

(LOGO)

Autorité internationale des fonds marins

(Traduction du Greffe)

Le 15 novembre 2010

Cher Monsieur Gautier,

J'ai l'honneur de me référer à votre lettre du 13 octobre 2010 relative à l'Affaire concernant les Responsabilités et obligations des Etats qui patronnent des personnes et des entités dans le cadre d'activités menées dans la Zone internationale des fonds marins (Demande d'avis consultatif soumise à la Chambre pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins).

Comme l'a demandé le Président de la Chambre pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins, j'ai l'honneur de joindre à la présente un dossier préparé par le Secrétariat et qui contient des informations sur les différentes phases inhérentes à l'exploration et l'exploitation de ressources dans la Zone. Ce dossier contient un résumé des informations sur les méthodes et les technologies employées pour l'exploration et pour l'exploitation des nodules polymétalliques et des sulfures polymétalliques ; il a été préparé à partir de plusieurs sources différentes, y compris les comptes-rendus des ateliers scientifiques et techniques internationaux organisés par l'Autorité. Des copies de ces comptes-rendus sont également jointes pour référence à la copie papier de la présente lettre.

Veillez agréer, cher Monsieur Gautier, les assurances de ma très haute considération.

(signé)

Michael W. Lodge

Conseiller juridique

M. Philippe Gautier
Greffier
Tribunal international du droit de la mer
Am Internationalen Seegerichtshof 1
22609 Hambourg
Allemagne

(Coordonnées de l'Autorité)

(Traduction du Greffe)

TRIBUNAL INTERNATIONAL DU DROIT DE LA MER

(Affaire n° 17)

**RESPONSABILITÉS ET OBLIGATIONS DES ETATS QUI PATRONNENT
DES PERSONNES ET ENTITÉS DANS LE CADRE D'ACTIVITÉS MENÉES
DANS LA ZONE INTERNATIONALE DES FONDS MARINS**

**RENSEIGNEMENTS SUCCINCTS CONCERNANT LES DIVERSES PHASES
DE L'EXPLORATION ET DE L'EXPLOITATION DES NODULES
POLYMÉTALLIQUES ET DES SULFURES POLYMÉTALLIQUES DANS LA
ZONE**

Note d'information établie par le Secrétariat de l'Autorité internationale des fonds marins comme suite à la demande du Président de la Chambre pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins.

RENSEIGNEMENTS SUCCINCTS CONCERNANT LES DIVERSES PHASES DE L'EXPLORATION ET DE L'EXPLOITATION DES NODULES POLYMÉTALLIQUES ET DES SULFURES POLYMÉTALLIQUES DANS LA ZONE

Note d'information établie par le Secrétariat de l'Autorité internationale des fonds marins suite à la demande du Président de la Chambre pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins

1. Le présent document a été établi suite à la demande du Président de la Chambre pour le règlement des différends relatifs aux fonds marins, tendant à ce que soient communiqués des renseignements sur les différentes phases, (telles que la collecte des ressources, le transport des ressources à la surface, le traitement initial ...) du processus d'exploration et d'exploitation des ressources [nodules polymétalliques et sulfures polymétalliques] dans la Zone; cette demande a été transmise au Conseiller juridique de l'autorité par le Greffier du Tribunal, dans une lettre datée du 13 octobre 2010. Le présent document contient un résumé des renseignements disponibles sur les différentes phases de l'exploration et de l'exploitation des nodules polymétalliques et des sulfures polymétalliques, tirés d'un certain nombre de sources différentes, dont les comptes rendus des débats des ateliers scientifiques et techniques internationaux organisés par l'Autorité.

2. Trois phases différentes de la mise en valeur des ressources minérales des fonds marins sont identifiées dans la partie XI de la Convention et l'Accord de 1994, à savoir « la prospection », « l'exploration » et « l'exploitation ». Bien que ces termes ne soient définis ni dans la Convention, ni dans l'Accord de 1994, ils le sont dans les règlements relatifs à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques et des sulfures polymétalliques adoptés par l'Autorité en 2000 et 2010, respectivement.¹ Dans chaque cas, les définitions sont analogues et se lisent comme suit :

On entend par « prospection » la recherche, sans droits exclusifs, de gisements de [nodules polymétalliques] [sulfures polymétalliques] dans la Zone, notamment l'évaluation de la composition, de la taille et de la répartition des gisements de [nodules polymétalliques] [sulfures polymétalliques] et de leur valeur économique;

On entend par « exploration » la recherche, faisant l'objet de droits exclusifs, de gisements de [nodules polymétalliques] [sulfures polymétalliques] dans la Zone, l'analyse de ces gisements, l'utilisation et l'essai des procédés et du matériel d'extraction, des installations de traitement et des systèmes de transport, et l'établissement d'études des facteurs environnementaux, techniques, économiques, commerciaux et autres à prendre en considération dans l'exploitation;

On entend par « exploitation » la collecte à des fins commerciales de [nodules polymétalliques] [sulfures polymétalliques] dans la Zone et l'extraction des minéraux qu'ils contiennent,

¹ Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques dans la Zone, ISBA/6/A/18 (2000); Règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques dans la Zone, ISBA/16/A/12/Rev.1. (2010).

notamment la construction et l'exploitation de systèmes d'extraction minière, de traitement et de transport pour la production et la vente de minéraux;

3. La présente note a été établie en gardant ces définitions à l'esprit.

A. LES NODULES POLYMÉTALLIQUES

Caractéristiques

4. Les nodules polymétalliques reposent sur les grands fonds marins, en couche unique. Leur forme et leur taille sont variables. Un nodule moyen est légèrement ellipsoïdal et a 2,5 à 5 cm de diamètre; toutefois, le diamètre des nodules peut être compris entre quelques millimètres et un grand nombre de centimètres. Les nodules sont poreux, l'eau représentant entre le tiers et la moitié de leur poids. Ils peuvent être broyés facilement en raison de leur porosité. Plutôt que de creuser le sol pour récupérer le minerai, comme on le fait généralement dans les opérations d'extraction minière terrestre, il faut balayer ou draguer les nodules. L'opération doit porter sur un vaste secteur des fonds marins, si l'on souhaite recueillir un grand nombre de nodules.

5. Le milieu dans lequel se trouvent les nodules polymétalliques se caractérise par la morphologie des fonds marins, la profondeur des océans, l'état de la colonne d'eau, les conditions à la surface de l'eau et la distance du rivage. Le milieu détermine les conditions de l'exploitation minière. Les fonds marins où l'on trouve des nodules ne sont pas une plaine sans particularité. Les montages, les dorsales, les collines, les escarpements, les cuvettes, les affleurements de basalte et les gros blocs de pierre abondent. L'altitude des montagnes marines est comprise entre 800 et 1 500 m. Les collines abyssales peuvent avoir de 30 à 300 m de hauteur, de 6 à 15 km de longueur et de 2 à 5 km de largeur. Les cuvettes peuvent avoir de 30 à 50 m de profondeur, 250 m de largeur et 2 km de longueur. La pente de certaines de ces cuvettes peut être supérieure à 30 degrés. Les sédiments sur lesquels les nodules reposent sont à grain fin et du type fluide plastique de Bingham.² La résistance au cisaillement de la couche sédimentaire varie selon les zones.

6. Les nodules polymétalliques contiennent divers métaux, parmi lesquels on considère que le nickel, le cuivre, le cobalt et le manganèse (et des traces de lanthane, de cérium, de néodyme, d'yttrium, de samarium et de gadolinium) présentent un intérêt commercial. La teneur des nodules (c'est à dire la quantité des divers métaux présentant un intérêt commercial est exprimée en pourcentage du poids de nodules secs), et l'abondance des nodules, généralement exprimée en kg/m², (c'est à dire le poids de nodules humides par unité de surface des fonds marins) déterminent la quantité de métaux contenue dans les nodules dans une zone donnée. La teneur des gisements pouvant présenter un intérêt économique est de l'ordre de 1,1 à 1,6 pour cent pour le nickel, 0,9 à 1,2 pour cent pour le cuivre, 0,2 à 0,3 pour cent pour le cobalt et 25 à 30 pour cent pour le manganèse. L'abondance des nodules est de l'ordre de 5 à 15 kg/m². Aussi bien la teneur que l'abondance varient considérablement selon les zones des fonds marins et également dans une zone donnée. On a pu constater la présence de nodules polymétalliques dans des eaux relativement peu profondes. Toutefois, les gisements de nodules

² Un **fluide plastique de Bingham** est un plastique visqueux qui se comporte comme un organisme rigide sous une faible contrainte mais circule comme un fluide visqueux quand la contrainte est élevée. Il porte le nom de Eugene C. Bingham, qui en a proposé la formule mathématique. [E.C. Bingham, (1916) « U.S. Bureau of Standards Bulletin », 13, 309-353 « An Investigation of the Laws of Plastic Flow » <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/268641>

présentant un intérêt commercial, ayant la teneur et l'abondance requises, se trouvent uniquement dans les grands fonds marins, à des profondeurs comprises entre 3 000 et 6 000 m.

7. Pour qu'une entreprise d'extraction de nodules soit économiquement viable, on estime généralement qu'il convient d'exploiter entre 1,4 et 9 millions de tonnes de nodules humides chaque année pendant 20 à 30 ans. Le chiffre le plus généralement cité est de 3 millions de tonnes de nodules secs, ce qui équivaut à environ 4,5 millions de tonnes de nodules humides. Si l'on suppose qu'il faut maintenir un taux annuel de production de 4,5 millions de tonnes de nodules humides pendant 20 ans, les zones exploitables devraient contenir plus de 90 millions de tonnes de nodules humides, car il n'est pas possible de récupérer tous les nodules. Si l'on part de l'hypothèse la plus défavorable, selon laquelle le taux de récupération est de 5 kg de nodules par mètre carré, il faudrait exploiter 900 kilomètres carrés de fonds marins par an, soit 18 000 kilomètres carrés de fonds marins pendant 20 ans.

8. Il n'existe pas actuellement de technique commercialement prouvée d'exploitation des nodules polymétalliques dans les grands fonds marins. À ce jour, on a cherché à concevoir des programmes intégrés visant à réduire graduellement l'incertitude relative aux facteurs géologiques et techniques. En fin de compte, on pourra prendre une décision sur l'exploitation économique, compte tenu d'un risque acceptable, sur la base d'une évaluation des facteurs économiques et sociopolitiques. La séquence des activités est généralement dénommée la séquence « prospection/exploration ».

La prospection

9. Pendant la phase de prospection, l'objectif est d'évaluer les données et l'information existantes quant à la présence de minerai et au milieu dans lequel se trouve le gisement, pour déterminer la viabilité commerciale. Ces données et renseignements sont obtenus essentiellement au moyen de campagnes océanographiques et d'autres activités réalisées par des établissements universitaires et des organismes publics et portent sur les caractéristiques de la surface de la mer et de la colonne d'eau, telles que vent, vagues et houle. Il sera possible, à partir de ces données, de parvenir par exemple à des conclusions générales concernant la variabilité géographique et temporelle des tempêtes et des ouragans.

10. Les données du domaine public peuvent signaler les régions qui méritent des enquêtes plus approfondies. Ainsi, il ressort des données du domaine public disponibles au début des années 1970 que la Zone Clarion-Clipperton, au nord-est de l'océan Pacifique, est la région la plus prometteuse s'agissant des nodules polymétalliques, indication étayée par le fait que sept des huit contrats d'exploration conclus avec l'Autorité, ainsi que les sept secteurs réservés correspondants, sont situés dans cette région.

11. La disponibilité et l'utilité des données relatives à la macrotopographie, qui sont dans le domaine public, varient d'une région à l'autre, mais l'on estime que pour des régions spécifiques, les données concernant les grandes caractéristiques topographiques, comme les zones de fracture, les collines marines, les dorsales et les cuvettes, sont suffisantes. Les données publiques quant à la microtopographie et aux obstacles sont rares; l'emploi de sonars à balayage latéral à haute résolution et d'autres techniques de cartographie des fonds marins pourront permettre de disposer de davantage de données publiques à ce sujet. Ces appareils peuvent être remorqués par des bateaux ou installés à bord

de véhicules sous-marins autonomes.³ Dans le cadre d'activités cartographiques, la plateforme plus stable de ces véhicules permet d'obtenir des cartes à plus haute résolution.

12. Une fois que les données existantes ont été évaluées et que de vastes régions méritant de faire l'objet d'études ont été identifiées, on procède, dans le cadre de la prospection, à l'établissement de levés à résolution plus élevée dans les régions les plus intéressantes. L'objectif est de sélectionner des zones cibles plus petites dans les grandes régions. Ces zones sont examinées plus en détail pour établir une importante base de données, ce qui permet de prendre des décisions avec une plus grande certitude. L'objectif final est d'affiner les données relatives à la zone cible (certaines zones cibles sont écartées, d'autres sont retenues pour examen futur et les zones prometteuses feront l'objet de recherches plus approfondies). Il convient de noter qu'à cette étape, on cherche à obtenir, dans un secteur particulier, des données indicatives plutôt que détaillées au sujet des caractéristiques des nodules et de la morphologie des fonds marins. Des sondeurs acoustiques de précision permettent d'obtenir des données qui serviront à éliminer les zones présentant des caractéristiques macrotopographiques. Les levés sont effectués au moyen d'engins remorqués qui peuvent être équipés d'appareils photo et de caméras vidéo de manière à disposer d'images fixes et d'images mobiles des fonds marins à des vitesses modérées, montrant la couche de nodules et sa densité. D'autres systèmes de détection peuvent être ajoutés au dispositif remorqué, selon que de besoin, pour en accroître les capacités. Les emplacements où l'échantillonnage est effectué peuvent être aléatoires et largement dispersés. Il n'est pas nécessaire de planifier soigneusement l'orientation de la trajectoire du navire, mais les données relatives à la navigation doivent être extrêmement précises et consignées pour référence. Le matériel et les techniques utilisés à cette étape comprennent généralement du matériel pour l'échantillonnage des fonds et les analyses acoustiques et visuelles. En général, ces appareils servent à effectuer les activités ci-après :

- (a) Observation gravimétrique et magnétométrique;
- (b) Profilage et imagerie acoustique et électromagnétique des fonds marins et des couches inférieures, sans emploi d'explosifs;
- (c) Échantillonnage limité des minéraux, carottage, grappillage ou ramassage par panier;
- (d) Échantillonnage de l'eau et échantillonnage biologique;
- (e) Observation et mesures météorologiques, y compris le paramétrage des instruments;
- (f) Travaux océanographiques, y compris observation et mesures hydrographiques;
- (g) Échantillonnage par caisse à carottes, carotte de petit diamètre ou grappillage en vue d'établir les propriétés géologiques ou géotechniques des fonds marins;
- (h) Observation et mesures par télévision et photographie;
- (i) Dosage et analyse des minerais à bord du navire;

³ Les véhicules sous-marins autonomes entièrement submersibles peuvent fonctionner sous la surface des mers sans connexion physique ou communication avec une station de contrôle. Ils sont programmés pour exécuter une mission et disposent d'une faible mesure d'« intelligence », c'est-à-dire l'aptitude à prendre des décisions simples. Ils sont adaptés à des missions sous l'eau, concernant par exemple l'établissement de levés des fonds marins, dans le cadre desquelles le véhicule doit effectuer de longues distances à des vitesses relativement lentes – comprises entre 1 et 2,5 mètres/seconde.

- (j) Positionnement, entre autres, au moyen de transpondeurs de fond et de balises de surface et de subsurface, faisant l'objet d'avis aux navigateurs.

L'exploration

13. Pendant l'exploration, des levés supplémentaires sont effectués dans des zones cibles retenues afin de disposer de données suffisantes pour identifier les gisements de nodules présentant un intérêt économique probable. L'évaluation de ces données affine les zones cibles restantes, ce qui permettra aux initiatives futures d'exploration d'être axées sur les gisements de nodules les plus prometteurs du point de vue économique. À l'étape suivante, ces gisements font l'objet d'enquêtes plus approfondies en vue de délimiter ceux qui sont viables économiquement. Au stade final de l'exploration, l'établissement de levés permet de disposer de données suffisantes pour évaluer les gisements économiquement viables, délimiter le site minier et établir un projet de plan d'extraction pour la période initiale d'exploitation commerciale. Il sera également procédé à l'essai des méthodes d'exploitation minière.

14. Pour atteindre les objectifs souhaités en matière d'exploration, il convient de recueillir systématiquement d'importantes quantités de données à partir de vastes superficies du fond des océans et de les évaluer avec efficacité. Étant donné qu'il est impossible de prélever des échantillons sur chaque mètre carré d'une zone cible retenue et en raison des variations sur le plan de la teneur et de l'abondance, les activités d'exploration sont fondées sur des méthodes statistiques, plus particulièrement géostatistiques, de traitement des données et les décisions concernant les mesures à prendre sont fondées sur les probabilités. Il importe entre autres de recueillir des données dans les domaines ci-après :

- (a) Géologie
- (b) Chimie
- (c) Physique
- (d) Biologie
- (e) Météorologie et climatologie
- (f) Ingénierie
- (g) Navigation

15. L'exploration ciblée va de l'établissement de levées concernant des mailles larges à des levés concernant des zones de maillage plus fin, de sorte à obtenir suffisamment de données concernant les échantillons prélevés dans les fonds marins et la morphologie des fonds marins pour pouvoir délimiter et évaluer un gisement économiquement viable et en fin de compte délimiter un site minier et établir un plan d'extraction minière. Dans l'exploration ciblée des zones présentant un intérêt, l'approche généralement suivie en matière de conception de l'échantillonnage, qui suit la pratique terrestre, consiste à diviser les zones de maillage en cellules carrées. Généralement, on estime qu'il est raisonnable qu'au moins 100 cellules contiennent chacune de 3 à 10 échantillons discrets. Toutefois, le nombre des cellules et le nombre des échantillons prélevés dans chacune d'entre elles sont fonction des décisions prises au sujet des variations en teneur et en abondance et de l'exactitude escomptée des méthodes statistiques. L'analyse statistique des données recueillies dans chaque cellule est réalisée sur la base de l'hypothèse que les échantillons sont représentatifs d'une cellule donnée, pour un niveau donné de fiabilité. Toutes les cellules d'une zone explorée font alors l'objet de traitements statistiques plus approfondis aux fins d'activités d'exploration immédiates et futures.

16. Les techniques nécessaires pour achever la phase d'exploration d'un site minier potentiel sont analogues à celles utilisées pendant la prospection. Étant donné que cette phase consiste essentiellement à établir les données présentant la résolution la plus élevée pour la zone étudiée, il faut disposer de systèmes perfectionnés. Les véhicules téléguidés⁴ et les véhicules habités⁵ complètent le matériel déjà utilisé et permettent d'obtenir les données présentant le degré de résolution le plus élevé pendant la phase d'exploration.

Techniques utilisées pour le ramassage et le traitement préliminaire en mer des nodules polymétalliques

17. La recherche et l'élaboration des techniques d'extraction minière des nodules polymétalliques commencent par l'examen de la gamme des techniques disponibles et l'évaluation de la mesure dans laquelle elles peuvent être adaptées. Il convient d'employer une approche d'ingénierie des systèmes, puisque la modification d'un sous-système ou d'un élément a des incidences sur les autres sous-systèmes ou éléments et, par conséquent, sur l'extraction minière tout entière. Pour minimiser les frais de développement, il est vraisemblable que les techniques d'extraction minière des nodules polymétalliques dans les grands fonds marins seront élaborées graduellement par la modification des techniques disponibles et l'emploi de sous-systèmes et d'appareils grand public actuellement disponibles. Il faudra également mettre au point de nouvelles techniques, sous-systèmes et éléments.

18. Parmi les techniques disponibles, celle qui est sur le plan fonctionnel la plus analogue au prélèvement des nodules, est celle utilisée pour le dragage en mer. À l'heure actuelle, la technique du dragage est utilisée aux fins du transport de matières prélevées dans les fonds marins à une profondeur maximale de 160 mètres. Or, l'extraction des nodules est effectuée à des profondeurs supérieures de plus d'un ordre de grandeur. La technique du forage en mer fournit également des enseignements et des possibilités d'adaptation. Les plateformes fixes opèrent à des profondeurs allant jusqu'à 535 mètres et les plateformes à ligne tendue peuvent fonctionner à des profondeurs allant jusqu'à 2 000 mètres. On est encore très loin des profondeurs de l'extraction minière des grands fonds marins. Toutefois, ces techniques peuvent être appliquées à l'extraction minière dans les grands fonds marins : tel est le cas des plateformes en surface, des conduites et des matériaux, de la conception structurelle et des méthodes employées s'agissant de la situation en surface, du maintien en position et de la logistique. Les navires de forage ont opéré à des profondeurs et avec des longueurs de conduites comparables à ce qui serait nécessaire pour l'extraction minière dans les grands fonds marins. L'exploitation minière doit être mobile, capable de supporter des forces dynamiques sur les conduites et le collecteur; le collecteur doit pouvoir supporter des conditions beaucoup plus variées au fond des mers et la coordination entre le minéralier et le navire de transport doit être maintenue. Les tempêtes en haute mer sont fréquentes et des événements extrêmes peuvent survenir occasionnellement.

⁴ Les véhicules téléguidés sont des plateformes non habitées qui consistent essentiellement en un robot submersible relié à un navire-base capable d'appuyer divers dispositifs nécessaires pour mener à bien les tâches d'enquête. Le véhicule téléguidé est piloté par une personne à bord du navire-base, qui se trouve dans une salle de contrôle d'équipée d'écrans, d'ordinateurs, de pupitres de commande, d'enregistreurs et de systèmes d'alimentation en énergie.

⁵ Les véhicules habités ou submersibles sont des véhicules sans connexion avec le navire-base qui permettent une intervention humaine directe dans le site exploré. En plus d'employer les appareils utilisés à bord des véhicules téléguidés, un véhicule habité doit disposer d'équipements de survie et de moyens de communications acoustiques.

19. Une fois les techniques disponibles évaluées, on déterminera les lacunes qu'il faudra combler au moyen de techniques novatrices. Il faut tout d'abord concevoir théoriquement un nouveau collecteur, composé de systèmes auxiliaires et d'éléments mutuellement reliés, dont certains sont nouveaux. Des études techniques préliminaires sont effectuées sur une large gamme de modèles théoriques concernant l'intégralité du système et les nouveaux systèmes auxiliaires ou éléments afin de sélectionner ceux qui semblent prometteurs. Les modèles retenus sont ensuite affinés; un prototype ou un élément, système auxiliaire ou système pilote à échelle est fabriqué ou intégré et mis à l'essai. C'est en fonction de l'évaluation des études conceptuelles qu'on pourra mettre à l'essai les éléments dans un milieu marin simulé, en laboratoire, en eau peu profonde ou dans les grands fonds. De nouvelles étapes de perfectionnement de la conception et d'essais seront réalisées en fonction des résultats des essais pilotes. Il faudra effectuer des essais à grande échelle du prototype dans les grands fonds pour déterminer la conception retenue et passer à la fabrication à l'échelle commerciale.

20. La phase de l'exploration présente une caractéristique fondamentale, à savoir que les activités géologiques et techniques sont réalisées de manière interactive. Chaque phase du processus de recherche-développement technologique identifie de nouveaux besoins de données et les résultats de chaque activité géologique sont utilisés au cours des étapes ultérieures du processus de recherche-développement technique et inversement. Ainsi, les résultats des levés de reconnaissance permettent de préciser les caractéristiques du minerai et du milieu du gisement; ces données sont utilisées pour affiner les études théoriques, qui à leur tour influent sur le type d'informations à recueillir pendant les activités d'exploration de la zone cible. Sur la base des informations recueillies dans le cadre d'activités d'exploration de la zone cible, on détermine les techniques et le matériel susceptibles de fonctionner dans un gisement qui pourrait être viable économiquement et les méthodes de traitement les mieux adaptées au minerai.

21. Les concepteurs des techniques d'extraction minière des nodules polymétalliques doivent répondre à une question fondamentale, comment ramasser les nodules au fond des océans et les remonter à l'installation en surface (un navire, le plus vraisemblablement). On a étudié trois méthodes fondamentales d'extraction minière : ramasser les nodules au moyen d'un collecteur-engin de dragage et les remonter par une conduite; ramasser les nodules au moyen de godets et remonter les godets au moyen d'une corde ou d'un câble; ramasser les nodules au moyen d'un collecteur-engin de dragage et faire remonter le collecteur grâce à sa propre flottabilité. Trois modes d'extraction, fondés sur ces trois possibilités, ont fait l'objet d'études et de recherches. Il s'agit du système hydraulique, du système à chaîne continue de godets et du système modulaire à navette. Deux de ces systèmes, le système à chaîne continue de godets et le système à navette ont été abandonnés ou mis de côté. Le système d'extraction hydraulique et ses diverses configurations constituent les techniques actuellement les plus poursuivies.

22. Une conduite (tube goulotte), accrochée au minéralier, est descendue jusqu'à proximité du fond de l'océan. Un collecteur est relié à l'extrémité de la conduite au moyen d'un tuyau flexible, en vue d'isoler le mouvement résultant des conditions de surface. Le collecteur ramasse les nodules puis les introduit dans la conduite. Les nodules devront préalablement être grossièrement concassés s'ils sont trop gros. Ils sont ensuite aspirés dans la conduite au moyen de pompes hydrauliques fixées sur la conduite ou bien aspirés par injection d'air comprimé.

Le collecteur

23. Le collecteur est le sous-système le plus spécifique et le plus complexe des opérations d'extraction minière. Les collecteurs ont fait l'objet de plus de 60 brevets au fil des ans et plusieurs options ont été mises au point et à l'essai, avec des succès divers. La tâche essentielle du collecteur est de ramasser les nodules sur les fonds marins, de les concentrer et de les introduire dans l'engin de remontée. Il doit être en mesure d'accomplir trois groupes de fonctions :

- (a) Ramasser et traiter les minerais;
- (b) Se déplacer sur les fonds marins;
- (c) Permettre de suivre son déplacement et son fonctionnement.

24. Étant donné que les nodules diffèrent par la taille et par la forme, l'appareil de ramassage doit être conçu pour pouvoir ramasser un nodule moyen et éliminer les objets dont la taille ne correspond pas à la gamme retenue. Ce mécanisme doit être également conçu de manière à pouvoir séparer les sédiments des nodules. Pour ce qui est du traitement des matières, on a conçu deux modèles fondamentaux d'appareils : un « collecteur mécanique » qui ramasse les nodules mécaniquement, les concasse et injecte la mixture dans le sous-système de remontée; un « collecteur hydraulique » que l'on peut comparer à un traineau qui se déplace sur les fonds marins, sous lequel est fixé une plaque métallique qui introduit la mixture de sédiments et de nodules dans une conduite verticale. Les nodules sont séparés des sédiments au moyen d'un jet d'eau, puis injectés dans la conduite et introduits dans le sous-système de remontée. Il peut être nécessaire de concasser les nodules avant la remontée à la surface, s'ils sont trop gros.

25. Des essais ont été effectués concernant les collecteurs autonomes et les collecteurs remorqués. Dans l'un et l'autre cas, il convient de prendre en compte la résistance au cisaillement de la couche sédimentaire. Le collecteur doit également être conçu pour pouvoir fonctionner lorsque les fonds marins sont légèrement en pente et pour rencontrer de petits obstacles. Plusieurs types de dispositifs de navigation, de détection et d'observation sont intégrés dans le collecteur, tout comme à bord de véhicules téléguidés. Cet équipement sert à mesurer la cadence à laquelle les nodules sont ramassés et alimentés dans le sous-système de remontée, à établir des rapports visuels concernant le fonctionnement du collecteur, à fournir des renseignements acoustiques sur la topographie des fonds marins devant le collecteur et de part et d'autre du collecteur ainsi que sur sa vitesse; à fournir des données aux fins du positionnement du collecteur par rapport au minéralier et à la trajectoire des opérations antérieures d'extraction minière.

Engins de remontée

26. Le sous-système de remontée accomplit la tâche fondamentale consistant à remonter jusqu'au minéralier les nodules placés dans la conduite verticale par le collecteur. Deux méthodes de remontée ont été conçues : la remontée hydraulique et la remontée par injection d'air. Dans le système de remontée hydraulique, les nodules sont mélangés avec de l'eau de mer pour former une pulpe de minerai, qui est aspirée par des pompes hydrauliques montées dans ou sur la conduite, en séquence, à des profondeurs diverses. Dans la méthode de remontée par injection d'air, de l'air comprimé est injecté dans la conduite à des profondeurs diverses; le mélange air-eau produit une différence de densité dans la conduite. Cette mixture va alors vers la surface, sous l'influence de la charge

hydrostatique. Ce mouvement entraîne une succion au fond de la conduite et la pulpe de nodules est aspirée vers la surface. L'engin de remontée devrait pouvoir accomplir les tâches ci-après :

- (a) Pomper ou aspirer la pulpe de minerai;
- (b) Contrôler le débit de la pulpe;
- (c) Faire office de conduite pour la remontée de la pulpe;
- (d) Fournir un raccordement mécanique au collecteur;
- (e) Assurer la propulsion du collecteur, si celui-ci est remorqué;
- (f) Servir de structure d'appui pour le câble d'alimentation et le raccordement de communication avec le collecteur;
- (g) Supporter l'excitation causée par l'oscillation du navire et le mouvement dans la colonne d'eau;
- (h) Supporter l'excitation de la conduite résultant des variations topographiques rencontrées par le collecteur;
- (i) Empêcher l'obstruction de la conduite, notamment en cas d'interruption inattendue de la remontée de la pulpe;
- (j) Supporter son propre poids et celui du matériel et des instruments rattachés.

27. Compte de la porosité et de la fragilité des nodules, il faut prendre en compte lors du pompage les pertes liées à la circulation de la pulpe de minerai dans la conduite et à la friction associée aux impacts entre particules solides, d'une part, et entre les particules solides et la paroi de la conduite, de l'autre. Les gradients de pression dans la conduite et les caractéristiques relatives à la puissance de la pompe sont établis en fonction de la nécessité que ces deux facteurs soient à des niveaux acceptables et de celle de disposer de suffisamment de puissance pour transporter les nodules, les sédiments et l'eau des fonds marins à la surface. Le diamètre de la conduite devra permettre le transport optimal de la pulpe. Le raccordement entre la conduite et le collecteur doit pouvoir subir des courbures sans contraintes importantes, parce qu'il fait l'objet de déformations élevées. Il doit également supporter des variations de la profondeur de l'eau et de la topographie des fonds marins.

Le minéralier

28. Le minéralier a pour fonction essentielle de recevoir les nodules acheminés par l'engin de remontée et de les transborder sur le navire de transport. Il doit :

- (a) Fournir un appui structurel aux engins qui fonctionnent en profondeur (engins de subsurface) (le collecteur et l'engin de remontée);
- (b) Permettre d'assembler, de déployer, de faire fonctionner, de contrôler et de récupérer les engins de subsurface;
- (c) Alimenter en énergie les engins de subsurface;
- (d) Acheminer tout l'appareillage d'extraction minière sur le site de la mine, si le système est un collecteur remorqué, éventuellement selon un plan d'extraction minière déterminé au préalable ;
- (e) Transborder le minerai sur le navire de transport;

- (f) Fournir un stockage tampon pour le minerai accumulé et l'entreposage des engins de subsurface, lorsqu'ils ne sont pas utilisés;
- (g) Contrôler toutes les opérations d'extraction minière et de transport ;
- (h) Servir d'hôtel, d'entrepôt et d'atelier.

29. La décision de transporter le minerai des nodules, le personnel, les pièces de rechange et les biens non durables à bord d'un navire est fondée sur une évaluation selon laquelle, pour que les opérations soient rentables, il est impératif d'un point de vue économique d'exploiter les minéraliers en permanence. L'autre possibilité qui serait de faire fusionner les fonctions de transport et d'extraction minière à bord d'un grand navire ou de traiter les nodules sur le site (opérations en sus du traitement immédiat en mer décrit ci-dessus) n'est pas viable économiquement. Dans ce cas, on peut considérer les navires de transport essentiellement comme des vraquiers traditionnels, qu'il est possible de louer, de manière à réduire le montant des investissements nécessaires. Le montant des investissements nécessaires définit nombre des paramètres relatifs aux minéraliers, qui concernent entre autres l'égouttage mécanique des minerais, le stockage en vrac, le positionnement dynamique⁶, la propulsion, le transport du minerai et les installations d'attente.

30. La disponibilité du minéralier et celle du système de transbordement sur le minéralier constituent un paramètre fondamental. Le minéralier doit avoir une disponibilité élevée sur le site de la mine parce que sa disponibilité et la production journalière sont inversement proportionnelles. Plus la disponibilité du minéralier est élevée, moins la production journalière sera élevée. Si, pour que le système soit rentable, on estime qu'il faille produire environ 3 millions de tonnes sèches par an, il faudra que le minéralier produise environ 10 000 tonnes sèches par jour. La disponibilité élevée signifie également que le minéralier et les navires de transport doivent pouvoir opérer quel que soit l'état de la mer, à quelques exceptions près. La disponibilité du système de transbordement du minerai doit être élevée, faute de quoi les exigences en matière de stock tampon et de capacité de transbordement du minerai seront élevées.

Traitement et affinage du minerai tiré de nodules polymétalliques

31. Les nodules polymétalliques diffèrent par leur forme physique et par leur composition chimique de tous les minerais terrestres actuellement exploités. En conséquence, il convient de concevoir une séquence de traitement spécifique pour l'extraction des métaux des nodules. Le traitement doit satisfaire à des critères de faisabilité technologique, aux besoins en matière de production et aux normes environnementales. Il constitue une partie importante de l'exploitation des nodules, puisque les coûts qui lui sont associés seront vraisemblablement supérieurs à ceux encourus pendant l'exploitation minière. Il est possible de dissocier l'usine de traitement de l'exploitation minière.

32. Le traitement devrait être effectué sur terre. Il n'est pas prévu de traiter le minerai extrait des nodules à bord du minéralier ou des navires de transport. À l'heure actuelle, aucun des premiers consortiums et aucun des contractants actuels n'ont suggéré de traiter les minerais en haute mer ou à

⁶ Le positionnement dynamique est un système assisté par ordinateur qui permet à un navire de maintenir automatiquement sa position en utilisant ses propres moyens de propulsion. Des capteurs de position ainsi que des anémomètres, des capteurs de mouvement et des compas gyroscopiques alimentent l'ordinateur en données concernant la position du navire et l'ampleur et la direction des forces extérieures qui ont une incidence sur cette position.

bord de leurs minéraliers. Ceci résulte du besoin d'espace, car les activités d'extraction minière nécessitent un équipement considérable: conduite de remontée, collecteurs, pièces de rechange et stockage des nodules. En outre, les investissements considérables nécessaires pour la création d'un établissement de traitement flottant, ainsi que le montant élevé des dépenses de fonctionnement, ne permettent pas un modèle opérationnel économique.

33. Il convient de noter que les sites d'exploitation minière et les installations de déchargement à terre peuvent être très éloignés les uns des autres (plus de 3 000 milles marins dans le cas de la Zone Clarion-Clipperton). Les nodules peuvent être transportés à terre sous trois formes : pulpe de minerai; nodule entier ou nodule séché/concassé. La teneur en eau des nodules sur le site d'exploitation est de 70 pour cent. Elle est ramenée à 40 pour cent, une fois l'eau éliminée de la pulpe de minerai. Des installations particulières de réception des nodules seront vraisemblablement nécessaires dans toute usine de traitement.

34. Il existe un certain nombre de possibilités de traitement. Les métaux peuvent être extraits des nodules au moyen de divers procédés pyrométallurgiques (dont la fusion et le grillage) et/ou un traitement hydrométallurgique (lixiviation). Le choix du processus est en partie fonction de la viabilité économique des métaux. En fin de compte, il reflètera la nécessité d'établir un équilibre entre l'efficacité en matière de récupération du métal et le volume de métal récupéré d'une part et les investissements nécessaires pour l'usine de traitement de l'autre.

35. Il existe actuellement cinq possibilités prometteuses de traitement : les usines qui récupèrent trois métaux (nickel, cuivre et cobalt) par lixiviation sulfurique à haute température, par réduction et lixiviation à l'ammoniaque ou par procédé Cuprion / lixiviation à l'ammoniaque) et les usines qui récupèrent quatre métaux (nickel, cuivre, cobalt et manganèse) par fusion ou réduction / lixiviation à l'acide chlorhydrique.

B. LES SULFURES POLYMÉTALLIQUES

Caractéristiques

36. Les dépôts de sulfures polymétalliques massifs ont été découverts en 1979 dans des formations de roche noire de type cheminée, crachant de l'eau. Depuis lors, les établissements scientifiques du monde entier se sont employés à cartographier ces formations et des sites ont été identifiés à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 3 700 mètres. Les dépôts de sulfures polymétalliques massifs sont le produit de formations de roche noire crachant de l'eau à haute température (350°C) situées dans les zones volcaniques sous-marines actuellement en activité ou qui l'ont été récemment (dorsales médio-océaniques des grands fonds marins, dorsales sédimentées, monts sous-marins intraplaques, arcs volcaniques et zones d'affaissement au niveau de l'arc interne). Lorsque ces sites sont actifs, l'eau de mer riche en minéraux et surchauffée s'échappe des fumeurs noirs; lorsque ces fluides se mélangent à l'eau de mer froide, les métaux qu'ils contiennent précipitent sous forme de sulfures sur le fond océanique. Au fil du temps, ces dépôts peuvent devenir importants, ils ne sont pas couverts par des morts-terrains et sont donc facilement exploitables.

37. On connaît plus de 300 emplacements de formations sous-marines de type cheminée, à haute température et de minéralisation associée dans les fonds marins. Plus de 100 d'entre elles abritent des dépôts de sulfures polymétalliques massifs. Le volume des dépôts connus va de quelques milliers de

tonnes à un maximum de dix millions de tonnes. Toutefois, la taille précise des gisements a seulement pu être déterminée dans les quelques cas où l'on dispose des données de forage (par exemple Middle Valley, la dorsale de Juan de Fuca, le monticule TAG, la dorsale médio-atlantique). Les gisements se composent d'accumulations massives de sulfures, essentiellement sous forme de pyrite, pyrrhotite, chalcopryrite et sphalérite. On a établi l'existence de différents types de systèmes hydrothermaux des fonds marins et de dépôts minéraux associés. On peut les classer en six catégories, en fonction du type du dépôt ou de la nature de l'expulsion hydrothermale associée : dépôts de sulfures polymétalliques massifs; dépôts associés à des cheminées crachant de l'eau à faible température; sédiments métallifères à proximité du gisement; sédiments métallifères distaux; gisements dans des veines et des brèches; existence connue de panaches hydrothermaux (c'est à dire de sites de cheminées hydrothermales à haute température connus par télédétection mais dont la présence n'est pas confirmée).

38. L'état des connaissances relatives à la répartition et aux caractéristiques fondamentales des dépôts de sulfures massifs peut être résumé comme suit : il existe plus de 300 champs connus d'événements hydrothermaux. Près de 40 pour cent d'entre eux sont situés dans la Zone. Les centres d'expansion médio-océaniques se trouvent en majeure partie dans la Zone. En revanche, de grandes parties des arcs volcaniques contenant des formations de sulfures se trouvent dans les zones économiques exclusives des états insulaires. Soixante-cinq pour cent des sites sont situés dans des dorsales médio-océaniques; 22 pour cent dans des bassins d'arrière-arc; 12 pour cent dans des arcs volcaniques et 1 pour cent dans des volcans intraplaques. Cent de ces sites hydrothermaux abritent des sulfures polymétalliques. Toutefois, les gisements en question n'ont guère plus d'1 km de diamètre, le diamètre étant généralement compris entre des dizaines et des centaines de mètres. Les cheminées hydrothermales et les gisements associés de sulfures peuvent être également regroupés dans de plus petites distances; on peut en voir un exemple dans le tronçon Endeavour de la dorsale Juan de Fuca, qui comporte environ 30 complexes différents de sulfures répartis sur huit sites hydrothermaux le long d'un tronçon de 10 km de vallée axiale. Au total, il existe 55 000 km de centres d'expansion des océans et 22 000 km d'arcs volcaniques et de dorsales à arrière-arc. Les cheminées sont espacées en moyenne de 98 km le long de la dorsale, de 167 km le long des dorsales en expansion lente et de 46 km le long des dorsales en expansion rapide. Sur une superficie de 100 km², le tonnage moyen des blocs ne sera généralement pas supérieur à 50 000 tonnes. Le système de cheminées du monticule TAG, dans l'océan Atlantique, est probablement le mieux connu de tous les dépôts de sulfures polymétalliques. Il a été foré en dix-sept endroits différents et mesure 200 m de longueur et 60 m de largeur.

Prospection

39. Les méthodes et techniques utilisées pour prospector les gisements de sulfures polymétalliques sont les mêmes que celles employées pour la prospection des nodules polymétalliques.

Exploration

40. Les objectifs généraux de la phase d'exploration sont les mêmes que pour les nodules polymétalliques – effectuer une exploration plus détaillée des sites pour déterminer la taille du gisement et sa composition en minéraux. Il existe toutefois des différences d'approche, compte tenu de la nature différente des gisements.

41. L'imagerie de la surface des fonds marins ne fournissant que des renseignements limités quant à ce type de gisement, il est nécessaire de disposer de davantage de données pour évaluer la viabilité commerciale d'un éventuel site minier. On peut le faire en utilisant un gravimètre marin qui permet

d'obtenir une image en trois dimensions de la couche sous-jacente de la formation minière. Une fois ceci réalisé, on procède à des opérations de carottage des roches benthiques pour quantifier la teneur en minerai, de manière à évaluer la valeur du gisement. Le matériel utilisé est soit une foreuse benthique isolée, soit, conjointement, un véhicule téléguidé. D'autres recherches concernant le milieu doivent être effectuées pendant cette phase du programme pour comprendre la composition du biote marin dans la zone considérée. Les cheminées hydrothermales actives fournissent une source d'énergie chimiosynthétique qui procure richesse et diversité au biote marin. Les cheminées qui ne sont plus en activité ne soutiennent plus l'existence de ces communautés et leur incidence sur le biote marin diminue spectaculairement. Il convient de noter que seuls les gisements inactifs de sulfure polymétalliques doivent être pris en compte aux fins de l'exploitation minière. L'exploitation minière d'une cheminée en activité poserait des problèmes techniques, en raison de la température extrêmement élevée de l'eau.

42. L'évaluation des données permet d'affiner les zones cibles restantes, de telle sorte que les initiatives futures d'exploration soient axées sur les gisements qui présentent les possibilités économiques les plus prometteuses. À l'étape suivante, on étudiera plus avant ces gisements afin de définir un gisement économique. On trouve les sulfures polymétalliques dans des secteurs localisés et, une fois les gisements identifiés, l'exploration est très spécifique et détaillée. À l'étape finale, les activités permettent de disposer de suffisamment de données pour évaluer le gisement économique, délimiter le site minier et établir un plan provisoire d'extraction minière pour la période initiale d'exploitation commerciale.

Techniques

43. Les techniques requises pour l'exploitation des sulfures polymétalliques ont fait l'objet d'importants efforts de recherche et de développement de la part des entreprises qui sont sur le point d'entreprendre des opérations commerciales. Ces efforts sont allés de systèmes perfectionnés d'imagerie jusqu'à des systèmes d'extraction minière renforcés et ont tiré parti des techniques mises au point par des utilisateurs divers et expérimentés des ressources des fonds marins.

44. À ce jour, les opérations commerciales prévues pour l'exploitation des dépôts de sulfures polymétalliques sont toutes situées dans des zones relevant de la juridiction nationale, les sites miniers se trouvant à environ 1 500 m de profondeur. Au nombre des techniques nécessaires pour l'exploitation minière, on trouve une unité d'extraction sous-marine, une conduite permettant de remonter le minerai, un navire d'appui ainsi que des engins de manutention des matières et de transport des minerais à partir du site minier. La tête coupante fera en permanence l'objet d'études pendant la durée du programme. On envisage actuellement d'employer un navire, qui sera une version plus grande d'un bâtiment de soutien des opérations de plongée ou du navire d'appui à usage multiple utilisé pour appuyer les opérations sous-marines effectuées dans le cadre de l'exploitation du pétrole et du gaz en mer. La conception de ces navires est très développée et ils disposent d'importants moyens techniques (mécanismes de plongée à saturation intégrée, véhicules téléguidés, capacités de remontée de lourdes charges, puits central, locaux à usage d'habitation adaptés aux effectifs nécessaires). De plus, les bâtiments de soutien des opérations de plongée et les navires d'appui à usage multiple disposent de moyens perfectionnés de navigation et de maintien en position, même dans des conditions très difficiles. Ces navires peuvent fonctionner à n'importe quel endroit sur les océans, mais la distance entre le site minier et le lieu où les matières seront entreposées à terre peut avoir de grandes incidences sur la taille du navire. La distance jusqu'au lieu d'entreposage des matières aura également une influence sur

la taille et le type de minéralier, de telle sorte qu'il soit possible de poursuivre les opérations d'extraction minière sans interruption.

45. Les dépôts de sulfures polymétalliques les plus profonds actuellement identifiés dans la Zone se trouvent à des profondeurs allant jusqu'à 3 700 m. Parmi les techniques disponibles, c'est l'extraction du diamant en mer qui dispose du matériel le plus analogue à celui qui sera nécessaire pour l'exploitation des sulfures. L'extraction des sulfures et des diamants s'effectue à des profondeurs différentes, mais cela ne limitera pas l'élaboration ou le déploiement des techniques. La principale différence dans une opération d'extraction des sulfures portera sur la tête de coupe et on s'est employé à concevoir des systèmes terrestres et marins dans ce domaine.

46. La première opération d'extraction commerciale des sulfures polymétalliques est en cours d'élaboration depuis un certain nombre d'années, mais on n'est pas encore passé à la fabrication des systèmes en raison de considérations économiques. La conception préliminaire prévoit un système qui sera descendu du navire d'appui jusqu'au site de la mine. Les gisements de sulfures sont composés de minerai solide à teneur élevée dont le concassement pour en faire une matière transportable nécessite beaucoup de force et d'énergie. L'appareillage d'extraction minière nécessaire pour réaliser cette tâche de très grande dimension et lourd, de telle manière que la tête de coupe ait la force requise pour entamer la roche. La tête de coupe devra également le lieu de ramassage des minerais. On ne sait pas encore précisément si un traitement supplémentaire sur place sera nécessaire pour pouvoir transporter le minerai. Le projet actuel prévoit une autre étape de traitement à bord du navire, avant que le minerai soit transporté à terre pour un nouvel affinage. Ce traitement produirait des déchets qui seraient rejetés dans les fonds marins au moyen de conduites de refoulement dans le système de remontée. La granulométrie des matières rejetées aura des incidences sur la taille du panache sous-marin.

47. La conception préliminaire du site minier prévoit un objectif de production de 100 m³ à l'heure avec des taux maximum de production de 6 000 tonnes par jour. L'engin d'extraction minière actuellement envisagé est conçu pour fonctionner sur des quilles adaptables, de manière à opérer en terrain accidenté au cours de l'exploitation initiale de la mine. Une fois achevée la phase initiale de l'exploitation minière et une fois que des zones des fonds marins auront été aplanies, l'extraction minière se fera par engin tracté, de manière à pouvoir évoluer plus facilement autour du site. Un engin spécialisé remontera le minerai qui aura été versé dans la conduite à partir du collecteur jusqu'au navire et la technique employée sera analogue à celle utilisée pour les nodules polymétalliques.

Traitement du minerai provenant des sulfures polymétalliques

48. Les sulfures polymétalliques présentent une composition chimique analogue à celle des sulfures terrestres qui font actuellement l'objet d'une exploitation minière. En conséquence, il est possible de déterminer une séquence de traitement à partir des méthodes existantes d'extraction des métaux des minerais sulfureux. Le traitement doit répondre à des normes en matière de faisabilité technique, de production et de respect de l'environnement. Il constitue une partie importante de l'exploitation des sulfures, puisque les dépenses encourues à cette occasion seront vraisemblablement plus élevées que celles encourues au stade de l'extraction. Il existe un certain nombre de possibilités en matière de traitement. Les métaux peuvent être extraits du minerai au moyen de diverses combinaisons d'opérations pyrométallurgiques (y compris la fusion et le grillage) et d'opérations hydrométallurgiques (lixiviation). La méthode choisie dépendra en partie de la viabilité économique des métaux. En fin de

compte, le choix d'une méthode sera fonction de la nécessité d'établir un équilibre entre l'efficacité en matière de récupération des métaux et le volume des métaux récupérés, d'une part, et les investissements réalisés pour l'usine de traitement, de l'autre.

49. Tout comme dans le cas des nodules polymétalliques, il existe un certain nombre d'options de traitement : les usines qui récupèrent trois métaux (nickel, cuivre et cobalt) par lixiviation sulfurique à haute température, par réduction et lixiviation à l'ammoniaque ou par le procédé Cuprion / lixiviation à l'ammoniaque et les usines qui récupèrent quatre métaux (nickel, cuivre, cobalt et manganèse) par fusion ou réduction / lixiviation à l'acide chlorhydrique. Il n'est pas prévu que le traitement ait lieu en haute mer ou à bord du minéralier, car cela ne serait pas faisable économiquement

Références

Nations Unies (1984) *Analysis of Exploration and Mining Technology for Manganese Nodules*. Seabed Minerals Series, Volume 2, Graham and Trotman (London) 140pp.

Nations Unies (1986) *Analysis of Processing Technology for Manganese Nodules*. Seabed Minerals Series Volume 3. Graham and Trotman (London) 79pp.

Autorité internationale des fonds marins, *Proposed Technologies for Deep Seabed Mining of Nodules polymétalliques*, in Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop, August 1999, 456pp.