des encroûtements.

Par analogie entre les impacts de l'étape d'extraction du minerai et ceux de la pêche profonde sur ces écosystèmes, il apparaît indéniable que ces techniques d'exploitation auront un impact significatif sur les espèces dominantes de ces écosystèmes que sont les éponges ou les coraux. Les coraux profonds ont des taux de croissance extrêmement lents et une longévité de quelques dizaines à centaines d'années. La reformation des récifs profonds endommagés est estimée à quelques centaines voire quelques milliers d'années.

Concernant les autres espèces, les études sur les impacts de la pêche profonde ont recensé une forte réduction de la productivité primaire, d'importantes difficultés de régénération des écosystèmes et une forte réduction de la biodiversité. La capacité de résilience de l'écosystème est dépendante de la spécificité des espèces les plus touchées et de leur substitution possible par d'autres espèces assurant des fonctions similaires. **La capacité de résilience de ces écosystèmes apparaît extrêmement faible**, et les espèces endémiques, spécifiques aux encroûtements seront menacées de disparition. Un écosystème différent se reformera, assurant très vraisemblablement des fonctions différentes.

5.2.3. Impacts spécifiques aux sulfures hydrothermaux

Les systèmes miniers utilisés pour les sulfures présentent de nombreux points communs avec ceux utilisés pour les nodules. Certains des impacts précédemment décrits pour les nodules sont identiques à ceux liés à l'exploitation des sulfures hydrothermaux.

Les impacts prévisibles dans le cadre d'une exploitation des sulfures hydrothermaux concernent :

La destruction de l'habitat

Comme les nodules et les encroûtements, les amas sulfurés hydrothermaux forment un substrat dur, colonisé par des espèces plus ou moins endémiques. Ils se présentent sous forme de dépôts d'épaisseur et de surface variables (plusieurs mètres d'épaisseur et quelques hectares en surface) surmontés de cheminées de sulfures et de sulfates ou de monts de plusieurs dizaines à centaines de mètres de haut et de quelques centaines de m² à quelques km² de diamètre. Les zones minéralisées peuvent en outre être recouvertes d'une couverture sédimentaire plus ou moins conséquente comme à Solwara 12 dans la mer de Bismarck ou dans le bassin de Guaymas. Ils offrent ainsi une grande hétérogénéité d'habitats.

Une couverture sédimentaire des dépôts de sulfures n'est pas exclue dans des régions où la production phytoplanctonique de surface est forte comme dans certaines mers semi-fermées (par exemple le bassin de Guaymas) mais les amas de sulfures ciblés par les activités minières sont plutôt ceux qui affleurent sur le plancher océanique. Ainsi, les animaux survivant à l'extraction du minerai auront pour se déployer un autre substrat dur, mais présentant des caractéristiques physico-chimiques très différentes. Certaines espèces hautement adaptées aux conditions toxiques représentées par un substrat riche en métaux, pourraient ne pas arriver à s'adapter et s'éteindre ou devoir se déplacer.

Formation de nuages de particules fines et grossières

Les avis apparaissent partagés, et l'absence d'expérimentations réelles sur les impacts potentiels ne permet de formuler que des hypothèses. La faible couverture sédimentaire sur le jeune plancher océanique où se produisent les circulations hydrothermales plaide en faveur d'une **remise en suspension moindre des particules sédimentaires** que dans le cas des nodules. Certains exploitants envisagent l'**utilisation de tailleurs pour terrasser le terrain, fragmenter la roche** et faciliter le travail du collecteur. Une telle méthode de travail devrait produire une **grande quantité de particules provenant de la fragmentation de la roche**. Les détails sur le fonctionnement de ces machines manquent pour donner, ne serait-ce qu'une idée de la proportion de particules en suspension produites par l'extraction du minerai.

Comme pour les nodules, les particules vont ensuite se déplacer sur des distances et à des hauteurs de la colonne d'eau variable, en fonction de leur forme, de leur taille, des courants océaniques et du terrain. L'impact secondaire concernerait la biodiversité et les écosystèmes de sites actifs à proximité susceptibles d'être impactés à leur tour, par la redéposition des particules.

Destruction directe et indirecte d'un certain nombre d'animaux et de micro-organismes au niveau du plancher océanique

Très peu de sites sont connus, et l'inventaire des espèces les peuplant reste à réaliser. Quelques données mentionnent la présence de tapis microbiens recouvrant en grande partie les cheminées éteintes. La macrofaune apparaît extrêmement variable selon les sites. Il est donc difficile d'être

précis sur les espèces impactées. Cependant, celles-ci se répartissent aussi bien en espèces sessiles que mobiles. Les organismes sessiles et les communautés microbiennes installées à la surface des minéralisations métalliques vont donc être détruits par les opérations de terrassement, de fragmentation et de collecte.

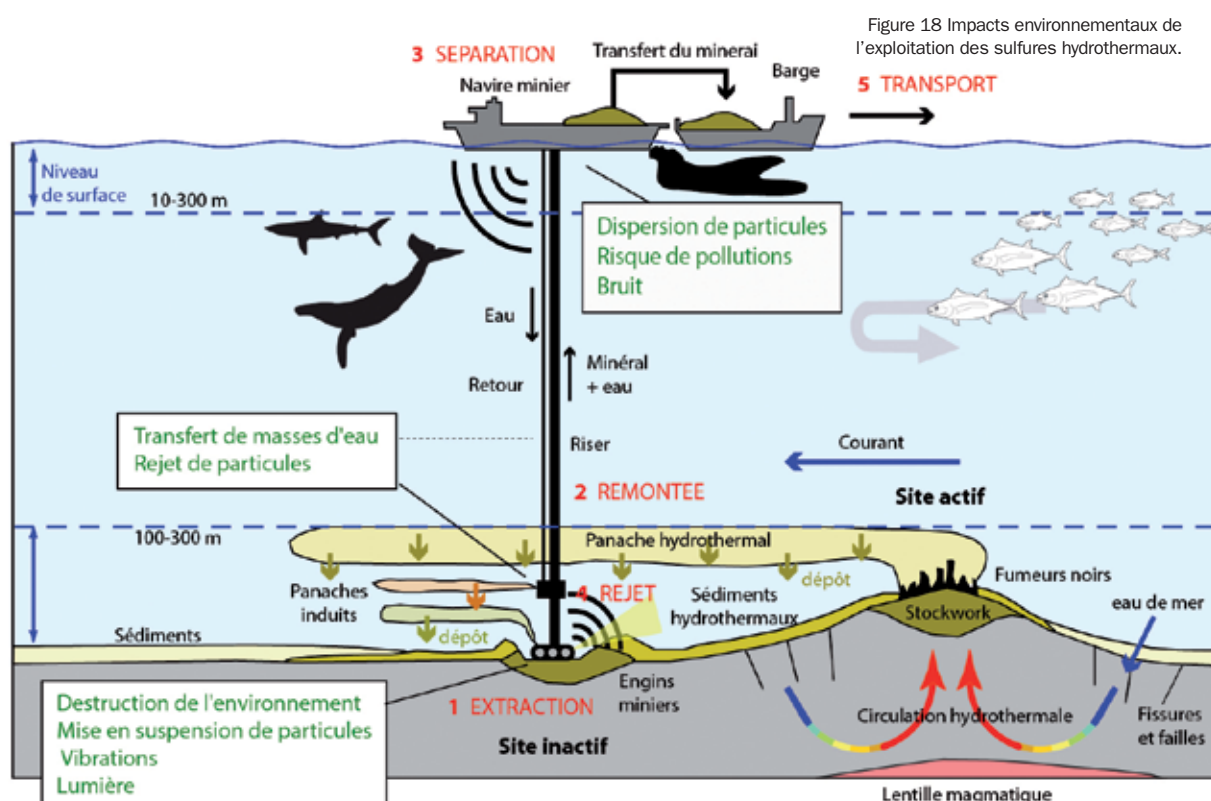
Les poids des différents engins miniers est du même ordre que celui des collecteurs de nodules, avec donc les mêmes conséquences pour les animaux sur leur passage : blessés ou tués.

Les espèces mobiles devront faire face à une réduction importante de leur territoire. Des études approfondies sur le degré d'endémisme de la faune des sites inactifs ciblés par l'exploitation sont nécessaires afin d'évaluer le degré de perte de la biodiversité : disparition totale de l'espèce ou seulement de quelques populations ?

Enfin, les sulfures exploités peuvent être proches de zones hydrothermales actives (par exemple, les sites de Solwara 1 et South Su sont situées à 1 km d'un volcan actif). De fait, certaines communautés hydrothermales endémiques des sources actives pourraient être affectées par une augmentation des concentrations de particules en suspension liée à l'exploitation des zones inactives proches.

Augmentation de la concentration de composés toxiques dans le milieu

Les sulfures sont riches en métaux de base (cuivre, zinc, plomb), métaux précieux (argent et or) mais également parfois en métaux rares (indium, sélénium, germanium...) et en métaux lourds (mercure, cadmium...). La fragmentation de la roche engendrera des panaches de particules particulièrement toxiques. La remise en suspension de sédiments hydrothermaux par nature plus riches en métaux lourds que les sédiments des plaines à nodules constitue aussi un risque de dissémination plus importante de métaux lourds sur des sites adjacents à la zone d'exploitation.



La présence d'oxygène et la dispersion des métaux sous forme de particules fines favoriseront leur oxydation et leur libération. Il sera très important d'établir la distribution et la réactivité des particules émises par l'activité minière, compte-tenu des conditions naturelles. Si des molécules organiques capables de complexer les métaux peuvent ralentir l'oxydation, elles peuvent aussi les stabiliser en suspension sous des formes colloïdales et favoriser leur transport avec les masses d'eaux, étendant grandement la zone impactée.

La dissolution des sulfures et leur oxydation peut également conduire à la consommation de l'oxygène de l'eau et une diminution du pH local, entraînant des modifications importantes de la physicochimie de l'environnement.

La résilience de la faune des sites actifs, instables, est très étudiée, contrairement à celle des communautés de zones inactives qui sont particulièrement stables dans le temps. Par ailleurs, le rôle écologique d'espèces à croissance lente comme les coraux d'eau froide y est aussi plus marqué. **La résilience des communautés de zones inactives ne peut pas être prédite au regard de ce qui est connu pour les zones actives. On dispose de très peu d'éléments permettant de prévoir la réponse des communautés à recoloniser la zone après la destruction de l'habitat.**

5.2.4. Impacts spécifiques à l'hydrogène

A l'heure actuelle, nous ne disposons d'aucune information sur les technologies envisagées pour une exploitation potentielle de l'hydrogène hydrothermal. La faune des sites hydrothermaux présentant de fortes émissions d'hydrogène est également très peu documentée. Il est dans ce cadre impossible d'identifier des impacts pour l'exploitation de cette ressource.

5.2.5. Impacts d'exploitation communs aux nodules, encroûtements et sulfures

Dans les trois cas, les principaux risques pour la biodiversité des zones d'exploitation et à proximité sont donc :

De voir disparaître entièrement des espèces ou d'en mettre en danger d'extinction par destruction directe des individus, destruction ou réduction de l'habitat de l'espèce, réduction de leur source de nourriture ou de leur capacité à se nourrir ou encore exposition à des paramètres physicochimiques et écotoxicologiques très différents. Nous n'avons pas trouvé d'information sur la tolérance de la faune des champs de nodules ou des encroûtements aux métaux lourds. Concernant la faune hydrothermale, de nombreuses études traitent des mécanismes d'adaptation d'espèces-clés des zones hydrothermales actives aux métaux lourds, mais très rares sont les données sur leurs seuils de tolérances ou sur les mécanismes d'accumulation des métaux dans l'organisme qui pourraient avoir comme impact secondaire une augmentation et une amplification des métaux lourds dans les différents maillons du réseau trophique. L'intégration de métaux lourds dans ces organismes profonds représente aussi un risque potentiel de rendre impropres à la consommation des espèces commercialisables, en fonction des connectivités locales entre écosystèmes.

Dans les trois cas, également, se posent de nombreuses questions sur les impacts possibles liés aux étapes de l'exploitation autres que l'extraction sur le plancher océanique du minerai :

**Impacts dus au rejet des « déchets miniers » :
eau de fond, sédiment, débris de minerai**

Le rejet des déchets miniers, avec l'extraction du minerai, est l'étape susceptible de causer le plus grand nombre d'impacts potentiels et les impacts les plus étendus. Le nombre, la nature et l'étendue de ces impacts vont dépendre des volumes de chaque type de déchet rejeté, de la hauteur de la colonne d'eau à laquelle ils vont être rejetés, de la composition et des paramètres physico-chimiques des déchets mais aussi de l'eau là où ils sont rejetés, du fonctionnement des écosystèmes et des particularités des espèces existants là où a lieu le déversement des déchets. Certains auteurs évaluent à 25 000 m³/jour la quantité d'eau et entre 20 à 400 t/jour la quantité de sédiments emmenés à bord avec les nodules et devant être rejetés, quand d'autres avancent les chiffres de 40 000 m³/jour pour la quantité d'eau et 1 000 t/jour pour la quantité de sédiments, dans le cadre d'une exploitation d'une production annuelle de 3 millions de tonnes de nodules.

Dans la zone photique (de la surface à 200 m de profondeur), la production primaire se fait par photosynthèse. C'est aussi la zone de la colonne d'eau la plus peuplée. Interface entre les deux grands compartiments marin et aérien, elle est particulièrement riche en interactions écosystémiques et échanges biogéochimiques complexes. Un rejet de volume de déchets conséquent entraîne potentiellement de très nombreux changements, qui vont être difficiles à saisir dans toute leur ampleur et leur complexité, sans tenir compte des effets synergiques avec d'autres phénomènes naturels ou impacts d'autres activités anthropiques. Les impacts d'un rejet de déchets dans cette zone seraient :

- Une diminution de la production primaire en affectant négativement la photosynthèse, les particules sédimentaires et métalliques entraînant une baisse de la transmission de la lumière dans l'eau. La chute de la production primaire aurait alors un impact important sur tous les compartiments supérieurs du réseau trophiques en abaissant la productivité du système.
- A l'inverse, le relargage de sédiments contenant de la matière organique, et plus riche en nutriments, par rapport aux eaux de surface, pourrait, au contraire, stimuler provisoirement la photosynthèse. Une stimulation importante de la photosynthèse aurait pour résultat une forte consommation d'oxygène entraînant vraisemblablement l'apparition de zones de minimum d'oxygène impactant de manière importante l'écosystème des zones anciennement oxygénées. On se retrouverait dans une situation de fertilisation locale artificielle. L'augmentation de la production primaire risque aussi de favoriser le développement de certaines espèces dont le développement était limité, entraînant un bouleversement de l'écosystème. L'apparition de « blooms » d'algues produisant des toxines pourrait résulter de cette modification profonde de l'écosystème. Certaines études menées sur la fertilisation des eaux de surface par apport de fer (rarement de phosphates ou d'urée), étudiée en tant que méthode de géo-ingénierie pour favoriser l'absorption par les océans du dioxyde de carbone de l'atmosphère, montrent que les conséquences de ce phénomène sont très mal connues et risquent de varier très fortement en fonction de la durée de cette pollution, des caractéristiques initiales des eaux et du biome de surface.
- Une dissémination importante des métaux lourds contenus dans les sédiments abyssaux ou hydrothermaux et les débris de minerai sont susceptibles d'entrer dans la chaîne alimentaire et d'être ensuite bio-amplifiés¹², avec pour conséquence un impact très négatif sur l'environnement, l'alimentation et la santé humaine éventuellement.

12. Bio-amplifier : Augmentation à chaque niveau trophique [de la chaîne alimentaire] des concentrations des substances chimiques concentrées dans des tissus (par exemple, les concentrations relatives à la substance sont plus élevées dans les organismes que dans leur source d'alimentation). www.greenfacts.org/fr/glossaire/abc/bioamplification.htm

- Les migrations verticales du zooplancton et du necton seront également perturbées par le déchargement des déchets. Or ces migrations participent grandement au mélange des couches d'eau et donc à la régulation de leur composition et de leur température.
- L'eau de fond a des propriétés physico-chimiques, notamment de température et de pH, très différentes de celles des eaux de la zone photique. Un relargage de quantités importantes d'eaux de fond modifiera très certainement la spéciation des métaux (en augmentant potentiellement leur transfert au sein de la chaîne trophique) et des conditions de pH et de température difficiles à supporter pour certaines espèces, les larves et les micro-organismes étant particulièrement sensibles à la température.

A l'heure actuelle, il est très difficile de quantifier et de prévoir précisément l'ampleur et l'étendue des impacts. Les courants océaniques et les phénomènes atmosphériques sont également susceptibles d'influer sur ces divers impacts, notamment sur leur étendue et le niveau de modification des paramètres physico-chimiques, en déplaçant les particules et les masses d'eau rejetées rapidement et sur de grandes distances. Trop peu d'informations sont disponibles pour pouvoir établir des scénarii, ne serait-ce que locaux. Les paramètres à prendre en compte sont trop nombreux pour établir un seul scénario généralisable à tous les cas d'exploitation minière sous-marine.

Le maintien des caractéristiques initiales de la zone photique revêt une importance économique considérable, notamment en ce qui concerne l'activité de la pêche (une des plus importantes sources de revenus pour bon nombre des territoires possédant des ressources dans leurs ZEEs ou dépendant de pêcheries dans la zone internationale). Pour ces diverses raisons, le rejet des déchets dans la zone photique est fortement déconseillé depuis plus de dix ans par la communauté scientifique.

Dans la zone intermédiaire de la colonne d'eau (de 200 m à 1 000 - 1 500 m), les impacts possibles sont *a priori* moins nombreux mais les écosystèmes sont également moins bien connus :

- Certaines régions océaniques, entre 200 et 1 200 m de profondeur, sont particulièrement pauvres en oxygène, ce qui limiterait le relargage de métaux lourds en minimisant la formation d'oxydes solubles, et donc leur intégration dans la chaîne alimentaire.
- Par contre, dans tous les océans, diverses espèces de poissons (thonidés, etc....) et de céphalopodes (encornet géant *Dosidicus gigas*, par exemple) évoluent dans la zone mésopélagique. Ces animaux (dont beaucoup ont une forte valeur économique) seront sensibles aux nuages de particules sédimentaires. Ceux qui se nourrissent de zooplancton par exemple, risquent de voir leurs ressources alimentaires diluées. Ils pourront être gênés par les changements brusques des conditions chimiques de leur environnement et pourraient être affectés par l'exposition soudaine à des taux de métaux lourds inhabituels.

Une constatation s'impose : les impacts de rejets des déchets sous la zone photique sont peu documentés dans la littérature scientifique et nécessitent un effort d'acquisition de connaissances.

Dans la zone benthique (juste au-dessus ou à la profondeur et sur, ou à proximité du site d'extraction), une amplification ou une synergie avec des impacts liés à l'extraction peut exister :

- Le rejet de grands volumes de déchets terminerait d'ensevelir les organismes survivants sessiles ou peu mobiles et réduirait encore les réserves potentielles de nourriture pour les espèces mobiles.
- Il existe également une probabilité non nulle pour que les poissons méso- et bathypélagiques soient impactés en raison des effets sur leurs proies potentielles, et que les mammifères marins le soient également, en particulier au niveau des dorsales océaniques et des monts sous-marins (exploitation des sulfures hydrothermaux et des encroûtements).

En effet, un certain nombre de cétacés sont capables de descendre à plus de 2 000 m de profondeur pour y chasser leurs proies.

- Les eaux de fond, normalement à 1-4° C, pourraient voir leur température s'élever jusqu'à 7-10° C pendant la remontée du minerai. Une fois renvoyées au fond de l'océan, quelle pourrait être la modification de température pour les espèces profondes ? Les coraux, par exemple, sont en effet particulièrement sensibles aux variations de température. S'ils peuvent généralement s'adapter avec le temps, l'expérience montre qu'ils supportent mal les « brusques » changements de température.
- Le risque que le réseau trophique soit contaminé par les métaux lourds s'accroît également. Il pourrait être encore plus conséquent dans le cas des sulfures polymétalliques et des boues métallifères, dont l'environnement est déjà naturellement riche en métaux lourds.
- Une disponibilité plus importante de nutriments organiques (animaux morts) et inorganiques (l'état particulier facilitant la dissolution et donc la disponibilité des nutriments) pourrait provoquer une augmentation de la productivité. Les cycles de l'oxygène et du carbone pourraient être alors également modifiés.

Là encore, la méconnaissance de ces environnements ne permet que de formuler des hypothèses. Il est indispensable d'accroître nos connaissances sur ces écosystèmes, afin de mieux appréhender les impacts les plus significatifs.

D'autres rejets secondaires sont susceptibles d'entraîner des perturbations sur les différents compartiments évoqués précédemment :

- Le rejet à la mer de la saumure issue de la production d'eau potable sur les bateaux-support par des stations de dessalement par osmose inverse et des prétraitements requis pour les stations de dessalement (chlorination, bromination, déchlorination, coagulation, filtration) apporteront des perturbations supplémentaires de la colonne d'eau. Des expériences sont nécessaires pour établir les niveaux de modifications des paramètres physico-chimiques et préciser ces impacts.
- Les procédés de traitement « offshore » du minerai, produisent de l'eau polluée, des résidus, etc., posant les mêmes questions d'impact environnemental en surface que pour les mines terrestres. Une extraction sur site du métal à partir des nodules, comprenant un certain nombre de procédés d'hydrométallurgie et de pyrométallurgie, au cours desquels sont utilisés des produits chimiques pourrait être source d'une pollution supplémentaire du milieu. De tels procédés ne semblent pas, *a priori*, être envisagés pour l'exploitation des sulfures.
- Une autre interrogation demeure et concerne les effets des câbles, des systèmes de forage et des systèmes de remontée du minerai extrait sur la circulation des espèces tout le long de la colonne d'eau. Aucune étude quantitative ne semble avoir été consacrée à ce problème, mais l'étude d'impacts locaux de ces effets et des nuisances engendrées par l'activité de surface présente un intérêt certain.
- Demeure enfin le point, non testé, relatif au fait que l'utilisation d'engins et du matériel connexe sont susceptibles d'introduire sur les zones d'exploitation des espèces non indigènes, ou de déplacer vers la côte des espèces indigènes des milieux profonds.

Impacts sur le cycle du carbone

Les impacts sur le cycle du carbone sont très difficiles à évaluer car ils sont fortement dépendants des paramètres environnementaux. Il est tout à fait possible d'observer une réduction ou au contraire une augmentation de la quantité de carbone organique stockée dans les sédiments selon la zone géographique considérée.

Une augmentation considérable du « turn-over » du carbone des sédiments risque d'augmenter la demande en oxygène et/ou en autres oxydants dans la colonne d'eau. Les flux d'enfouissement du carbone organique et les taux d'accumulation seraient plus grands après la perturbation du sédiment. Cet enfouissement du carbone organique pendant les périodes où l'eau de fond est faiblement oxygénée, augmenterait le taux de régénération du phosphore et pourrait entraîner un effet positif sur la productivité marine dans le cas d'un transport concomitant du phosphore vers la surface.

Impact possible de la pollution électromagnétique

L'alimentation électrique par câbles des engins miniers et des pompes de fortes puissances à différents endroits du « riser » pour assurer la remontée du minerai, génère des champs magnétiques basse-fréquence. Le couplage de ces champs magnétiques aux mouvements de l'eau et des organismes est aussi susceptible de générer des champs électriques localisés dans l'environnement. L'action combinée de ces champs magnétiques et électriques pourrait constituer des zones d'attraction ou d'évitement pour certaines espèces. Si l'état des connaissances est insuffisant pour proposer une estimation de l'intensité et de l'extension de cette pollution ainsi que ses conséquences sur le comportement des animaux sur toute la colonne d'eau, ce risque de pollution particulier doit cependant être envisagé. Les premiers résultats des travaux toujours en cours réalisés en ce sens dans le cadre des recherches sur les impacts de l'implantation des énergies renouvelables marines pourraient fournir un premier cadre de réflexion.

Impacts des vibrations

Les pompes, les propulseurs, le déplacement des engins miniers, la fragmentation de la roche au fond de l'eau, les générateurs d'électricité, les hélices et les systèmes de positionnement dynamique des propulseurs des bateaux en surface créent des vibrations qui vont avoir des effets sur la faune (poissons, crustacés, céphalopodes...) des sites d'exploitation. Cette pollution par les vibrations peut perturber grandement le fonctionnement de l'écosystème : fuite, abandon du territoire, ou au contraire agrégation des animaux. Il en résultera une modification importante de la biodiversité, par perturbation des techniques de chasse ou d'identification de prédateurs par exemple. Plus particulièrement pour les grands cétacés et les requins, des perturbations des modes de communication, de chasse, de parade nuptiale et de reproduction, des phénomènes de stress, d'isolement d'individus, et potentiellement des blessures physiques par accidents de décompression doivent être envisagés.

Impacts de l'accroissement du trafic maritime

Les risques de collision augmentent entre navires et grands cétacés, notamment sur les trajectoires de migration. Or un certain nombre des régions possédant des ressources minérales (îles Canaries, Nouvelle-Calédonie, dorsale médio-atlantique...) sont des zones très fréquentées par les cétacés.

Accidents possibles

Le développement d'une activité d'exploitation peut aussi être source d'accidents liés aux procédés industriels mis en œuvre : fuites accidentelles de produits toxiques utilisés dans les traitements,

déversements de carburant pendant les transferts du site aux bateaux de soutien, déversements de minerai pendant les transferts aux barges et aux vraquiers/minéraliers, dysfonctionnements d'équipement non prévus pouvant aboutir à des pertes de matériel dans le « riser » de remontée et dans le système de pompage, oxydation du métal entrant dans la construction des différents véhicules sous-marins, et du système de pompage..., collisions, échouage, avaries aboutissant à des naufrages. Il n'y pas eu d'expérimentation menée en rapport avec ces impacts accidentels dans un cadre spécifique aux nodules, encroûtements ou sulfures. Cependant, tous les ateliers de travail réunis pour réfléchir à la question des impacts environnementaux s'accordent pour prendre en compte les risques accidentels.

L'existence d'un effet cumulatif (synergie des influences) des différents impacts n'a pas encore fait l'objet de recherche officielle. Elle reste présentée comme une hypothèse, fortement étayée par les connaissances déjà acquises sur les milieux et écosystèmes profonds et moins profonds et par des parallèles faisables avec d'autres activités anthropiques. Les publications ne sont cependant pas formelles sur cet effet global et la question reste donc ouverte.

Un suivi des impacts plus poussé et spécifique de la zone de test et des techniques/technologies mises en œuvre apparaît donc nécessaire. L'ensemble des impacts décrits précédemment et les capacités de résilience des écosystèmes est résumé dans le tableau récapitulatif suivant.

Tableau 3 : Synthèse des impacts environnementaux et résilience des écosystèmes au cours des opérations de collecte du minéral.

Activité	Type d'impacts	Type d'impacts	Ressource exploitée	Région impactée	Durée de l'impact	Echelle spatiale	Résilience	Importance
Collecte	Impacts physiques directs	Destruction des habitats	nodules, encroûtement, sulfures	fond marin	court-moyen terme	locale	lente	forte
		Mortalité des espèces sessiles sur le trajet des collecteurs et autres engins sous-marins	nodules, sulfures	fond marin	court terme	locale	rapide	forte
		Mortalité des animaux prélevés avec le minéral	nodules, encroûtement, sulfures	fond marin	court terme	locale	dépend des espèces : rapide (mégafaune) à très lente (micro-organismes)	forte
		Modification des propriétés géochimiques du sol et de l'eau de fond (mélanges des couches oxydées et suboxydées → modifications du pH, de la concentration en O2 et des concentrations en métaux lourds)	nodules	fond marin	très long-terme	locale	indéterminée	forte
	Formation de nuages de particules par le système de propulsion du collecteur	Recouvrement partiel ou total de la faune dans les sillons	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme	dépend de la courantologie et des caractéristiques des particules (taille, granulométrie)	indéterminée	indéterminée
		Colmatage des organes filtrants des suspensivores	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme			indéterminée
		Dilution des ressources alimentaires des détritivores	nodules, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme			indéterminée
	Formation de nuages de particules par les systèmes de décollement à jet d'air ou d'eau	Formation de nuages de particules par concassage des nodules	nodules	fond marin, colonne d'eau	court-terme			indéterminée
			nodules	fond marin, colonne d'eau	court-terme			indéterminée
	Augmentation de la concentration d'ions métalliques toxique dans le milieu		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin	indéterminée	locale	indéterminée	indéterminée
	impact sur le cycle du carbone		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin	indéterminée	locale	indéterminée	indéterminée
	Pollution électromagnétique		nodules, encroûtements, sulfures	colonne d'eau	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Vibrations		nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme	indéterminée	indéterminée	indéterminée

Activité	Type d'impacts	Ressource exploitée	Région impactée	Durée de l'impact	Echelle spatiale	Résilience	Importance
Déversement des déchets (débris de minéral, eau, sédiments)	Augmentation du flux de particules	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court terme	indéterminée	indéterminée	forte
	Relargage d'éléments métalliques	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	indéterminée	locale-régionale	indéterminée	indéterminée
	Absorption des métaux	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, eaux de fond	indéterminée	locale-régionale	indéterminée	indéterminée
	Apport en matière organique dissoute	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Changements biochimiques	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	indéterminée	locale?	indéterminée	indéterminée
	Modification de la température	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Augmentation de la turbidité	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Réduction de la lumière	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Perturbation de la migration verticale et horizontale du zooplancton et du necton	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Perturbation du transport vertical et horizontal de la matière	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Modification de la production primaire par apport de nutriments mais réduction de la photosynthèse	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée

Tableau 3 : suite

Type d'impacts		Ressource exploitée	Région impactée	Durée de l'impact	Echelle spatiale	Résilience	Importance
	Modification de l'activité bactérienne	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Modification de la consommation d'oxygène	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Impact sur la dominance des diatomées, susceptible d'entraîner une augmentation du taux d'absorption du dioxyde de carbone.	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	court-terme	locale	indéterminée	indéterminée
	Perte de la biodiversité	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface, milieu de la colonne, eaux de fond	court-terme et peut-être moyen terme	indéterminée	indéterminée	indéterminée
	Fertilisation en surface provoquant l'anoxie des eaux plus profondes	nodules, encroûtements, sulfures	milieu de la colonne, eaux de fond	indéterminée	indéterminée	indéterminée	indéterminée
Accidents		Ressource exploitée	Région impactée	Durée de l'impact	Echelle spatiale	Résilience	Importance
Logistique / Transport	Déversement de saumures issues de la production d'eau potable à bord des bateaux-support	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	long-terme	dépend de la courantologie	lente	forte
	Perte de minéral	nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme	locale	indéterminée	faible
	Fuite de carburant	nodules, encroûtements, sulfures	eaux de surface	long-terme	dépend de la courantologie	lente	faible
	Dysfonctionnements d'équipement non prévus pouvant aboutir à des pertes de matériel dans le riser de remontée et dans le système de pompage.	nodules, encroûtements, sulfures	fond marin, colonne d'eau	court-terme	locale	indéterminée	faible

5.3. Conséquences économiques possibles

A l'heure actuelle, les études d'impacts environnementaux restent circonscrites aux impacts fonctionnels sur l'environnement. Or le bon fonctionnement des écosystèmes et l'état des divers types d'environnements déterminent la qualité et la valeur des services qu'ils rendent aux sociétés humaines. Une baisse de qualité/rendement des services est fortement susceptible d'avoir des conséquences économiques. La méthodologie d'évaluation des conséquences économiques des impacts environnementaux est cependant toujours à mettre en place et à systématiser.

Les impacts environnementaux risquant d'avoir des conséquences économiques sont liés principalement à une atteinte de la biodiversité ; majoritairement indirects, ils agissent en synergie avec des impacts environnementaux liés à d'autres activités anthropiques.

Les activités économiques les plus susceptibles d'être impactées sont la pêche (les pêcheries d'eau profonde en particulier) et le tourisme.

La probabilité d'une perturbation du transport d'énergie et d'information via les réseaux de câbles sous-marins est moins forte que pour la pêche et le tourisme. Elle tient de l'accident. Cependant, si cet accident devait se produire, les conséquences économiques pourraient s'avérer considérables pour les nations concernées au vu de la dépendance de nos sociétés à l'information, notamment.

Les biotechnologies et la recherche sont également fortement concernées, non en termes de gains existants, mais en termes de gains à venir. Une perte de biodiversité est synonyme d'une perte de potentialités économiques et d'améliorations sociétales.

Enfin, les activités de préservation de ces écosystèmes profonds exceptionnels et des écosystèmes connectés, au travers notamment d'aires marines protégées, contribuent également à l'économie : ce sont des investissements qui peuvent créer de l'emploi et des infrastructures. Les aires marines protégées permettent de conserver des opportunités économiques, d'en créer de nouvelles, d'améliorer des opportunités récréatives et de préserver des opportunités scientifiques et des valeurs culturelles. Elles sont susceptibles d'attirer les touristes et les chercheurs et participent au « bien-être » général, dans l'acception de la définition du service écosystémique. Le coût de leur mise en place et de leur gestion devra être évalué en regard de l'évaluation économique des services écosystémiques préservés.

Tous ces impacts économiques sont cumulatifs, mais ne sont pas susceptibles de se produire tous, en toutes circonstances. Ils dépendent à la fois de la localisation précise des gisements (au sens industriel du terme), de l'organisation économique locale initiale, des services écosystémiques rendus localement et de l'ampleur des impacts environnementaux.

Les services écosystémiques sont difficilement monétarisables et les impacts environnementaux (destruction des environnements profonds, perte de la biodiversité sur les sites miniers, en dehors des sites miniers à cause de la diffusion des panaches de particules et dans les zones de rejets des déchets miniers, modification des paramètres physico-chimiques, perturbation voire mise en place de nouveaux écosystèmes profonds ou disparition et dans la zone de rejet des déchets), eux-mêmes, à l'heure actuelle, sont peu quantifiables. Par répercussion, il est donc encore difficile de chiffrer les conséquences économiques de ces impacts environnementaux.

5.4. Conclusion

Les impacts sur l'environnement dépendent de la nature de la ressource exploitée, des technologies utilisées, des spécificités des communautés biologiques associées à cette ressource, des caractéristiques de l'environnement, de la vulnérabilité et des capacités d'adaptation et de résilience des écosystèmes. Les conditions physiques, chimiques, biologiques et géologiques dans lesquelles opèrent les dispositifs miniers, influent significativement sur l'ampleur des impacts environnementaux. Elles sont encore cependant mal connues.

Les principales opérations d'une exploitation minière auraient pour conséquences majeures :

- Pour la collecte : la destruction permanente de l'habitat et de la faune associée, la formation d'un nuage de particules fines pouvant impacter une zone plus large que la zone d'extraction après resédimentation, ainsi qu'une perturbation dans la colonne d'eau. Les espèces migratrices pourraient aussi être confrontées à des pollutions électromagnétique et acoustique liées à l'introduction importante d'énergie au sein de l'écosystème par les engins de collecte et les dispositifs de remontée du minerai.
- Pour le rejet des déchets miniers (eau de fond, sédiments, débris de minerai) : une modification du pH, de la température, de l'apport en nutriments entraînerait une modification de la production primaire, avec une influence sur les cycles du carbone, du phosphate, des sulfures, de l'oxygène et des perturbations dans l'organisation des écosystèmes. L'augmentation potentielle des concentrations en métaux lourds et d'autres composés toxiques dans les rejets auront aussi un impact sur la biodiversité de l'écosystème exploité.

D'autres impacts connexes peuvent être identifiés en surface, associés à la présence-même de bateaux : source additionnelle de vibrations, rejet à la mer de saumure due à la production d'eau potable, risque d'introduction accru d'espèces invasives, et accidents (fuite de carburant, de produits toxiques, perte de minerai créant un phénomène localisé de fertilisation artificielle autour des bateaux, naufrage...).

La grande majorité des impacts liés à d'autres étapes que la collecte de minerai sont peu documentés dans la littérature scientifique et nécessitent un effort d'acquisition de connaissances. Une étude d'impact poussée et spécifique de la zone de test et des techniques/technologies mises en œuvre est indispensable. L'effet cumulatif des différents impacts de l'exploitation minière et/ou leur synergie avec les impacts d'autres activités anthropiques ou de phénomènes climatiques nécessite également d'être étudié.

A l'heure actuelle, les études d'impacts environnementaux restent circonscrites aux impacts fonctionnels sur l'environnement. Or le bon fonctionnement des écosystèmes et l'état des divers types d'environnements déterminent la qualité et la valeur des services qu'ils rendent aux sociétés humaines. Une baisse de qualité/rendement des services est fortement susceptible d'avoir des conséquences économiques. La méthodologie d'évaluation des conséquences économiques des impacts environnementaux est cependant toujours à mettre en place et à systématiser.

6. Préservation de l'environnement et gestion des impacts

L'augmentation de l'occupation du littoral par l'homme et l'exploitation croissante des ressources marines ont engendré la multiplication des impacts sur l'environnement marin et nécessité le développement d'outils de gestion et de préservation du milieu. Ces outils, prévus initialement pour les milieux côtiers, commencent à être adaptés aux milieux profonds en tenant compte des spécificités et du niveau de connaissance de ces derniers.

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser les connaissances sur les moyens de préservation de l'environnement et sur les méthodes de gestion des impacts liés aux activités d'exploitation des ressources marines, afin d'en tirer des enseignements dans le cadre d'une exploitation potentielle des ressources minérales marines profondes. La bibliographie du chapitre 6 étant essentiellement constituée de « littérature grise », cette partie ne relève pas au sens strict des attendus de l'expertise scientifique collective, et ne prétend pas à l'exhaustivité.

6.1. Les instruments de préservation de l'environnement, prévention ou précaution

Les acteurs qui ont en charge la préservation de l'environnement ou dont l'activité peut impacter l'environnement se réfèrent à ou utilisent différents outils qui s'inscrivent dans un contexte réglementaire ou qui relèvent d'un « code de conduite ». Cette gestion de l'environnement passe par une phase d'évaluation des risques qui décrit les scénarios de survenue d'un danger et de réalisation de ses effets et en estime la probabilité. Si cette évaluation est suffisante pour prendre des mesures de gestion, on se place dans un **régime de prévention**.

Il existe toutefois des situations où la zone d'incertitude de l'évaluation est considérable, renvoyant à une situation d'ambiguïté. La décision ne peut pas s'appuyer sur une évaluation du risque et relève alors du **régime de précaution**.

LE PRINCIPE DE PRÉCAUTION

Le principe de précaution, qui trouve son origine en Allemagne (Vorsorgeprinzip, début des années 70) et dans des traités internationaux (Mer du Nord, années 80), a été intégré à de nombreux textes internationaux sous différentes formulations (mesures de précaution, approches de précaution) et figure dans le rapport final publié à l'issue de la deuxième conférence des Nations unies sur l'environnement à Rio en juin 1992, ratifié par la France en juin 1994.

« Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les États selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. »

Les principaux points qui caractérisent le principe de précaution sont : son application pour des risques incertains avec menaces de dommages graves et irréversibles, l'adoption de mesures provisoires et proportionnée, l'exigence de se fonder sur des connaissances scientifiques, la nécessité de veiller à la réversibilité des situations, et de s'inscrire dans un processus continu s'appuyant sur l'évolu-

tion des connaissances et permettant la révision des mesures prises.

Le principe de précaution n'implique pas de figer une situation mais bien de s'inscrire dans une dynamique reposant sur l'évolution des connaissances et la recherche permettant de réduire les incertitudes et quand cela devient possible d'aller vers un régime de prévention lorsque l'incertitude dans l'évaluation des risques devient faible.

Le principe de précaution fait partie des fondamentaux de gestion de plusieurs organisations internationales œuvrant sur le milieu, au même titre que d'autres tels que celui de *pollueur-payeur* ou encore de *meilleure technique disponible*. L'AIFM intègre ce principe dans ses différents règlements en proposant des recommandations pour l'évaluation d'impacts environnementaux. L'Assemblée Générale des Nations Unies (AGNU) le transpose dans ses résolutions en vue de précéder toute nouvelle activité de pêche en haute mer d'une étude préalable d'impact environnemental. D'autres organisations, telles que l'Organisation Maritime Internationale (OMI), n'appliquent pas ce principe mais utilisent plutôt le principe de pollueur-payeur, les mesures intervenant généralement après des événements majeurs.

6.1.1. Les instruments réglementaires

Un certain nombre d'instruments de connaissance, de préservation ou de gestion de l'environnement marin existent actuellement. Ces dispositifs sont plus ou moins contraignants et prescriptifs.

Les instruments les moins prescriptifs sont les **Zones (ou aires) marines d'intérêt écologique ou biologique** (ZIEB ou AIEB), outil instauré en 2008 dans le cadre de la Convention sur la diversité biologique. Les ZIEB ont fonction d'inventaire et n'ont aucune portée réglementaire en termes de protection. En revanche, elles peuvent servir de point de départ à la mise en œuvre d'outils de protection comme les Aires marines protégées, mais aussi à la réalisation des études d'impact environnemental.

Le concept d'**Ecosystèmes Marins Vulnérables** (EMV) a été introduit dans la résolution 61/105 des Nations Unies en 2006 et décrit dans les directives de la FAO en 2009. Il s'agit d'une typologie d'écosystèmes benthiques fragiles ayant de faibles capacités de récupération, définie initialement afin de prévenir l'impact des activités de pêche profonde en haute mer. Les critères pour l'identification d'EMV sont définis au sein des lignes directrices internationales pour la pêche profonde. Cet outil peut présenter un caractère contraignant notamment pour la pêche profonde, mais son utilisation n'est pas limitée à ce secteur d'activité.

L'identification des EMV et des ZIEB est effectuée en fonction de différents critères dont les plus importants sont le caractère unique ou la rareté, le fonctionnement de l'écosystème et donc sa vulnérabilité.

L'Aire Marine Protégée (AMP) est véritablement un outil de gestion des écosystèmes marins et peut présenter un caractère prescriptif. L'AMP a des objectifs de gestion de ressources, de conservation des écosystèmes et d'amélioration des connaissances. Elle permet également la mise en place de mesures de gestion intégrée de différentes activités (tourisme, activités scientifique, pêcheries notamment).

Aujourd'hui, la grande majorité des AMP se trouve en milieu côtier (Figure 15). Sont néanmoins actuellement développées :

- de grandes AMP, notamment dans le Pacifique, qui couvrent parfois toute la ZEE d'un pays et donc des milieux profonds ;
- des AMP au sein de ZEE ayant vocation à couvrir le milieu profond, comme dans l'archipel des Açores ;
- des AMP de haute mer, par définition au-delà des juridictions nationales et de fait situées à d'importantes profondeurs (par exemple dans le Pacifique nord-est avec les sources hydrothermales Endeavour, ou dans le cadre de la convention OSPAR, voir ci-dessous).

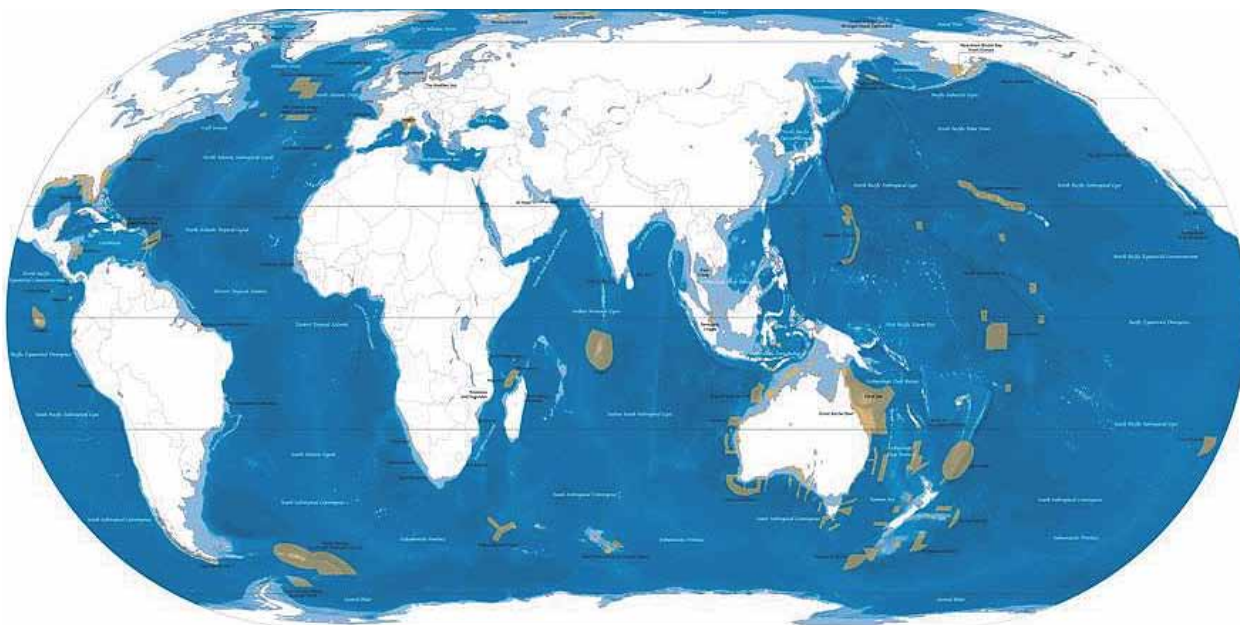


Figure 19 : Localisation des aires marines protégées dans le monde (source : IMPAC3)

Le réseau Natura 2000 découle des directives européennes Habitats Faune Flore et Oiseaux. Il a pour objectif de protéger les habitats et espèces « à statut patrimoniaux ou méritant de l'être », notamment en mer au large et en milieu profond où les sites Natura 2000 constituent un type d'AMP. La France a entrepris un programme d'acquisition de connaissances pour aboutir à la désignation de sites Natura 2000 au large à l'échéance 2015. La gestion de ces zones protégées impose la mise en place d'un Comité de pilotage, associant les différents acteurs prioritairement concernés par la zone et donc les différents usages. Ce comité doit également s'assurer que toute activité sur le site se déroule sans impact majeur sur les habitats ou espèces d'intérêt communautaire présents. Une des limites de ce réseau est géographique, le droit français ne permettant pas l'établissement de zones Natura 2000 en outre-mer.

Toujours dans le cadre des AMP, la Commission OSPAR a initié depuis 2010 un travail collaboratif avec les organisations compétentes de l'Atlantique Nord-Est afin de partager, étudier et identifier les mesures de gestion des activités humaines existantes ou à développer, notamment dans le cadre

des **AMP OSPAR désignées en haute mer**. Ce travail collaboratif, appelé Processus de Madère, se traduit par l'organisation de réunions tous les deux ans et l'adoption, en cours, de dispositions collectives, partagées par les différentes parties prenantes.

Compte-tenu des connaissances encore parcellaires dans ces zones, la désignation d'AMP en milieu profond est généralement motivée par des critères géomorphologiques :

- Talus continentaux et canyons associés,
- Monts sous-marins,
- Dorsales océaniques.

QU'EN EST-IL DE LA DCSSM ?

La directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » (DCSSM) impose à chaque État membre de l'UE d'élaborer une stratégie pour ses eaux marines (métropolitaines pour la France). Limitée aux eaux sous juridiction des États européens et ne concernant pas l'Outre-Mer, elle est difficilement applicable dans le cadre de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. De plus, son application en milieu profond est difficile car les données et les connaissances actuellement disponibles sont trop éparpillées pour permettre d'évaluer l'état et les tendances d'évolution de ces habitats (cf. chapitre 4). Néanmoins, les principes et méthodes développés dans le cadre de la DCSSM (définition d'un « Bon Etat Ecologique » à partir d'indicateurs et de descripteurs pour des régions marines spécifiques) pourraient être étendus dans des zones potentiellement riches en ressources minérales marines profondes.

Ces différents instruments s'appliquent dans des cadres réglementaires différents en fonction de la zone considérée :

- **Cadre international** : S'y appliquent les conventions des mers régionales qui mobilisent les instruments de type ZIEB, EMV et AMP. Les conventions de mer régionales (comme la Convention pour la Protection de l'Atlantique Nord-Est OSPAR) peuvent adopter des décisions juridiquement contraignantes. Par ailleurs, différents organismes régissent les activités qui se déroulent en haute mer : organisations régionales de pêche comme la Commission des Pêches d'Atlantique Nord-Est (CPANE), l'Autorité Internationale des Fonds marins (AIFM) ou l'Organisation Maritime Internationale (OMI).
- **Cadre européen** : les directives Habitats-Faune-Flore et Oiseaux qui constituent le réseau Natura 2000 et la directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (pour cette dernière le périmètre d'application s'étend, pour la métropole, jusqu'aux 200 milles nautiques). Elles ont pour objectifs, pour Natura 2000, la protection de certains écosystèmes et d'habitats prioritaires désignés et pour la DCSSM, la mise en cohérence des activités avec les objectifs environnementaux des Plans d'Action pour le Milieu Marin (PAMM) et l'atteinte du bon état écologique.
- **Cadre national** : le code minier et le code de l'environnement régissent les activités qui se déroulent dans les eaux sous juridictions nationales (ZEE et Domaine Public Maritime).

6.1.2. Les outils volontaires

Des scientifiques et des industriels ont mis en place différents codes de conduite visant le respect de l'environnement et des écosystèmes dans le cadre de leurs travaux de recherche, d'exploration et d'exploitation en mer (exemple des codes InterRidge et IMMS). Ces outils non réglementaires restent dépendants du bon vouloir des acteurs concernés (scientifiques et industriels) et reposent

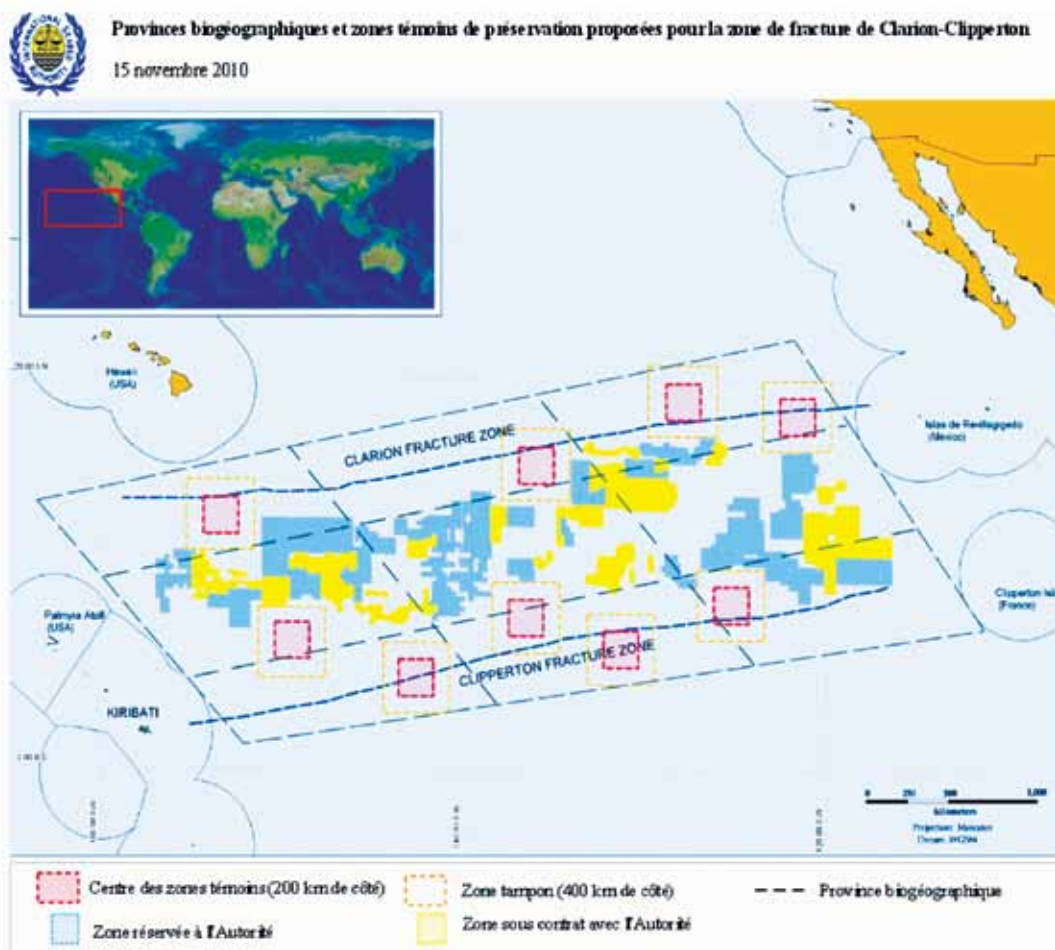
essentiellement sur des principes généraux ou des **recommandations**. La mise en place de ces codes se fait à l'initiative d'un groupe d'entreprises, de scientifiques ou dans le cadre d'une convention de mer régionale (OSPAR par exemple) et leur mise en application n'est pas obligatoire. Ces codes peuvent néanmoins être utiles aux autorités concernées par l'évaluation des projets (Gouvernements, AIFM, etc.) et leur fournir un modèle pour la mise en place d'une législation juridiquement plus contraignante.

L'AIFM met également en place des ateliers scientifiques associant les experts de sa Commission juridique et technique à des experts venus des milieux académiques.

6.1.3. Application des outils en domaine profond

L'application de ces outils s'avère difficile en domaine profond notamment du fait du manque de connaissances fondamentales sur le fonctionnement des écosystèmes profonds mais également sur les méthodologies d'évaluation des impacts et du lien entre pressions et impacts. Les différents instruments présentés indiquent très souvent un objectif d'acquisition de connaissances prioritaire dans leurs objectifs généraux : l'AIFM en fait un point majeur dans le cadre des permis d'exploration, les AMP comportent des objectifs de recherche scientifique, la DCSMM identifie des besoins en termes d'acquisition de connaissances.

Figure 20 : Localisation des neuf zones témoins de préservation dans la zone de Clarion-Clipperton, dans le plan de gestion de l'environnement recommandé par la CJT (ISBA/17LTC/7) et adopté par le Conseil de l'AIFM.



A ce jour, il existe peu de méthodologies d'évaluation des impacts en environnements profonds (projet Nautilus et exploitation pétrolière offshore par exemple). L'AIFM propose ainsi des recommandations aux Etats membres pour l'évaluation de ces impacts. L'accès à ces environnements profonds reste difficile et nécessite de mettre en œuvre d'importants moyens comme la flotte hauturière au cours de campagnes longues. Les méthodologies et stratégies actuellement mises en place lors de ces campagnes sont du domaine de la recherche fondamentale et donc difficilement applicables directement de manière opérationnelle dans le cadre d'études d'impact. Le besoin affiché concerne le développement, la validation et le test de protocoles standardisés d'évaluation des impacts pouvant aller jusqu'à la mise en place de projets pilotes. Cette étape de recherche méthodologique sera ainsi cruciale pour pouvoir ensuite proposer des protocoles efficaces et compatibles avec les contraintes industrielles tout en respectant le cadre réglementaire.

De plus, partant du constat que l'impact d'une exploitation ne se limite pas aux frontières strictes du permis d'exploitation et que les impacts cumulatifs sont également à évaluer et donc à gérer, il apparaît nécessaire de mettre en place une gouvernance et une gestion intégrée à l'échelle internationale. Ce mode de gestion intégrée est déjà mis en place pour la pêche profonde dans le cadre notamment du CIEM (qui intègre un groupe sur les environnements profonds). L'AIFM propose également, dans le cadre d'un plan de gestion environnementale liée à l'exploitation des nodules polymétalliques, la mise en place de 9 zones témoins de préservation à l'échelle de la zone Clarion-Clipperton (Figure 20).

Ces contraintes liées à l'application de différents outils de préservation de l'environnement au milieu profond font apparaître la nécessité de définir et valider expérimentalement des stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux qui soient réalistes et opérationnelles, acceptables scientifiquement et applicables financièrement.

6.2. Les stratégies d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux

6.2.1. Les stratégies dans le cadre d'exploitations connues

Aucune exploitation de ressources minérales profondes n'a encore débuté. Seuls des projets d'exploration sont en cours. Il n'existe donc pas de suivis des impacts environnementaux liés à des exploitations (mis à part à l'état de projet pour le cas de Nautilus en Papouasie Nouvelle Guinée) et les quelques suivis existants liés à l'exploration sont pour la plupart confidentiels. Néanmoins, les ressources marines en général sont déjà largement exploitées par l'homme ; c'est le cas des granulats marins, des énergies marines renouvelables, des hydrocarbures et des ressources halieutiques.

Les granulats marins sont les matériaux minéraux qui sont extraits du fond de l'océan. La recherche et l'exploitation de ces substances minérales, localisées le plus souvent sur le domaine public maritime sont des activités strictement réglementées, qui relèvent du code minier et du code de l'environnement.

L'éolien « posé » repose sur une structure enfoncée dans le fond marin. Il est plutôt installé dans des eaux peu profondes (jusqu'à 30 m de fond) et à moins de 30 kms de la côte (DPM et zone contigüe)

et est régi par le code de l'Energie (qui régit la production de l'électricité en France), le code de l'environnement / Loi sur l'Eau – Loi Littoral, le code général de la propriété des personnes publiques et le code de l'Urbanisme.

L'exploitation offshore pétrolière profonde concerne des profondeurs supérieures à 500 m. Grâce aux avancées technologiques, les grandes profondeurs d'eau (> 1 000 m) sont maintenant accessibles et exploitables. En France, l'offshore pétrolier profond est régi par le Code Minier et le Code de l'Environnement. A ce jour, il n'existe aucune exploitation française en dehors de la ZEE. Pour la zone internationale, une recommandation est en cours d'élaboration par l'AIFM.

La pêche profonde concerne les pêches réalisées par des profondeurs supérieures à 200 m (définition FAO) ou à 400 m (définition CIEM), mais l'unique critère bathymétrique est insuffisant pour qualifier les pêches profondes. En fonction de sa localisation (haute mer, ZEE ou mer territoriale) elle est réglementée par plusieurs conventions. En zone internationale, s'appliquent la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM, 1982), l'accord de New York (1995), le principe de précaution, instauré par la convention sur la diversité biologique (1992, principe 15) ainsi que les Organisations régionales de pêche comme la CPANE, en charge de la gestion des pêche en Atlantique Nord-Est. Plusieurs organisations émettent également des recommandations et avis (FAO, OSPAR, CIEM). Au sein des eaux européennes, c'est la Commission Européenne (PCP et réglementation européenne) qui gère les quotas.

Bien que les granulats marins et l'éolien marin posé soient localisés dans les eaux peu profondes, ces deux types d'exploitation présentent des similarités avec l'exploitation minière. L'exploitation des granulats marins est régie par le même code que les ressources minérales marines profondes – le code minier – et le début de leur exploitation industrielle remonte aux années 1980. Ses impacts sur l'environnement sont bien connus et les stratégies de suivi environnemental bien établies. L'exploitation des énergies marines renouvelables est quant à elle dans sa phase de maturation industrielle et présente ainsi un panel de comparaisons intéressant en termes d'élaboration des stratégies de suivi environnemental.

La pêche profonde et l'offshore pétrolier profond concernent les milieux profonds. La pêche profonde est un cas assez différent des autres puisque l'exploitation touche à des ressources mouvantes et vivantes mais impacte également les écosystèmes benthiques profonds. Les méthodes de gestion actuellement définies, ou en cours de définition, intègrent donc l'impact potentiel sur ces écosystèmes. L'offshore pétrolier profond fait quant à lui l'objet de suivis environnementaux de routine.

Afin d'évaluer les impacts de ces différentes activités industrielles sur l'environnement, plusieurs éléments sont attendus (sauf pour la pêche profonde mais le règlement de 2002 est en cours de révision et devrait renforcer la procédure d'évaluation des impacts.) :

- Une évaluation initiale de l'environnement,
- Une étude d'impacts et des mesures de réduction des impacts,
- Des suivis environnementaux périodiques.

Ces documents sont réalisés à la demande de l'industriel le plus souvent par des bureaux d'études en environnement. Actuellement, seules les études réalisées pour l'exploitation des granulats marins sont expertisées par un institut scientifique dédié (Ifremer) et mentionné dans le code minier. Pour la pêche profonde, l'exploitation ne nécessite pas encore la mise en place de procédures d'étude d'impact. En revanche, des mesures de protection sont mises en place pour la ressource (les totaux admissibles de captures -TAC) et pour les écosystèmes marins vulnérables (création par la CPANE de zones de fermeture à la pêche profonde et mise en place d'une règle d'évitement – ou « move-on rule » - en cas de rencontre d'une EMV), accompagnées de programmes de recherche scientifique pour évaluer l'impact de la pêche profonde.

6.2.2. Procédure d'évaluation des impacts de l'exploitation des ressources minérales marines

Dans le cadre d'un projet d'exploration ou d'exploitation, l'objectif d'une procédure d'évaluation d'impacts est d'établir un état initial et d'évaluer les impacts environnementaux des activités humaines (analyse des caractéristiques et de l'état écologique, analyse des pressions et impacts, analyse économique et sociale du projet et du coût de la dégradation, analyse des mesures de compensation / restauration). Pour pallier le manque de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes profonds et sur les impacts potentiels de l'exploitation, la gestion de ces impacts doit se refaire de manière adaptative, et être réévaluée régulièrement en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques.

Le cadre réglementaire associé aux projets d'exploration ou d'exploitation des ressources minérales marines profondes dépendra de la localisation de la zone cible. Les projets devront se conformer soit aux réglementations nationales lorsque le chantier est situé dans une ZEE, soit aux recommandations publiées par l'AIFM lorsque la zone d'intérêt est située dans la Zone.

Actuellement, le seul projet d'exploitation est mené par la société Nautilus Minerals Niugini Limited dans la ZEE de Papouasie Nouvelle Guinée. La procédure d'évaluation d'impact appliquée prend en compte les différentes phases d'existence d'un chantier d'exploitation :

- Demande de Permis d'exploration (PER),
- Demande de Permis d'exploitation,
- Ouverture des travaux,
- Fin des travaux,
- Démantèlement,
- Post exploitation.

Les paragraphes suivants présentent la structure générale d'une procédure d'évaluation d'impact et les différents acteurs impliqués durant la procédure d'évaluation et d'attribution des permis. Ce schéma général pourrait servir de base à la définition d'une procédure spécifique à l'exploitation des ressources minérales marines.

Structure d'une procédure d'évaluation d'impact

Une procédure d'évaluation d'impact (EIS) rassemble généralement les éléments suivants :

- La description du projet ou cadrage préalable, de ses objectifs et de ses caractéristiques techniques.
- Une revue des réglementations en vigueur (conventions internationales, lois, décrets...) concernant potentiellement le projet.
- Une analyse de l'état initial (ou EBS : « **Environmental Baseline Study** ») prenant en compte différents compartiments des écosystèmes potentiellement impactés, basée sur une étude bibliographique enrichie de nouvelles données acquises suivant un plan d'échantillonnage clairement décrit :
 - **le milieu physique** : hydrodynamisme (courant, houle), bruit sous-marin ambiant, turbidité naturelle et fonds marins (sédimentologie, géomorphologie, etc.),
 - **le milieu biologique** : composition de la colonne d'eau, peuplements benthiques, poissons, cétacés, oiseaux marins (observations sur plusieurs cycles biologiques annuels, sur une aire d'étude pertinente pour le compartiment considéré),

-
- **le milieu humain** : caractérisation des usages et de l'utilisation du milieu marin,
 - **le paysage et le patrimoine** : passage du paysage terrestre à marin.
 - Une étude d'impact environnemental et sociétal (ou ESIA : « **Environmental and Social Impact Assessment** »). Cette étude, généralement réglementaire, est entreprise dès la phase d'exploration ou lors de la phase conceptuelle d'un projet. Elle permet d'identifier et de quantifier les impacts potentiels du projet sur l'environnement naturel et humain engendrés, les conflits d'usage, ... Des mesures et des solutions techniques sont alors définies afin d'éviter-réduire-compenser les effets du projet.
 - Le Plan de gestion environnemental (ou EMP : « **Environmental Management Plan** ») est établi lors du démarrage de chaque opération. Il fixe des objectifs d'amélioration et des programmes de mise en œuvre conformes aux obligations légales en adéquation avec la politique Hygiène – Sécurité – Sûreté – Sociétale et Environnement de la société opératrice du projet . Il établit également le plan de suivi temporel des écosystèmes et de contrôle des impacts en adéquation avec l'évaluation faite par l'étude d'impact (compartiments étudiés, durée des suivis, ...), au regard des engagements préalablement fixés. Il pourra être recommandé un ensemble d'actions correctives permettant une amélioration en termes d'impact environnemental ou sociétal. A ce programme de contrôle devront être rattachés des indicateurs et des mesures associées de contrôle. Ce plan permet de s'assurer que les procédures, les réglementations et les objectifs du plan de management environnemental sont connus et bien respectés pendant la durée de vie des installations. Ce plan doit également prévoir des procédures spécifiques liées aux accidents, ainsi que le démantèlement de l'unité de production.

Des mesures de compensation et de restauration. Dans le cadre de la séquence « éviter-réduire-compenser », le maître d'ouvrage doit proposer des mesures visant l'absence de perte d'habitat, d'espèce ou de service. La logique de la séquence doit être respectée : l'évitement des impacts, la réduction des impacts afin de les rendre résiduels (ou non significatifs), enfin lorsque les impacts n'ont pu être, ni évités, ni réduits, des mesures de compensation sont proposées. Il existe quatre grands types de mesures de compensation : la création, la restauration, l'amélioration et la préservation. Dans les écosystèmes marins profonds, l'accroissement des projets d'exploitation minière conduit à s'interroger sur les actions de protection, de préservation et de restauration des écosystèmes impactés. Les mesures actuellement envisagées se sont majoritairement tournées vers la création d'aires marines protégées, la fermeture de zones à la pêche profonde ou la mise en place de conventions et de traités internationaux dont l'identification d'écosystèmes marins vulnérables (EMVs).

Procédure d'évaluation (expertise) et d'attribution des permis et de suivi

Lorsque le projet est situé dans la zone internationale, l'acteur principal est l'AIFM qui délivre les permis d'exploration et d'exploitation et qui publie les recommandations à l'intention des contractants en vue de l'évaluation d'éventuels impacts sur l'environnement liés à l'exploitation.

Dans une ZEE, plusieurs acteurs vont intervenir, à différents niveaux :

- Le contenu et la méthodologie de réalisation de la procédure d'évaluation d'impact environnemental (EBS, EIA et EMP) doivent être précisés dans un document, en adéquation avec les connaissances scientifiques du moment. Ce document doit préciser les procédures d'acquisition de données, l'étendue spatiale et temporelle de l'étude, les paramètres et compartiments de l'écosystème à étudier et les méthodologies d'évaluation de l'impact.
- La procédure d'évaluation d'impact sera mise en œuvre par la société opératrice du projet, très souvent par un bureau d'études spécialisé contracté pour l'occasion.

-
- Un avis peut être demandé sur la qualité de réalisation et sur le contenu de la procédure d'évaluation d'impact environnemental. Cet avis nécessite une expertise scientifique pour chaque compartiment étudié (halieutique, benthique, physique, ...) et pour chaque étape du projet. Pour les granulats marins, l'Ifremer est conseiller scientifique et technique des décideurs publics et rédacteur des protocoles. Ces protocoles sont conseillés et donc non obligatoires.
 - Une procédure de consultation publique peut également être intégrée dans le processus, prenant en compte la confidentialité de certaines données.
 - Le ministère public sera ensuite décisionnaire sur l'attribution du permis et sur la mise en œuvre du plan de gestion environnemental.

6.3. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de synthétiser les connaissances sur les outils de préservation de l'environnement et sur les méthodes de gestion des impacts liés aux activités d'exploitation des ressources marines.

Ces outils, en plus de leur finalité principale de gestion et de préservation, ont un objectif d'acquisition de connaissances fondamentales sur le fonctionnement des écosystèmes ciblés. Souvent développés dans le cadre d'activités situées dans le domaine côtier, l'application de ces outils au domaine profond fait apparaître des contraintes spécifiques à ces environnements peu accessibles et moins connus. Une meilleure compréhension du fonctionnement de ces écosystèmes est nécessaire avant d'aborder la recherche d'indicateurs fiables pour l'évaluation d'impact, la rédaction et la validation de protocoles spécifiques. Ces travaux sont indispensables pour aboutir à des procédures d'étude d'impact efficaces scientifiquement et opérationnelles (facilité et coût de mise en œuvre). L'application de ces outils de préservation s'effectue très souvent dans un cadre juridique complexe faisant apparaître la nécessité d'une gestion intégrée prenant en compte les impacts cumulatifs à différentes échelles dépassant souvent ces frontières réglementaires,

La seconde partie de ce chapitre tente de préciser les objectifs et le contenu d'une procédure d'évaluation des impacts environnementaux. Le contenu de la procédure d'évaluation d'impact et l'identification des acteurs impliqués durant les différentes étapes de sa mise en œuvre font partie de la réflexion à mener. Ce schéma général peut servir de base à la construction d'une procédure spécifique à l'exploitation des ressources minérales marines, passant par l'identification des différents acteurs impliqués et la définition du rôle des scientifiques dans les étapes d'élaboration, de validation et d'expertise. Concernant les ressources marines, bien commun de l'Humanité, la phase de consultation publique apparaît d'une importance capitale. Cette procédure intégrerait un volet d'acquisition de connaissances fondamentales, et également un programme de recherche spécifique portant sur l'évaluation des impacts et le développement de mesures de compensation/restauration. Ces procédures de gestion doivent être adaptatives et évoluer périodiquement, en même temps que la connaissance fondamentale des zones à exploiter, et prenant en compte l'expérience des premières exploitations.

7. Perspectives de recherche et de développement

L'intérêt croissant pour les ressources minérales marines doit prendre en compte les enjeux de durabilité écologique et de maîtrise des impacts sur les écosystèmes profonds qui leur sont associés et qui sont encore mal connus. Si aucune exploitation industrielle n'a commencé, un nombre croissant de sites sont en cours d'exploration. Aussi, il apparaît impératif :

- d'avancer dans la connaissance fondamentale des écosystèmes concernés;
- de proposer, en amont des explorations, des méthodologies validées scientifiquement permettant d'évaluer les impacts d'une exploitation, de proposer des plans de surveillance et des stratégies de restauration.

Les compétences scientifiques françaises sont bien représentées au sein de différentes instances nationales et internationales (GT8 " Mer " de l'Alliance ALLENI, CIES, ESF/Marine Board, AIFM, InterRidge), et la Flotte Océanographique Française, avec ses navires hauturiers, engins submersibles et instrumentation océanographique associés, constituent des atouts majeurs pour mener à bien ces recherches.

7.1. Les besoins d'acquisition de connaissances fondamentales

La recherche fondamentale doit s'orienter vers une approche systémique, prenant en compte tous les compartiments de l'écosystème, à différentes échelles spatiales et temporelles, en développant des outils et des méthodes innovantes d'approche intégrée d'observation et d'écologie expérimentale.

Sept axes principaux de renforcement de nos connaissances quant à ces géo-écosystèmes nous paraissent primordiaux.

Poursuivre l'exploration océanographique, géologique, biologique et écologique

Les champs hydrothermaux, zones actives, sont généralement bordés de zones inactives, qui pourraient jouer un rôle important dans les écosystèmes marins profonds. Alors que les données sur les sources actives continuent de s'accumuler, il n'existe pratiquement aucune information sur la faune qui colonise les sites inactifs, cibles directes d'une exploitation éventuelle pour les

sulfures. Les biocénoses restent donc à caractériser, en focalisant sans doute sur les compartiments de petite taille, méiofaune et microflore.

De plus, pour tous les environnements concernés (nodules, sulfures et encroûtements), des inventaires de la diversité biologique sont à réaliser pour établir des états de référence des zones concernées, tant d'un point de vue de la diversité phylogénétique que fonctionnelle, et des processus biogéochimiques et physiques associés.

Comprendre le fonctionnement des géosystèmes dans l'océan

Les fonds marins restent parmi les rares lieux de notre planète où des découvertes de premier ordre sont encore possibles. A l'interface entre les enveloppes solides et liquides de la Terre, se développent des milieux variés, modulés notamment par la tectonique des plaques et les apports sédimentaires. De nombreuses questions géologiques subsistent sur les environnements sous-marins connus. Pour répondre à la plupart de ces questions, la réalisation de séries temporelles de paramètres physiques et chimiques, traceurs de ces processus, sont nécessaires et justifient l'établissement de véritables observatoires sous-marins. Des développements technologiques sont aussi nécessaires pour mieux explorer les grands fonds, mieux connaître les caractéristiques des gisements potentiels et les propriétés des ressources qu'ils renferment.

Comprendre les interactions entre géosystèmes et écosystèmes et leurs évolutions

Les échanges entre les eaux de fond et le reste de l'océan sont encore largement méconnus et les connaissances actuelles ne permettent pas d'en réaliser une modélisation fiable permettant l'évaluation des impacts des perturbations proches du fond mais également pouvant affecter toute la colonne d'eau.

D'autre part, des couplages forts existent entre physique, biogéochimie et biologie des masses d'eau et leurs interfaces sur les fonds marins qu'il sera nécessaire de prendre en compte dans les études d'impacts. Là encore, le développement de profileurs fournira de nouvelles connaissances dans l'océan profond, permettant d'enrichir les campagnes d'acquisition de données indispensables afin de faire progresser les modèles de circulation océanique, outils incontournables pour réaliser des études d'impact de la petite à la grande échelle spatiale et sur différentes échelles de temps.

Améliorer nos connaissances sur les dynamiques et le fonctionnement des écosystèmes profonds

Les relations diversité-fonctions dans ces écosystèmes sont encore très largement inconnues. Les connaissances sont également très fragmentaires sur les conditions qui permettent l'établissement des communautés et le maintien de la biodiversité. Cette connaissance est quasi-absente pour de nombreux habitats de substrats durs directement liés aux ressources minérales, qui n'ont pas bénéficié des études menées sur les champs de nodules ou les sources hydrothermales actives.

Les principaux enjeux des recherches à développer sont de comprendre : les réponses des espèces-clés ; la variabilité dans l'espace et dans le temps de la composition et la structure des communautés, en relation avec leur connectivité ; la spécificité des relations biodiversité-fonctions ; les régimes trophiques et les impacts de la productivité des écosystèmes ; la compréhension des réseaux d'interactions entre espèces ainsi qu'entre communautés et habitats.

Modéliser et prédire le fonctionnement des géo-écosystèmes à petite et large échelle

La compréhension du système « Océan » repose pour beaucoup sur une simulation intégrée des processus. Décrire, analyser et comprendre les fluctuations aux différentes échelles spatio-temporelles requièrent analyse des observations, assimilation de données, quantification des incertitudes, simulations et modélisations.

Le développement de modèles permettant de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes étudiés devra s'appuyer sur l'intégration des données acquises par les observatoires. De tels modèles seront utiles pour répondre aux questions posées dans le cadre de la gestion, de la conservation et de la protection de ces écosystèmes.

Développer les outils et l'expérimentation

Il sera important de soutenir la flotte océanographique et d'assurer les avancées technologiques de ses outils. Parmi les évolutions à prévoir, on indiquera préférentiellement :

- la rénovation du Nautil, et par extension des navires hauturiers ;
- le développement des outils de cartographie (optiques, acoustiques, géophysiques, chimiques) à différentes échelles spatiales ;
- l'acquisition et la mise en œuvre rapide d'AUVs profonds équipés de charges utiles permettant un couplage de techniques optiques et acoustiques.

Il est indispensable de développer de nouveaux outils permettant de conduire des stratégies d'exploration plus efficaces et de localiser les minéralisations fossiles.

Les développements nécessaires reposent sur des submersibles équipés de charge utile permettant d'associer de l'imagerie acoustique avec l'imagerie optique haute définition. Ce couplage optique / acoustique permettra également d'avancer dans la cartographie des habitats, nécessaire aux études environnementales. Les développements nécessaires concernent aussi bien du développement technologique (capteurs optiques de nouvelle génération, UltraHD ou 4K et/ou haute sensibilité), mais également du développement méthodologique et logiciel (reconstruction 3D, méthodes de traitement d'images, bio-informatique et écologie numérique...).

La réalisation de prélèvements isobares et le maintien et l'expérimentation sous pression en laboratoire restent indispensables pour l'étude des cycles de vie et des adaptations physiologiques d'espèces animales, l'isolement de souches microbiennes et l'étude de leurs métabolismes. Un effort particulier doit là aussi être consenti pour permettre la réalisation de prélèvements isobares et le transfert sous pression des animaux, sans stress lié à la décompression.

Il sera aussi important de développer de nouvelles infrastructures en écologie expérimentale permettant l'étude de la dynamique de processus biologiques-clés sur des échelles plus représentatives (mois, année). Dans ce contexte, il est aussi pertinent d'envisager des sites ateliers profonds, situés soit sur des observatoires fond de mer, soit à proximité d'infrastructures de recherche à terre comme c'est le cas en domaine côtier (ex : Zones Ateliers). Sur ces sites, pourront être développées des plateformes instrumentées mobiles.

Enfin, il sera nécessaire de développer les outils d'étude *in situ* pour l'exploration et l'étude intégrée des panaches hydrothermaux afin de mieux cerner l'impact global de l'hydrothermalisme océanique sur les grands cycles biogéochimiques et les impacts locaux de l'exploitation des ressources minérales marines. L'effort doit aujourd'hui se focaliser sur le développement des capteurs chimiques *in situ* qui ont un retard de 10 ans et plus par rapport aux capteurs physiques couramment utilisés.

Renforcer la gestion et l'accès aux données.

Un effort particulier est nécessaire pour coordonner et diversifier la collecte des données relatives aux milieux profonds, et, à l'instar des travaux et initiatives réalisés pour les milieux terrestres dans le cadre du GBIF (système mondial d'information sur la biodiversité : <http://www.gbif.org/>), assurer le recensement et la mise à disposition de toutes les données, au sein d'un système mondial d'information.

Outre la collecte et la mise à disposition de données, il s'agira également d'inclure les métadonnées sur les facteurs biotiques, abiotiques (incluant les données climatiques), économiques, sociologiques, etc. En effet, ces différentes sources d'information sont souvent stockées et codées suivant des normes contingentes à chaque communauté scientifique, sans réel souci d'interfaçage avec les autres disciplines. Pour une utilisation optimale des différents jeux de données, un effort important semble maintenant nécessaire pour proposer une normalisation de leur codage et de leur mise en forme. Certaines initiatives vont d'ores et déjà dans ce sens, mais elles restent encore limitées et nécessitent un soutien fort des institutions.

Il s'agira aussi de vaincre les nombreuses limites techniques et un frein socio-culturel à la mise en commun et à l'utilisation des données, que ce soit dans les opérations de collecte et traitement de données ou dans les activités de synthèse.

7.2. Evaluer les services écosystémiques et développer des mesures en faveur de la gestion des environnements profonds

Nous ne sommes pas, actuellement, capables d'établir la liste complète des biens et services fournis par les milieux marins profonds et leurs écosystèmes, ni d'estimer précisément leur valeur.

Le développement de modèles écosystémiques intégrant les différents aspects écologiques, sociaux, économiques et environnementaux devrait permettre de quantifier les différentes interactions et constitue une première étape dans l'établissement de scénarii d'impacts et de gestion, ainsi que dans l'identification d'alternatives possibles.

Comme pour les services écosystémiques, l'évaluation économique des impacts nécessite le développement de nouvelles approches économiques permettant la combinaison des différentes méthodes de monétarisation existantes.

L'évaluation environnementale doit aboutir à la définition de modes de gestion et de gouvernance, qui sont eux-mêmes des objets de recherche en constante évolution. Il s'agira d'envisager des stratégies d'étude intégrées, ciblées sur les habitats types afin de définir les stratégies de conservation, les mesures de compensation ou de restauration et en optimiser l'efficacité.

Dans ce cadre, il apparaît pertinent de mettre en place 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 pour permettre la définition de protocoles efficaces pour l'évaluation des impacts, sur des zones pilotes. Ces « expériences » doivent servir à affiner les opérations futures et définir un « cahier des charges » d'études d'impact évolutif, en aucun cas définitif.

Concernant la restauration, l'absence de techniques d'ingénierie écologique représente une des principales difficultés dans la mise en place de stratégies de restauration opérationnelle des écosystèmes.

Là encore, la mise en place d'observatoires fond de mer permettra de renseigner les dynamiques temporelles et sera indispensable à l'élaboration de plans de restauration et au suivi des écosystèmes impactés par l'exploitation des ressources minérales.

Le site EMSO aux Açores¹³ et le site Neptune/Endeavour à l'Ouest du Canada peuvent servir de référence sur les méthodologies d'évaluation d'impact et sur les technologies d'observatoire de fond de mer.

De telles perspectives de recherches ne pourront se faire sans une identification des acteurs en France. Bien que la communauté scientifique nationale concernée soit limitée, elle a su se rassembler dans différentes structures de coordination ou de regroupements d'équipes au sein d'organismes mais aussi auprès des universités.

7.3. Conclusion

Alors que la perspective d'une exploitation prochaine des ressources minérales profondes se précise à l'échelle internationale, la présente expertise collective montre que nous ne connaissons que de façon très partielle ces géo-écosystèmes particuliers. Il est donc essentiel, dans le cadre d'une exploitation de ces ressources, respectueuse de l'environnement marin, de poursuivre un effort de recherche conséquent afin de mieux appréhender les processus liés au fonctionnement et aux dynamiques des géo-écosystèmes marins profonds, en s'intéressant aux questions majeures suivantes :

- Quels sont les processus de formation et de transformation des éléments liés aux ressources minérales marines profondes ?
- Quels processus gouvernent la variabilité naturelle et le maintien de la biodiversité des écosystèmes associés aux ressources minérales marines profondes, et soutiennent leur fonctionnement et leur métastabilité ?
- Quelle peut être l'importance des impacts potentiels liés à l'exploitation des ressources minérales marines profondes et les réponses de la biodiversité et des écosystèmes dans un contexte de changement global ?

S'il est indéniable que l'apport de réponses à ces questions nécessitera de relever de nouveaux défis scientifiques et technologiques pour mener à bien les observations et l'échantillonnage requis à différentes échelles de temps et d'espace, il s'agira aussi de favoriser le développement de l'expérimentation *in situ* et en laboratoire afin de préciser les mécanismes sous-jacents au fonctionnement et à la dynamique des systèmes profonds.

D'autre part, une réflexion au moins nationale - sinon européenne - doit être menée concernant la collecte, l'archivage et la mise à disposition des données, qu'elles soient physiques, chimiques, biologiques, écologiques, économiques ou sociales, afin de faciliter le développement de modèles qui constitueront à terme, des outils incontournables pour l'élaboration de scénarii de gestion.

13. EMSO est une Infrastructure Européenne de recherche ESFRI et fait partie de la feuille de route française. EMSO Açores abrite un observatoire pluridisciplinaire piloté par la France qui fournit, en quasi temps réel et en continu depuis 2010, des séries temporelles de mesures et d'images sur les processus hydrothermaux, tectoniques et volcaniques et sur les écosystèmes du site actif Lucky Strike. <http://www.emso-eu.org/>

Une réflexion sur les Très Grandes Infrastructures de Recherche doit aussi être menée, non seulement pour permettre le maintien d'une flotte océanographique nationale performante, ainsi que les outils qui lui sont associés, mais aussi pour envisager la constitution de zones pilotes permettant, au travers d'études et de suivis à long terme, le développement de protocoles efficaces et réalistes afin de mesurer les impacts potentiels d'une exploitation future.

Enfin, il est indispensable d'organiser l'étape de transfert de la connaissance scientifique fondamentale vers l'élaboration et la validation de protocoles scientifiquement efficaces et industriellement réalisables pour l'évaluation de l'état et le suivi des écosystèmes profonds. Ce dernier point pourrait être soutenu par le maintien au niveau national de formations de haut niveau en océanographie.

Annexe 1 : Cahier des charges

1. Contexte et enjeux

La France dispose d'une capacité importante d'exploration et d'accès à de nouvelles ressources minérales à grande profondeur en mer, dont l'exploitation pourrait avoir des impacts sur la biodiversité, les écosystèmes et les milieux. L'engagement 12.a du Grenelle de la Mer prévoit de conduire une évaluation des impacts environnementaux des différentes phases d'exploitation dans l'objectif d'inscrire ces activités sous-marines dans un cadre respectueux des principes du développement durable.

En mai 2012, afin d'établir un point précis sur l'état actuel des connaissances scientifiques, la Commissaire générale au développement durable a manifesté par le biais d'un courrier adressé aux présidents du CNRS et de l'Ifremer, son souhait que ces organismes mènent conjointement une expertise scientifique collective sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Le Commissariat général au développement durable, le CNRS et l'Ifremer se sont accordés sur le cadrage suivant de cet exercice.

2. Objet et champ de l'expertise

Cette expertise scientifique collective porte sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Les granulats et les hydrocarbures fossiles sont exclus du champ de l'expertise : il s'agit de sujets techniques nécessitant des compétences différentes, dont, malgré leur intérêt, compte-tenu des délais et moyens nécessaires, l'étude ne pourra être envisagée qu'ultérieurement. L'expertise devrait donc être centrée sur les ressources riches en métaux (nodules polymétalliques, encroûtements riches en métaux, sulfures hydrothermaux) et la production d'hydrogène natif.

Cette expertise porte sur les grands fonds sous juridiction française ainsi que sur les zones situées au-delà des juridictions françaises.

Il s'agit d'abord de faire le point des connaissances scientifiques sur les écosystèmes et milieux concernés, leur fonctionnement, les services qu'ils nous assurent et les usages que la société peut en retirer dès à présent ou à l'avenir, ainsi que l'analyse économique de leurs valeurs. Puis il faut caractériser les impacts potentiels sur ces milieux, ces services et ces usages, et identifier les mesures nécessaires pour suivre l'évolution de ces environnements et contrôler les impacts des différentes phases d'exploitation.

Cela concerne notamment les zones à forts enjeux écologiques de type aire marine protégée (comme les sites Natura 2000 ou les parcs naturels marins) et les habitats et espèces protégées au titre d'une réglementation particulière.

Les questions auxquelles l'expertise scientifique doit pouvoir apporter des réponses sont détaillées ci-dessous.

L'expertise établira un état des lieux critique des connaissances scientifiques disponibles au plan européen et mondial, soulignera les domaines pour lesquels il est nécessaire de faire progresser les connaissances et envisagera les différents scénarios et options possibles afin d'améliorer les connaissances permettant de préserver ces milieux et écosystèmes.

Ce travail viendra en complément de la prospective réalisée par l'Ifremer sur les ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030. Il devrait permettre d'aider les demandeurs de permis de recherche ou d'exploitation dans leur réflexion lors de l'élaboration des études réglementaires relatives à l'incidence de leur activité sur l'environnement. De même, les différents services du ministère chargés d'examiner ces études pourront l'utiliser pour juger de la pertinence et de la complétude des documents produits. Par ailleurs, les méthodes d'évaluation des impacts développées dans cette expertise devraient permettre d'alimenter les réflexions pour la mise en œuvre de la future stratégie granulats élaborée par le Ministère et de son volet marin.

3. Questions et thématiques scientifiques

Le fil conducteur structurant le questionnement est celui retenu pour l'évaluation environnementale dans les directives «projet» et «plans et programmes» : état des lieux, nature des projets impactant, évaluation des impacts, mesures pour les éviter, réduire ou compenser. Ce cadre, très robuste à l'usage, permettra de faciliter le transfert des résultats aux praticiens.

1°) Les ressources minérales marines profondes (chef de file Ifremer)

L'expertise synthétisera des éléments de contexte sur les différentes ressources minérales maritimes, y compris les hydrocarbures fossiles et les granulats.

Les analyses seront centrées sur les ressources métalliques et l'hydrogène natif :

- Quelles sont les ressources minérales concernées ?
- Quelles sont celles qui font l'objet d'exploration et/ou d'exploitation ?
- Où sont-elles situées (localisation géographique, profondeur...) ?

2°) Les techniques existantes et en développement (chef de file CNRS)

L'expertise synthétisera des éléments de contexte sur les techniques (méthodes, matériels, ...) d'exploration et d'exploitation utilisées ou en développement par les entreprises françaises et internationales (notamment UE, USA, Japon, Australie, Russie, Chine) ; le retour d'expérience de ces techniques (ancienneté, résultats obtenus, difficultés rencontrées, quantité extraites...) ; et les entreprises impliquées (opérateurs et fournisseurs). L'expertise indiquera les principales différences avec l'exploitation des hydrocarbures fossiles et des granulats.

- Quelles analyses comparatives est-il possible de mener vis-à-vis des pressions exercées par ces différentes techniques sur le milieu marin et leurs impacts potentiels ?

3°) La biodiversité, les milieux et les écosystèmes (chef de file CNRS)

- Quels sont les écosystèmes, d'une part, et les milieux, d'autre part, potentiellement concernés par les différentes techniques d'exploration et d'exploitation des ressources minérales profondes en mer ? L'approche des milieux doit être entendue au sens large, incluant les flux énergétiques dans les milieux et les émissions de gaz à effet de serre liés. Quelles connaissances avons-nous de l'état des écosystèmes et des milieux, de leur
- fonctionnement et des processus dans lesquels ils sont engagés ? Comment s'intègrent les différents compartiments, temporalités et échelles ?

- Quels sont les effets potentiels à court, moyen et long termes de l'exploitation sur les écosystèmes et les milieux, tant à proximité des gisements qu'à plus grande distance ?
- Quelles sont les capacités de restauration des communautés, d'adaptabilité des espèces, de résilience des écosystèmes et des milieux ?
- Quels sont les éventuels risques naturels amplifiés ou suscités par l'exploitation (mouvement de terrain et autres risques telluriques) ?

4°) Les services et les usages (chef de file CNRS)

- Quels sont les services qu'assurent ces milieux et ces écosystèmes ? Quels sont les usages actuels ou potentiels qu'ils permettent ou à travers lesquels ils sont valorisés ?
- Quelle valeur économique peut-on attribuer à ces services dans une approche systémique ? Existe-t-il déjà des études ayant conduit à les monétariser ?
- Quels sont les effets potentiels des différentes techniques d'exploitation et d'exploration sur ces services et ces usages ? Peut-on établir des scénarios en y associant une analyse coûts-bénéfices ?

5°) Les mesures de préservation de l'environnement et de gestion des impacts (chef de file Ifremer)

- Quelles sont les différentes options pour préserver les écosystèmes et les milieux des différents compartiments, au cours de différentes phases d'exploitation et aux différentes échelles ?
- Quelles sont les différentes options pour prendre en compte les enjeux liés à des zones d'intérêt particulier comme les aires marines protégées, les habitats et espèces protégées au titre d'une réglementation particulière, ou des zones d'importance particulière vis-à-vis des ressources halieutiques ?
- Quelles sont les différentes options pour gérer et suivre les impacts, en précisant leur urgence et leur importance ?
- Quelles sont les mesures possibles pour compenser les impacts ?

6°) Les mesures d'approfondissement des connaissances (chef de file CNRS)

- Quelles sont les mesures d'explorations pertinentes pour mieux connaître l'état des milieux et des écosystèmes, leurs capacités de restauration et de résilience, leur valeur économique ? Quelles sont les mesures de suivi pertinentes pour évaluer les impacts des explorations et exploitations ?
- Quelles sont les modalités d'organisation possibles pour synthétiser, mutualiser et valoriser les connaissances acquises ?
- Quelles sont les compétences nationales et internationales mobilisables ? Quelles sont les recherches nouvelles ou les inflexions d'actions de recherche en cours à envisager ? Quels sont les approches méthodologiques, expérimentales, de simulations, ou technologiques les plus pertinentes ?

Pour les 5 premiers thèmes, l'un des organismes est désigné comme chef de file chargé de coordonner l'analyse des questions, qui sera réalisée en association étroite avec les 2 autres organismes.

Pour le 6^e thème, les bénéficiaires se coordonneront pour l'analyse des questions.

Annexe 2 : Méthodologie de l'ESCo et analyse des corpus de références

1. Méthodologie de l'ESCo

Cette expertise repose sur une collaboration entre le CNRS et l'Ifremer, organismes de recherche pour lesquels l'écologie marine, l'océanographie et les géosciences représentent des centres d'intérêts scientifiques majeurs. Elle obéit aux chartes d'expertise du CNRS et de l'Ifremer.

Les chartes de l'expertise scientifiques au CNRS et à l'Ifremer

L'équipe-projet de l'expertise respecte les principes de rigueur, de compétence, d'impartialité, de fiabilité, de transparence, de clarté et d'exhaustivité du rapport final requis par les Chartes de l'expertise du CNRS et de l'Ifremer :

- La rigueur et la compétence s'entendent par la sélection fine des experts sollicités pour la direction de la rédaction des différents chapitres de l'expertise. Tous travaillent sur des thématiques en lien avec les environnements marins profonds considérés et disposent d'une longue expérience sur ces sujets. Ils sont reconnus par leurs pairs pour leur implication, tant au niveau des publications que par leur participation aux campagnes ou dans les projets et rapports scientifiques internationaux sur le milieu marin. Leurs compétences et leurs relations complémentaires assurent la couverture de l'ensemble des questions posées à l'ESCo. Eux-mêmes ont choisi les contributeurs aux différents chapitres en fonction de leur domaine de spécialisation. Les membres de l'équipe de coordination, biologistes, sont également spécialistes ou ont reçu une formation sur les milieux marins profonds.
- L'impartialité a été imposée par l'engagement moral et légal des membres du comité de travail à ne pas s'impliquer dans des projets concurrents avant le terme de la réalisation de l'ESCo en 2014 et à ne pas divulguer les résultats obtenus.
- Compte-tenu de la masse d'information existante et de sa dispersion, nous ne pouvons pas promettre l'exhaustivité, mais, du moins, la représentativité des recherches est garantie par la constitution rigoureuse du corpus de références et par la fiabilité des sources documentaires, validées grâce aux compétences des membres de l'équipe-projet et des contributeurs.
- La transparence est apportée par la soumission de l'expertise au jugement de la communauté scientifique au cours d'un colloque de restitution, par le référencement pour chaque chapitre des publications et rapports utilisés, et par l'accessibilité de son contenu à un large public.

Méthodologie de l'ESCO

L'ESCO est un état des lieux des connaissances scientifiques :

- sur les ressources minérales, les environnements et les écosystèmes profonds susceptibles d'être impactés par l'exploration et l'exploitation de ces ressources minérales marines,
- sur les impacts potentiels ainsi que leurs conséquences économiques possibles.

Le travail réalisé aborde également la question des stratégies de préservation de ces environnements et écosystèmes et identifie les axes de recherche à développer et à soutenir pour affiner l'état de nos connaissances de ces environnements particuliers.

Ces connaissances scientifiques sont regroupées, analysées, critiquées et organisées afin de répondre de la manière la plus complète possible aux questions posées par les commanditaires. Ces questions sont définies dans un cahier des charges (cf. Annexe 1), après concertation entre le Ministère, le CNRS et l'Ifremer. Le cahier des charges identifie les problématiques scientifiques sous-jacentes aux questions initialement posées et détermine les limites de l'expertise.

Une équipe-projet, constituée de pilotes scientifiques et de coordinateurs, est chargée de la gestion de la rédaction du rapport et de son assemblage. Un comité de pilotage, constitué à l'initiative du MEDDE, suit l'avancée des travaux. Les experts rédigent une ou plusieurs contributions en mentionnant les références bibliographiques utilisées. Ces contributions sont rassemblées et organisées par les pilotes scientifiques pour chaque chapitre thématique. Les pilotes scientifiques assument la responsabilité scientifique des chapitres avec les experts.

Le rapport d'expertise, somme organisée de ces contributions, est diffusé sur les sites du CNRS et de l'Ifremer.

2. Analyse du corpus de références utilisé

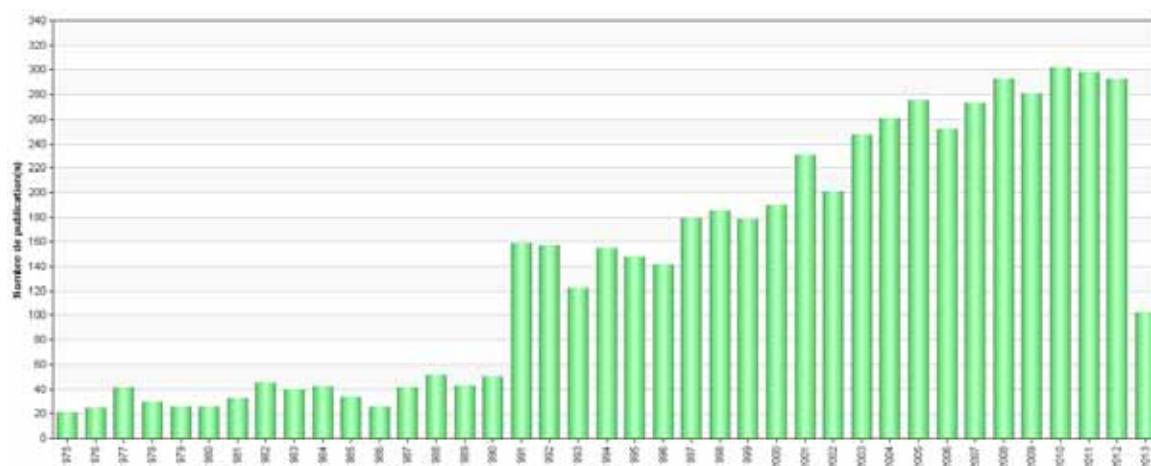
Le rapport d'expertise est étayé par un corpus total d'un peu plus de 13 900 références, tous chapitres confondus, composé essentiellement d'articles scientifiques et de rapports techniques. Ces références proviennent principalement de la somme de deux ensembles de références scientifiques constitués par l'Ifremer et le CNRS, à partir de la base de données Web of Science, et se répartissent comme suit :

- plus de 5 000 publications sur les différents types de ressources minérales et les techniques d'exploration et d'exploitation
- et plus de 4 000 articles scientifiques sur la biodiversité et la biologie des écosystèmes et milieux associés, ainsi que sur les impacts environnementaux des techniques d'exploration et d'exploitation sur ces écosystèmes et milieux.

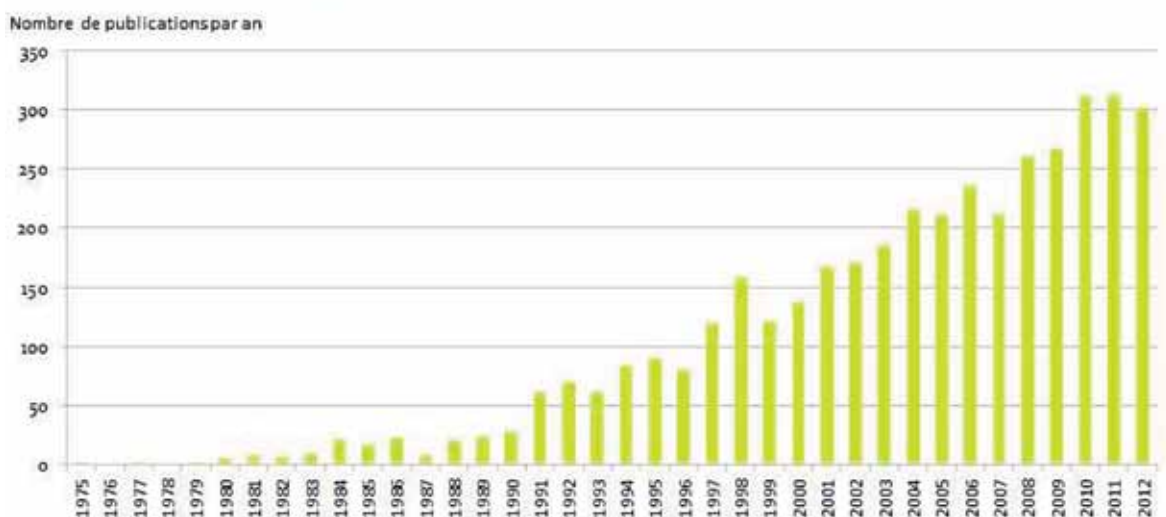
Le but de la démarche était de s'assurer d'avoir une vue d'ensemble des travaux réalisés à l'échelle internationale sur ces thématiques, au cœur du rapport d'expertise.

La comparaison des analyses bibliométriques de ces deux ensembles a permis de mettre en évidence que : **(1)** ces ensembles ne se recoupent que sur un très petit nombre d'articles, environ 200 ; **(2)** l'observation de l'évolution temporelle de la recherche sur les ressources minérales marines profonde a débuté dès les années 70 alors que la recherche sur les milieux marins profonds (dorsales, sites hydrothermaux, bassins d'arrière-arc, canyons et monts sous-marins) a commencé au début des années 80. La comparaison des deux ensembles met toutefois en évidence un réel essor de la recherche sur ces milieux à partir du début des années 90 pour les deux domaines thématiques.

Evolution chronologique du nombre de publications sur les ressources minérales profondes



Evolution chronologique du nombre de publications sur l'écologie des environnements marins profonds



Plus de 90 pays se sont intéressés aux ressources minérales marines profondes. Parmi ceux-ci, les Etats-Unis, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Chine, le Japon, le Canada, la Russie, l'Inde et l'Australie se distinguent particulièrement en termes de nombre de publications. Ce sont également ces mêmes pays, auxquels il faut ajouter le Portugal et l'Espagne, qui sont les plus impliqués dans l'étude de l'écologie des environnements associés ou susceptibles d'être associés à des ressources.

Dans le domaine de la biodiversité et de l'écologie des environnements, les pays mentionnés ont produits à eux seuls plus de 96% des articles parus jusqu'en mars 2013.

Les publications des années 80 traitent principalement des nodules. La comparaison avec la littérature grise de la même époque montre que cette dernière est plus importante en quantité. Cela peut s'expliquer par leur contenu, fortement lié au potentiel d'exploitation des nodules, avec une part importante de rapports et des conférences principalement axées sur de possibles méthodes d'exploitation. L'intérêt suscité par les nodules a stimulé les projets d'étude de la biodiversité et des écosystèmes associés, entraînant un pic de production d'articles sur la faune et ses réponses aux essais-pilotes d'exploitation minière sous-marine au début des années 2000.

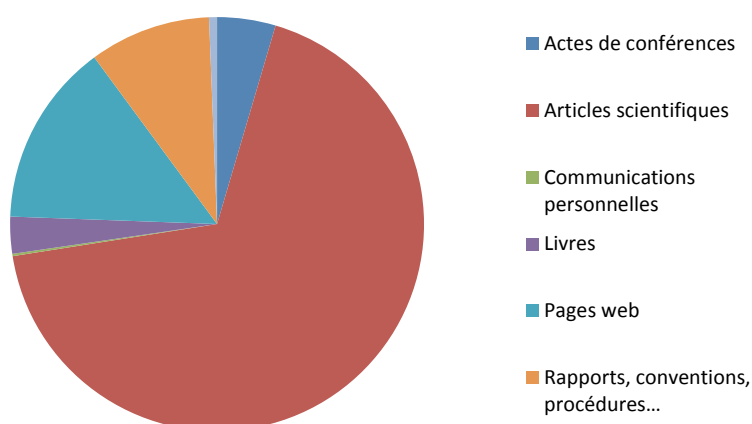
Les sites hydrothermaux, auxquels sont associés les sulfures, ont suscité un très fort engouement chez les scientifiques car, même s'ils présentent une biodiversité plus faible que les environnements sédimentaires, ils ont permis des découvertes majeures liées à leur fort taux d'endémisme, à leur productivité importante, ainsi qu'aux caractéristiques fascinantes des extrémophiles et des micro-organismes chimiosynthétiques. Ces sites ont un double intérêt industriel : les sulfures polymétalliques mais aussi la faune, source de nouvelles molécules. Pour ces différentes raisons, bien que les premières sources hydrothermales n'aient été découvertes qu'en 1977, les articles parus sur les sulfures représentent plus de la moitié des articles identifiés sur les ressources et environ les deux tiers des articles identifiés sur la biodiversité et l'écologie des environnements profonds.

Les encroûtements cobaltifères, principalement associés aux volcans et aux monts sous-marins sont un peu moins bien renseignés. Si plusieurs milliers de publications sur les monts sous-marins sont actuellement référencées (un peu plus de 4 500 dans Web of Science), car ils constituent des points chauds de biodiversité, seuls 600 articles, chapitres de livres et actes de conférence environ font référence spécifiquement aux monts sous-marins profonds.

Les flux naturels d'hydrogène, enfin, ont très peu été étudiés et les données disponibles à leur sujet sont parcellaires.

Cette étude de la littérature scientifique fait aussi ressortir, en raison d'un développement relativement récent de ces axes de recherches et des contraintes inhérentes à l'exploration de ces écosystèmes pourtant très intéressants scientifiquement et économiquement, de réels manques d'informations sur leur fonctionnement tant écologique que géologique.

De ces corpus bibliographiques, les experts ont extrait, analysé et assemblé les éléments pertinents pour éclairer les questions posées, par une sélection d'environ 2000 références considérées comme d'intérêt majeur.



Ce sont principalement des articles scientifiques. Avec les chapitres de livres scientifiques et les actes de conférences, colloques, symposia et séminaires, ils constituent les trois quarts du corpus cité.

AUTEURS DE L'EXPERTISE

Pilotes scientifiques

- Jérôme DYMENT, CNRS, UMR 7154 Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) (CNRS/PRES Sorbonne Paris Cité).
- François LALLIER, CNRS, UMR 7144 Adaptation et diversité en milieu marin (CNRS/UPMC).
- Sylvain LAMARE, CNRS, Direction de l'Institut écologie et environnement (INEE).
- Nadine LE BRIS, CNRS, UMR 8222 Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB) (CNRS/UPMC).
- Olivier ROUXEL, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie (LGM).
- Pierre-Marie SARRADIN, Ifremer, Unité de Recherche Etudes des Ecosystèmes Profonds.

Contributeurs

- Anne-Sophie ALIX, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
- Sophie ARNAUD-HAOND, Ifremer, Laboratoire Ressources Halieutiques de Sète.
- Claude AUGRIS, Ifremer, Laboratoire Environnements Sédimentaires.
- Florian BESSON, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
- Catherine BORREMANS, Ifremer, Service des Systèmes d'Informations Scientifiques pour la MER (SISMER).
- Cédric BOULART, CNRS, Laboratoire des mécanismes et transferts en géologie (LMTG – CNRS/Université Toulouse III/IRD).
- Jacqueline BOUTIN, CNRS, Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN - UMR 7159 CNRS/UPMC/IRD/MNHN).
- Gaëtan BURGAUD, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Biodiversité et Ecologie Microbienne.
- Nolwenn CALLAC, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Microbiologie des Environnements Extrêmes (UMR 6197 Ifremer/UBO/CNRS).
- Marie-Anne CAMBON-BONAVITA, Ifremer, Laboratoire de Microbiologie des Environnements Extrêmes, (UMR 6197 Ifremer/UBO/CNRS).
- Mathilde CANNAT, CNRS, Equipe de Géosciences Marines de l'UMR 7254, Institut de Physique du Globe.
- Frederico CARDIGOS, Université des Açores au Portugal.
- Antoine CARLIER, Ifremer, Laboratoire Ecologie benthique (Unité Dynamique des écosystèmes côtiers).
- Coralie COUMERT, CNRS, Direction de l'Institut écologie et environnement (INEE).
- Richard COSSON, CNRS-Université de Nantes, équipe «Mer, Molécules, Santé», EA2160 ISOMER (Université de Nantes).
- Yannis CUYPERS, Université Pierre et Marie-Curie, Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN - UMR 7159 CNRS/UPMC/IRD/MNHN).
- Stéphanie DUPRE, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
- Thierry DUTOIT, CNRS, équipe « Ingénierie de la restauration des patrimoines naturel et culturel», Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE, UMR CNRS 7263 - IRD 237, UAPV-AMU).
- Jérôme DYMENT, CNRS, UMR 7154 Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) (CNRS/PRES Sorbonne Paris Cité).
- Yves FOUQUET, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
- Françoise GAILL, CNRS.
- Arnaud GAILLOT, Ifremer, Service Cartographie, Traitement de données et Instrumentation, UR Géosciences Marines.
- Anne GODFROY, Ifremer, Responsable du Laboratoire de Microbiologie des Environnement Extrêmes, Directrice de l'UMR 6197 (Ifremer/CNRS/UBO).
- Stéphane HOURDEZ, CNRS, Équipe Génétique et Adaptations aux Milieux Extrêmes, UMR 7144 (UPMC/CNRS).

-
- Cécile KONN, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
 - Elie JARMACHE, Ifremer, Secrétariat Général de la Mer (SGMer) mis à disposition par l’Ifremer et membre de la Commission juridique et technique de l’Autorité Internationale des Fonds Marins.
 - Didier JOLLIVET, CNRS, équipe « Génétique de l’Adaptation en Milieux Extrêmes » UMR 7144 (UPMC/CNRS).
 - Kim JUNIPER, Ecole des sciences de la Terre et des sciences marine, Université de Victoria, Canada.
 - François LALLIER, CNRS, UMR 7144 Adaptation et diversité en milieu marin (CNRS/UPMC).
 - Sylvain LAMARE, CNRS, Direction de l’Institut écologie et environnement (INEE).
 - Franck LARTAUD, Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire d’Ecogéochimie des Environnements Benthiques (CNRS/UPMC).
 - Marc LE BOULLUEC, Ifremer, Laboratoire « Comportement des Structures en Mer », Unité « Recherches et Développements Technologiques ».
 - Nadine LE BRIS, CNRS, UMR 8222 Laboratoire d’Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB) (CNRS/UPMC).
 - Harold LEVREL, Ifremer, UMR AMURE, Département Economie Maritime.
 - Marcia MAÏA, CNRS, UMR 6538 CNRS/Université de Bretagne Occidentale Domaines Océaniques, de l’Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM).
 - Marjolaine MATABOS, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Lenaïck MENOT, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Marie MORINEAUX, Ifremer.
 - Hélène ONDRÉAS, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
 - Ewan PELLETER, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
 - Sylvain PIOCH, Université de Montpellier 3, UMR 5175 CEFE (CNRS-UM3).
 - Benjamin PONGE, Agence des aires marines protégées, Service Protection et usages du milieu marin.
 - Marie PORTAIL, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Florence PRADILLON, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Walter ROEST, Ifremer, Laboratoire Géophysique et Géodynamique.
 - Olivier ROUXEL, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie (LGM).
 - Philippe SAGET, Ifremer, Laboratoire Géochimie et Métallogénie.
 - Jean-Michel SALLES, CNRS, Laboratoire Montpellierain d’Economie Théorique et Appliquée (LAMETA - UMR5474).
 - Sarah SAMADI, Museum National d’Histoire Naturelle, Département Systématique et Evolution.
 - Pierre-Marie SARRADIN, Ifremer, Unité de Recherche Etudes des Ecosystèmes Profonds.
 - Jozée SARRAZIN, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Carla SCALABRIN, Ifremer, Laboratoire Géophysique et Géodynamique.
 - Laure SIMPLET, Ifremer, Laboratoire Environnements Sédimentaires.
 - Eric THIEBAUT, CNRS-Université Pierre et Marie Curie, Unité Adaptation et diversité en milieu marin UMR 7144 (CNRS/UPMC).
 - Julie TOUROLLE, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.
 - Daniela ZEPPILLI, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.

Cette liste n’inclut pas les chercheurs qui ont pu être sollicités (par l’un des experts ci-dessus) pour contribuer ponctuellement à la rédaction d’une section du rapport. Ces chercheurs sont cités dans les contributions écrites auxquelles ils ont apporté leur concours.

Conduite du projet

- Sylvain LAMARE, CNRS, Direction de l’Institut écologie et environnement (INEE).
- Coralie COUMERT, CNRS, Direction de l’Institut écologie et environnement (INEE).
- Marie MORINEAUX, Ifremer.
- Julie TOUROLLE, Ifremer, Laboratoire Environnement Profond.

Documentation

- Coralie COUMERT, CNRS, Direction de l’Institut écologie et environnement (INEE).
- Marie MORINEAUX, Ifremer.
- Annick SALAÜN, Ifremer, Bibliothèque La Pérouse (Centre de Documentation sur la Mer, Plouzané).

Crédits photographiques de la première de couverture, de gauche à droite et de haut en bas

- Un peuplement de modioles, *Bathymodiolus thermophilus*, sur le site 9°50'N de la dorsale Est-Pacifique à 2400m de fond. L'établissement d'une moulière s'accompagne d'un cortège d'espèces, visibles (comme des crabes, vers et gastéropodes) ou non visibles (méiofaune et compartiment microbien).
Ifremer / Campagne MESCAL 2010
- Les concombres de mer sont communs sur les zones à nodules du Pacifique nord équatorial, tel ce *Psychropotes longicauda* par 5500 mètres de profondeur.
Ifremer - Nautille / Campagne Nodinaut 2004
- Alvinellacine, premier peptide antibiotique isolé à partir du ver extrémophile *Alvinella pompejana*, vivant près des cheminées hydrothermales.
Aurélié Tasiemski. Figure tirée de l'article : Tasiemski A, Jung S, Boidin-Wichlacz C, Jollivet D, Cuvillier-Hot V, et al. (2014) Characterization and Function of the First Antibiotic Isolated from a Vent Organism: The Extremophile Metazoan *Alvinella pompejana*. PLoS ONE 9(4): e95737.
- Cette grande anémone de mer, *Bolocerooides daphnae*, dont les tentacules peuvent atteindre plusieurs mètres, s'installe volontiers à la périphérie des sites hydrothermaux actifs de la dorsale Est-Pacifique.
Ifremer / Campagne MESCAL 2010
- Les échinodermes, comme ici une étoile de mer, une ophiure et une comatule, sont abondants sur les basaltes et les sulfures autour des sites actifs de la dorsale Est-Pacifique.
Ifremer - Virginie Tilot / Campagne Parisub 2010
- L'exploration d'un site commence par l'établissement d'une carte bathymétrique de haute précision, acquise par submersible près du fond. Sur cette photo, la carte du site Lucky Strike de la dorsale Médio-Atlantique, acquise avec le ROV Victor durant les campagnes MoMarSat, est utilisée pour préparer les plongées durant la campagne BioBaz en 2013.
Ifremer - Sébastien Duperron / Campagne BIOBAZ 2013
- Mise à l'eau du submersible habité Nautille.
Ifremer / Campagne Futuna3 2012
- Une chimère, *Hydrolagus sp.*, espèce cousine des requins, et visiteur fréquent des sites hydrothermaux de la dorsale médio-Atlantique, ici sur le site de Lucky Strike par 1700 m de fond.
Ifremer / Campagne BIOBAZ 2013
- Fumeur noir du site hydrothermal Rainbow, dorsale Médio-Atlantique (Atlantique nord)
Ifremer - Victor / Campagne MOMAR08 Leg2 2008

La France dispose d'une capacité importante d'exploration et d'accès à de nouvelles ressources minérales dans les grands fonds océaniques, qui sont associées à des écosystèmes spécifiques, dont certains sont identifiés comme des milieux exceptionnels de biodiversité au plan mondial. Compte tenu des impacts potentiels d'activités d'exploitation sur ces écosystèmes encore très mal connus, le ministère chargé de l'Écologie et le ministère chargé de la Recherche ont confié au CNRS et à l'Ifremer la responsabilité de réaliser une expertise sur ce sujet.

Cette expertise scientifique collective sur les impacts environnementaux de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes établit une synthèse des connaissances scientifiques disponibles sur le sujet au plan international et identifie les verrous scientifiques et les activités de recherche et de développement à engager pour les comprendre et les lever.

Destinés à l'ensemble des acteurs du monde de la mer - élus, administrations, chercheurs, étudiants, opérateurs industriels et technologiques, ONG -, le rapport de l'expertise et sa synthèse ont vocation à constituer une base de travail partagée pour orienter les travaux scientifiques et conduire l'exploration et l'exploitation des ressources minérales profondes dans une perspective de gestion sobre des ressources et de développement durable.

