



## Conseil

Distr. générale  
27 juin 2006  
Français  
Original : anglais

**Douzième session**  
Kingston (Jamaïque)  
7-18 août 2006

### **Modèles de sélection des blocs en vue de l'exploration et de l'exploitation minière des encroûtements ferromanganésifères riches en cobalt et des sulfures polymétalliques**

#### **Partie II : sulfures polymétalliques**

**Document établi par le secrétariat\***

#### **I. Introduction**

1. Il y a au fond des océans plus de 300 sites présentant une activité hydrothermale accompagnée de minéralisation, dont une centaine contiennent des sulfures polymétalliques (voir fig. 1 et tableau 1)<sup>1</sup>. On les reconnaît généralement à la présence d'évents fumeurs noirs à haute température (350°C) mais de nombreux autres types de minéralisation ont été découverts. Environ 40 % des sites connus se trouvent dans la Zone. Pour différentes raisons, notamment juridiques et techniques, l'exploration commerciale récente des sulfures polymétalliques des fonds marins s'est limitée aux gîtes se trouvant dans les zones économiques exclusives (fig. 2). Le présent document porte sur les critères et les modèles possibles d'attribution de blocs d'exploration dans la Zone. Il présente les raisons scientifiques qui ont motivé le choix des zones de prospection et un calendrier de restitution des blocs attribués durant la phase d'exploration.

2. On trouvera ci-après des exemples d'attribution de « blocs contigus » et de « groupes de blocs contigus » dans des secteurs où la présence de sulfure a été constatée. À partir d'une série de critères et de procédures de sélection, nous comparons deux modèles d'attribution de licences d'exploration dans 32 secteurs

---

\* Le présent document est le résumé d'une étude détaillée effectuée par les consultants Mark Hannington et Thomas Monecke, de l'Université d'Ottawa (Canada). Les membres du Conseil peuvent prendre connaissance de l'étude intégrale, avec ses cartes et ses appendices, sur le site Web de l'Autorité internationale des fonds marins.

<sup>1</sup> Pour faciliter la reproduction de ce document, les figures et les tableaux ont été omis.

comprenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques, dont 12 se situent dans la Zone (fig. 3). La performance des modèles d'exploration en termes d'efficacité de sélection des zones contenant des sulfures polymétalliques (et de restitution de celles n'en contenant pas) est étudiée aux niveaux mondial et régional ainsi qu'à l'échelle du site, de la phase de prospection à la sélection des blocs les plus avantageux retenus au terme de l'exploration. Ces modèles prennent en compte :

- a) Les limites géologiques de la zone de prospection;
- b) La distribution connue des sulfures polymétalliques; et
- c) Les caractéristiques de chaque gîte de sulfures polymétalliques. D'autres modèles plus appropriés peuvent aussi être testés au moyen des données du présent document.

3. Les sulfures polymétalliques diffèrent radicalement des encroûtements et des nodules par plusieurs caractéristiques importantes de configuration géologique, de distribution et de continuité. La dimension des gîtes peut varier de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres, alors que les encroûtements couvrent de vastes étendues géologiquement uniformes du fond marin (exemple d'échelles kilométriques : Hein et al., 1999). La stratégie d'exploration doit donc être fondamentalement différente.

4. La présente étude se fonde sur l'état actuel des connaissances de la taille et de la distribution des gîtes de sulfures polymétalliques. Elle ne préjuge en rien des limites économiques ou techniques auxquelles la recherche de sulfures polymétalliques pourrait se heurter sur les sites considérés. Les modèles proposés ici ne portent que sur la phase d'exploration et non sur l'exploitation minière, si ce n'est pour estimer la taille minimum des blocs en vue d'une exploitation pluriannuelle. Les exemples d'attribution de blocs du présent document ne constituent pas une évaluation économique de gîtes ou de zones précises. Là où il est fait mention de gîtes qui pourraient répondre à des critères d'exploitation commerciale, aucune évaluation économique n'en est déduite. Les exemples cités sont purement illustratifs et ne signifient en aucun cas que les zones mentionnées contiennent suffisamment de ressources pour une exploitation commerciale. Les informations fournies dans le présent document, qu'il s'agisse de l'épaisseur de dépôts de sulfure contigus, de la masse volumique, de la composition chimique ou d'autres caractéristiques minéralogiques ou métallurgiques, ne peuvent être utilisées pour déduire l'existence effective de ressources, si ce n'est à titre d'exemple hypothétique et dans la mesure où les informations existantes peuvent justifier de tels exemples. Les entreprises commerciales participant à la recherche de sulfures polymétalliques dans les fonds marins sont également citées uniquement à titre illustratif, ce qui ne signifie donc nullement que leurs activités ou leurs programmes sont approuvés ou recommandés comme modèles s'appliquant à la Zone. Il n'est question de conformité à la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer ou au projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques et des encroûtements ferromanganésifères enrichis en cobalt dans la Zone (ISBA/10/LTC/WP.1\*) que pour l'élaboration des modèles d'exploration.

## II. Terminologie

5. Aux fins du présent document et des modèles présentés ci-dessous, les termes suivants seront employés :

a) Zone de prospection : zone préliminaire dont le fond marin peut contenir des sulfures polymétalliques ou zone favorable à leur présence, dont une partie peut être attribuée aux fins d'exploration conformément au projet de règlement. Dans les 32 exemples considérés ici, une zone de prospection est définie arbitrairement comme une zone de cinq degrés de côté contenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques ou une autre indication claire de minéralisation. En réalité, une zone de prospection peut être identifiée sur la base de caractéristiques géologiques favorables même s'il n'y a aucune indication de minéralisation;

b) Zone d'exploration : « concession » ou étendue se trouvant dans une zone de prospection, comprenant plusieurs blocs contigus ou non destinés à une exploration avancée. Il s'agit généralement d'une zone d'un degré de longitude sur un degré de latitude au plus, contenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques ou une autre indication claire de minéralisation. Dans les modèles présentés ici chaque zone d'exploration comporte 100 blocs de 10 kilomètres de côté, conformément au projet de règlement;

c) Bloc attribué : fragment de zone d'exploration mesurant environ 10 kilomètres de côté et dont la superficie ne dépasse pas 100 kilomètres carrés, conformément au projet de règlement;

d) Zone favorable : partie de zone de prospection présentant plusieurs caractéristiques géologiques considérées comme indispensables à la formation des sulfures polymétalliques. Pour délimiter une zone favorable, on se fonde principalement sur les signes d'activité tectonique et volcanique sous-marine. Ces deux conditions sont nécessaires à la circulation hydrothermale et à la concentration des fluides hydrothermaux sur le fond marin, là où les métaux peuvent se déposer. Une zone favorable peut contenir des gîtes de sulfures polymétalliques ou présenter d'autres indications claires de minéralisation, mais cela ne doit pas nécessairement être le cas;

e) Zone prometteuse : zone choisie pour une exploration avancée, contenant habituellement au moins un gîte de sulfures polymétalliques. Dans les modèles présentés ici, il s'agit généralement des blocs contenant plus d'un gîte;

f) Gîte de sulfures : dépôt massif de sulfures polymétalliques (par exemple une cheminée ou monticule) ou groupe de tels dépôts dans une zone définie (par exemple un champ de cheminées), généralement – mais pas nécessairement – associée à un événement hydrothermal actif. Un gîte de plusieurs dépôts suppose un certain degré de continuité ou de concentration (par exemple un champ de cheminées ou de monticules sur une étendue inférieure à celle qui le sépare du groupe le plus proche). Les zones prometteuses d'une zone d'exploration comportent au moins un tel gîte.

6. Le présent document ne fait aucune distinction juridique ou technique entre la « prospection », qui ne donne pas lieu aux droits exclusifs visés dans le projet de règlement, et l' « exploration », qui donne lieu à de tels droits. La prospection peut se faire dans plusieurs zones, dont certaines peuvent être attribuées dans le cadre d'un plan d'exploration, comme l'illustrent les modèles ci-après. Le terme

« gisements » n'est utilisé dans le présent document que pour désigner les dépôts de sulfure massif qui ont fait l'objet d'une exploitation économique terrestre, l'idée étant d'éviter toute confusion avec les dépôts des fonds marins. Dans la littérature scientifique, le terme « gisement » désigne tour à tour des monticules de sulfure, des champs d'activité hydrothermale ou des régions géographiques entières.

7. Les autres termes utilisés dans le présent document sont définis dans le projet de règlement relatif à la prospection et à l'exploration des sulfures polymétalliques et des encroûtements ferromangnésifères enrichis en cobalt dans la Zone.

### III. Base de données

8. Les zones examinées dans le présent document ont été sélectionnées dans une base de données mondiale sur les sulfures polymétalliques des fonds marins et les systèmes hydrothermaux associés (Hannington et al., 2002, 2004). Cette base de données comporte deux parties compilées séparément pour le dépôt central de données de l'Autorité internationale des fonds marins en 2002 et 2004. La première est une base numérique contenant la situation et la description de plus de 300 gîtes de sulfures polymétalliques ayant une activité hydrothermale associée. La deuxième est une compilation des analyses géochimiques publiées portant sur plus de 2 600 échantillons de sulfures polymétalliques des fonds marins (61 000 entrées). À partir de ces données, 32 zones favorables ont été sélectionnées pour tester les modèles d'attribution des licences d'exploration, dont 12 dans la Zone.

9. Les données bathymétriques utilisées pour définir les zones de prospection initiales proviennent de l'atlas numérique de la GEBCO (Carte générale bathymétrique des océans du Centre de données océanographique britannique, 2003), à grille d'une minute. La GEBCO utilise habituellement une équidistance de 500 mètres entre les courbes de niveau mais on a choisi ici une équidistance de 1 000 mètres pour faciliter le tracé. Des cartes régionales similaires peuvent être créées sur la base des données bathymétriques mondiales déduites de l'altimétrie, de Smith et Sandwell (1997). Ces grilles à deux minutes provenant de la gravimétrie satellitaire présentent l'avantage de couvrir les régions les plus éloignées et les plus inaccessibles des fonds marins.

10. Les zones favorables à la présence de sulfures polymétalliques ont été choisies à partir des cartes de cinq degrés de côté qui figurent à l'appendice 3. Les cartes illustrant l'application des modèles d'exploration à cette échelle figurent à l'appendice 4. Une grille de 0,1 degré est superposée à chaque carte dans les zones considérées comme favorables à la présence de sulfures polymétalliques et où une prospection pourrait se faire. Cette grille correspond à des blocs d'une dizaine de kilomètres de côté ( $0,1 \times 60 \text{ milles marins} \times 1,852 = 11,11 \text{ km}$ ). Des degrés décimaux sont utilisés pour faciliter la localisation des gîtes. Dans chaque cas, la grille est placée selon plusieurs critères énoncés à l'appendice 2.

11. À l'appendice 5, plusieurs exemples de cartes de 30 minutes de côté (avec une équidistance de 100 m entre les courbes de niveau) illustrent la distribution des gîtes de sulfure dans les zones sélectionnées pour lesquelles on dispose de données bathymétriques plus détaillées. Ces données bathymétriques peuvent être utilisées pour réduire sensiblement la taille initiale d'une zone favorable mais elles ne sont pas disponibles pour l'ensemble de la surface océanique.

#### IV. Modèles de sélection des blocs

12. Des zones favorables à la présence de sulfures polymétalliques ont été sélectionnées sur 32 zones de cinq degrés de côté, sur la base des caractéristiques géologiques générales décrites à l'appendice 2 (zones comportant par exemple des crêtes de dorsale, des monts sous-marins en dehors de l'axe, des arcs volcaniques, des bassins d'arrière-arc). Une série de caractéristiques physiques des sulfures polymétalliques présents du fond marin ont été examinées, notamment l'espacement entre les dépôts et la taille des découvertes probables. Le lecteur trouvera de plus amples informations à l'appendice 2 ainsi que dans les articles généraux écrits sur ce sujet par Hannington *et al.* (1995, 2005) et Herzig et Hannington (1995, 1999, 2000), et dans l'Étude technique n° 2, intitulée *Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-rich Ferromanganese Crusts – Status and Prospects*, publiée par l'Autorité internationale des fonds marins. Le processus de sélection est limité dans une certaine mesure par la précision des données bathymétriques des cartes. Étant donné les incertitudes concernant la géologie des fonds marins, on a inclus dans la sélection initiale, sur les cartes à équidistance de 1 000 mètres de la GEBCO, de vastes zones jouxtant les éléments géologiques favorables (tels que les flancs des dorsales). Les données bathymétriques de haute résolution peuvent être utilisées pour affiner la sélection des zones favorables, comme indiqué ci-dessous (voir la partie « Résultats »).

13. L'appendice 4 présente plusieurs modèles montrant comment ces zones pourraient être réduites au nombre minimum de blocs d'exploration, conformément au calendrier des restitutions proposé dans le projet de règlement (restitution de 50 % de la zone attribuée après 5 ans et de 75 % après 10 ans, 25 blocs au maximum étant conservés après 15 ans). Si l'exploration est fructueuse, les 25 derniers blocs devraient contenir suffisamment de sulfures polymétalliques pour permettre une exploitation pluriannuelle, définie ici comme une exploitation commerciale raisonnable durant plus d'un an. Plusieurs modèles d'exploitation pluriannuelle ont été proposés (allant d'un à deux millions de tonnes par an) mais ils ne contiennent pas d'indications quant à la qualité, les taux de production ou d'autres aspects techniques. Les modèles d'exploitation proposés se fondent sur des comparaisons avec l'extraction commerciale sur terre. Cette approche est raisonnable, puisqu'il faut partir du principe que toute exploitation future des fonds marins devra concurrencer l'exploitation minière terrestre.

14. Un seul gîte (comme le Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) dans la Middle Valley) pourrait renfermer des dépôts de plus d'un million de tonnes ou plus probablement plusieurs gîtes d'une zone plus vaste. Il est difficile d'évaluer quelle superficie pourrait renfermer une telle quantité de sulfure. Il pourrait s'agir de 20 blocs refermant chacun 50 000 tonnes, de 2 blocs contenant chacun 500 000 tonnes ou d'un bloc contenant plus d'un million de tonnes. Cependant, sur la base d'une comparaison avec les dépôts fossiles, nous estimons que la quantité moyenne des blocs de 10 kilomètres de côté les plus prometteurs ne dépasserait pas 500 000 tonnes (voir appendice 2). Peu de blocs devraient renfermer plus d'un million de tonnes et la majorité ne devraient pas renfermer plus de 50 000 tonnes. Les forages effectués indiquent que sur les 100 gîtes examinés dans la présente étude, à l'exception d'Atlantis II Deep, deux seulement contiennent plus d'un million de tonnes de sulfure massif. Moins de cinq autres ont une superficie

susceptible d'en renfermer une telle quantité, dont deux seulement se situent dans la Zone (TAG et Dorsale Est-Pacifique à 13° N).

15. La cartographie des gîtes de sulfures polymétalliques indique qu'aucun de ces gîtes ne dépasse un kilomètre de diamètre, et l'étendue de l'exploitation ne devrait en aucun cas dépasser cette valeur. Aucun gîte ne devrait dépasser la taille minimum d'un bloc, soit 10 kilomètres de côté. Dans la plupart des cas, les blocs susceptibles d'être exploités ne seraient pas contigus et pourraient ne pas faire partie de la même zone d'exploration originale. Il faudra peut-être les sélectionner dans plusieurs zones d'exploration non contiguës et les répartir en deux concessions ou plus. Les exemples ci-après indiquent comment des blocs contigus et non contigus pourraient être attribués lors de la phase d'exploitation.

#### **A. Modèle d'exploration 1 (blocs contigus)**

16. Dans ce modèle, des zones géologiquement favorables délimitées par des tronçons de dorsale ou d'autres éléments géologiques similaires et contenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques ou une autre indication claire de minéralisation ont été sélectionnées dans chaque zone de cinq degrés de côté (appendice 3). Chaque zone favorable correspond approximativement à 500 blocs contigus de 10 kilomètres de côté (soit 50 000 km<sup>2</sup>), ce qui représente donc une vingtaine de fois la surface d'exploitation définitive fixée dans le projet de règlement (25 blocs).

17. On a sélectionné une zone d'exploration de 100 blocs contigus de 10 kilomètres de côté (soit 10 000 km<sup>2</sup>) pour une exploration avancée, comme cela pourrait être le cas dans le cadre d'un plan de travail. Dans ce modèle, on a choisi une zone d'exploration contenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques dans la zone de 5 degrés de côté (voir notamment la figure 4) et ne dépassant pas 20 % de la zone de prospection initiale. Dans chaque cas, 100 des blocs les plus prometteurs (organisés en carrés de 25 blocs) ont été sélectionnés pour couvrir le plus possible de gîtes connus. C'est ce processus de sélection qui serait appliqué dans une zone favorable lors de la première phase de l'exploration. La zone se réduit ensuite à 50 blocs contigus après 5 ans et à 25 blocs après 10 ans (fig. 4).

18. On a finalement retenu dans la zone d'exploration un groupe de 25 blocs contigus de 10 kilomètres de côté (soit 2 500 kilomètres carrés) contenant au moins un gîte de sulfures polymétalliques. Dans ce modèle, les blocs définitifs contiennent le nombre maximum de gîtes dans une zone qui ne couvre pas plus de 25 % de la zone d'exploration initiale (fig. 4).

#### **B. Modèle d'exploration 2 (blocs non contigus)**

19. Dans ce second modèle, la zone d'exploration d'une superficie totale de 10 000 kilomètres carrés consiste en quatre groupes de 25 blocs chacun, chaque groupe contenant un gîte de sulfures polymétalliques ou une autre indication claire d'activité hydrothermale (fig. 5). Lors de la phase d'exploration, des parties de chaque groupe de blocs contigus sont restituées en plusieurs fois, laissant 25 blocs non contigus de 10 kilomètres de côté contenant tous les gîtes de sulfures polymétalliques de la zone initiale. Même si ce cas n'est pas envisagé ici, il faudrait choisir les meilleurs blocs de certaines zones dans plus d'une zone d'exploration de

10 000 kilomètres carrés. Rien ne garantit que les blocs les plus prometteurs seront identifiés correctement lors de la phase d'exploration, mais on peut raisonnablement escompter que les explorateurs appliqueront des critères leur permettant de choisir au mieux les groupes de blocs contenant des sulfures.

## V. Résultats

### A. Sélection des zones favorables et des zones d'exploration

20. Sur les 32 zones de cinq degrés de côté examinées dans la présente étude, la superficie moyenne d'une zone à géologie favorable à la présence de sulfures polymétalliques est de 55 000 kilomètres carrés (voir tableau 2). On a choisi à titre d'exemple 20 zones de superficies équivalentes dans les zones économiques exclusives et 12 dans la Zone. Les zones favorables se trouvant dans certaines zones économiques exclusives sont plus petites en raison de la proximité des terres et de la présence d'un grand nombre d'îles. Elles sont plus vastes dans d'autres zones économiques exclusives à cause de présence de zones d'arrière-arc et de volcans d'avant-arc. Les différences de taille entre les zones favorables choisies dans la Zone sont moindres que dans la plupart des zones économiques exclusives, puisque les zones de recouvrement de la dorsale médio-océanique de la Zone ont tendance à être géologiquement moins complexes. Dans tous les cas, les zones choisies comme favorables à la présence de sulfures polymétalliques sont sensiblement plus grandes que les 10 000 kilomètres carrés d'une zone d'exploration unique de 100 blocs de 10 kilomètres de côté.

21. En interpolant et en quadrillant les données de la GEBCO avec une équidistance de 500 mètres entre les courbes de niveau et un espacement d'une minute, on peut obtenir des données complémentaires utiles permettant de sélectionner des zones favorables plus petites, ce qui pourrait réduire jusqu'à 50 % les zones sélectionnées initialement. Ainsi, dans le Pacifique Nord-Est, la zone favorable choisie à partir des données de la GEBCO couvre 55 000 kilomètres carrés, alors qu'on aurait pu choisir une zone de 25 000 kilomètres carrés en utilisant une équidistance de 100 mètres (appendice 5). Même en utilisant des données bathymétriques plus précises, il n'est pas toujours recommandé d'exclure les zones profondes ou plates qui jouxtent les dorsales. Le gîte de Middle Valley illustre ce problème : en raison de sa situation excentrée par rapport au centre de recouvrement, il aurait pu ne pas être inclus dans une sélection initiale de zones favorables, même si on avait utilisé une équidistance de 100 mètres entre les courbes de niveau. En utilisant des données bathymétriques 10 fois plus précises sur les cartes de cinq degrés de côté, on n'obtient donc pas nécessairement une zone favorable 10 fois plus petite. En limitant l'exploration aux zones de faible profondeur (par exemple moins de 2 500 mètres) pour des raisons techniques encore non précisées, on exclurait aussi de nombreuses zones très prometteuses et notamment la majeure partie de la Zone. Si une grande partie des gîtes de sulfures polymétalliques des zones économiques exclusives se trouvent à moins de 2 500 mètres de profondeur, de nombreux gîtes de la Zone se trouvent jusqu'à 4 000 mètres de profondeur (fig. 6 et tableau 1).

22. Il y a en moyenne 3,4 gîtes de sulfures polymétalliques dans une zone favorable d'environ 55 000 kilomètres carrés (voir tableau 2). Cette moyenne est

légèrement plus élevée (3,7) dans la Zone, ce qui reflète le nombre de petits gîtes qui caractérise les dorsales à expansion rapide. Il ressort d'une analyse de l'ensemble des 106 gîtes de l'appendice 3 que l'espacement moyen entre les gîtes de chaque zone de cinq degrés de côté est de 98 kilomètres (voir tableau 2). Dans la Zone, l'espacement moyen est de 95 kilomètres (pour 43 gîtes). L'espacement est plus important sur les dorsales à expansion lente (167 kilomètres) que sur celles à expansion rapide (46 kilomètres) mais les gîtes situés sur les dorsales à expansion lente sont en moyenne plus étendus. Ces données portent à croire qu'une licence d'exploration de 10 000 kilomètres carrés seulement n'inclurait probablement qu'une partie des gîtes connus d'une zone. Étant donné la dispersion des événements, il faudra peut-être attribuer des blocs en plusieurs lieux distincts, dans des zones favorables probablement non contiguës. Les zones non favorables pourraient être systématiquement restituées de manière à préserver la contiguïté des blocs restants, mais il est plus probable que les explorateurs identifieront rapidement les gîtes les plus favorables et conserveront plusieurs blocs non contigus.

## **B. Comparaison entre le modèle 1 et le modèle 2**

23. Dans le modèle 1, 100 blocs prometteurs, soit 10 000 kilomètres carrés, contenaient en moyenne 2,5 gîtes de sulfures polymétalliques. La moyenne était légèrement plus élevée dans la Zone (2,7 gîtes). En moyenne, une zone d'exploration de 100 blocs contigus englobe 73 % des gîtes de la zone favorable. Dans l'exemple de la figure 4, deux gîtes ont été laissés en dehors de la zone d'exploration initiale et un troisième a dû être restitué afin de conserver un groupe de blocs contigus dans la sélection finale. Les 25 blocs contigus conservés ne contiennent que deux des quatre gîtes de la zone favorable initiale. En moyenne, 53 % seulement des gîtes de sulfures polymétalliques d'une zone favorable se retrouvent dans les 25 derniers blocs (voir tableau 2).

24. Dans le modèle 2, les zones d'exploration ont été divisées en quatre sous-zones comprenant chacune 25 blocs prometteurs (la superficie totale étant la même : 10 000 kilomètres carrés). Dans ce cas, on a pu conserver dans les 100 blocs prometteurs 97 % des gîtes de sulfures polymétalliques. Dans les rares cas où des gîtes ont été laissés en dehors des 100 blocs prometteurs, le nombre total de gîtes dépassait celui que les quatre sous-zones pouvaient contenir. Dans la majorité des zones de cinq degrés de côté, il fallait des blocs non contigus pour englober tous les gîtes de la zone favorable.

## **VI. Conclusions et recommandations**

25. Le projet de règlement de prospection et d'exploration ne pourrait probablement pas s'appliquer de la même manière aux encroûtements et aux sulfures polymétalliques. Les zones favorables à la présence de sulfures polymétalliques sont vastes mais les gîtes sont plus localisés et les zones où l'exploitation pourrait être envisagée sont plus petites que dans le cas des encroûtements. Alors que les encroûtements se trouvent essentiellement sur des monts sous-marins qu'une étude bathymétrique peut aisément identifier, de vastes zones devraient être sélectionnées aux stades initiaux de la prospection. Ces zones peuvent se réduire aux gîtes les plus prometteurs au cours des 5 à 10 premières



années mais il faut explorer une surface plus grande pour être certain de trouver à terme suffisamment de ressources exploitables. Dans la majorité des cas, une zone d'exploration de 10 000 kilomètres carrés est trop petite pour englober tous les gîtes d'une zone de prospection de cinq degrés de côté. Pour ce qui est des zones plus vastes, le calendrier de restitution proposé ne permet peut-être pas d'évaluer les zones de manière suffisamment approfondie pour éviter l'abandon prématuré de blocs prometteurs.

26. Compte tenu de la distribution des gîtes connus dans la Zone, il faudra probablement des groupes distincts de blocs contigus pour englober tous les gîtes d'une zone d'exploration. L'utilisation de blocs contigus tel qu'elle est décrite dans le projet de règlement n'offrirait probablement pas à un contractant suffisamment d'opportunités pour envisager une exploitation pluriannuelle et il faudrait probablement plusieurs groupes de 100 blocs pour couvrir l'ensemble des zones favorables. Du fait de la dispersion des gîtes dans une zone donnée, un plan d'exploration couvrant 100 blocs contigus ne permettrait probablement pas de découvrir suffisamment de ressources pour une exploitation pluriannuelle. Il faudrait diviser les zones d'exploration en groupes de blocs non contigus pour que les blocs conservés s'étendent sur une zone suffisamment vaste pour contenir de telles ressources. Les 25 derniers blocs sélectionnés en vue de l'exploitation peuvent ne pas provenir d'une seule licence d'exploration initiale de 100 blocs. Dans la plupart des applications du modèle 1, on a dû laisser au moins un gîte en dehors de la zone d'exploration initiale et en restituer un autre pour conserver un groupe final de 25 blocs contigus. Le règlement devrait prévoir la possibilité d'attribuer des zones d'exploration suffisamment vastes et contenant un nombre suffisant de gîtes ou accorder d'autres droits durant la phase de prospection afin que les zones de prospection contiennent suffisamment de ressources exploitables. Il devrait être permis de demander à tout moment des licences d'exploitation et d'exploration portant sur des blocs non contigus.

## Références

Hannington (M.D.), de Ronde (C.E.J.) et Petersen (S.), 2005, *Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems: 100th Anniversary Volume of Economic Geology*, p. 111 à 142.

Hannington (M.D.), Jonasson (I.R.), Herzig (P.M.) et Petersen (S.), 1995, *Physical and chemical processes of seafloor mineralization*, in Humphris (S.), Fornari (D.) et Zierenberg (R.), édés., *Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions within Hydrothermal Systems: AGU Monograph*, vol. 91, p. 115 à 157.

Hannington (M.D.), Petersen (S.), Herzig (P.M.) et Jonasson (I.R.), 2004, *A global database of seafloor hydrothermal systems, including a digital database of geochemical analyses of seafloor polymetallic sulphides: Geological Survey of Canada Open File 4598*, CD-ROM.

Hannington (M.D.), Petersen (S.), Herzig (P.M.) et Jonasson (I.R.), 2002, *Global database of seafloor hydrothermal systems, including a geochemical database of polymetallic sulphides*, base de données compilée pour l'Autorité internationale des fonds marins de l'Organisation des Nations Unies, Dépôt central de données, version 1.0, 2002.

Herzig (P.M.) et Hannington (M.D.), 1999, *Recent advances in the study of polymetallic massive sulphides and gold mineralization at the modern seafloor*, in Cronan (D.S.), éd., *Handbook of Marine Mineral Deposits*: CRC Press, p. 347 à 368.

Herzig (P.M.) et Hannington (M.D.), 199, *Polymetallic massive sulphides at the modern seafloor: Ore Geology Reviews*, vol. 10, p. 95 à 115.

Herzig (P.M.), Petersen (S.) et Hannington (M.D.), 200, *Polymetallic massive sulphide deposits at the modern seafloor and their resource potential*, in *Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-rich Ferromanganese Crusts – Status and Prospects*: Autorité internationale des fonds marins de l'Organisation des Nations Unies, Étude technique n° 2, p. 7 à 35.

Herzig (P.M.), Petersen (S.) et Hannington (M.D.), 200, *Technical requirements for exploration and mining of seafloor massive sulphide deposits and cobalt-rich ferromanganese crusts*, in *Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-rich Ferromanganese Crusts – Status and Prospects*: Autorité internationale des fonds marins de l'Organisation des Nations Unies, Étude technique n° 2, p. 90 à 100.

Hein (J.R.), Kochinsky (A.), Bau (M.), Manheim (T.), Kang (J.-K.) et Roberts (L.), 199, *Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific*, in Cronan (D.S.), éd., *CRC Handbook of Marine Mineral Deposits*: CRC Press, p. 347 à 368.

Smith (W.H.F.) et Sandwell (D.T.), 199, *Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings: Science*, vol. 277, p. 1 962.

## Tableaux

Tableau 1. Événements hydrothermaux à haute température et gîtes de sulfures polymétalliques (Hannington et al., 2005)

Tableau 2. Analyse des zones favorables, nombre de gîtes de sulfures polymétalliques et espacement entre les gîtes dans 32 zones (de cinq degrés de côté)

## Figures

Figure 1. Distribution des événements hydrothermaux sur le fond marin et gîtes de sulfures polymétalliques (Hannington *et al.*, 2005). Les nombres renvoient aux gîtes du tableau 1. Les autres événements hydrothermaux à basse température, les encroûtements ferromanganésifères et d'autres sédiments métallifères sont indiqués par des cercles. Les principales dorsales actives et zones de subduction (arcs volcaniques et arrière-arcs) sont signalées.

Figure 2. Situation des zones économiques exclusives (les zones ombrées correspondent approximativement à la limite de 200 milles marins). La distribution des dorsales médio-océaniques dans la Zone est aussi indiquée.

Figure 3. Situation de 32 des zones de cinq degrés de côté examinées dans le présent document.

Figure 4. Application du modèle 1 à la dorsale centrale indienne. Cent blocs contigus de 10 kilomètres de côté ont été attribués pour l'exploration. Cette zone de 10 000 kilomètres carrés contient au moins un gîte de sulfures polymétalliques

connu ou une autre indication claire de minéralisation. La moitié de cette surface d'exploration est restituée durant la première phase d'exploration (cinq ans). Il reste alors 50 blocs contigus de 10 kilomètres de côté, soit 5 000 kilomètres carrés, contenant trois des cinq gîtes connus. Au stade final de l'exploration, on conserve 25 blocs contigus, soit 2 500 kilomètres carrés, contenant deux des gîtes connus. Dans ce modèle, deux gîtes ont été laissés en dehors de la zone d'exploration initiale et un troisième a dû être restitué afin de ne conserver que des blocs contigus dans la sélection finale de 25 blocs.

Figure 5. Application du modèle 2 à la même région que celle de la figure 4. Cent blocs non contigus de 10 kilomètres de côté, répartis en quatre groupes de 25 blocs, soit 2 500 kilomètres carrés chacun, contiennent sur une surface totale de 10 000 kilomètres carrés tous les gîtes de sulfures polymétalliques. Rien ne garantit que les blocs prometteurs seraient correctement identifiés durant la phase d'exploration, mais on peut raisonnablement supposer que les explorateurs pourront appliquer des critères qui leur permettront de choisir au mieux les groupes de blocs contenant des sulfures. La zone initiale d'exploration devra peut-être être dépasser largement 10 000 kilomètres carrés pour que tous les gîtes soient couverts durant la phase finale de l'exploration.

Figure 6. Distribution de la profondeur des événements hydrothermaux dans différentes configurations volcaniques et tectoniques (d'après Hannington *et al.* 2005, modifié d'après Massoth *et al.*, 2003).

## **Appendice 1 : articles pertinents du projet de règlement**

### **Article 12**

#### **Zone couverte par la demande**

1. La zone couverte par une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration ne doit pas être composée de plus de 100 blocs.
2. Dans le cas des sulfures polymétalliques ou des encroûtements cobaltifères, la zone d'exploration doit être constituée de blocs contigus. Aux fins du présent article, sont considérés comme contigus deux blocs qui se touchent en un point quelconque.
3. Nonobstant les dispositions du paragraphe 1 ci-dessus, lorsque le contractant a choisi de remettre un secteur réservé pour les activités devant être menées au titre de l'annexe III, article 9, de la Convention, conformément à l'article 17 du présent Règlement, la superficie totale de la zone couverte par sa demande est limitée à 200 blocs.

### **Article 17**

#### **Données et informations à fournir avant la désignation d'un secteur réservé**

1. Lorsque le demandeur choisit de remettre un secteur réservé, la zone couverte par sa demande doit être suffisamment étendue et avoir une valeur commerciale estimative suffisante pour permettre deux opérations d'extraction minière. Le demandeur divise les blocs sur lesquels porte sa demande en deux groupes de valeur commerciale estimative égale et composés de blocs contigus. Le secteur devant être

attribué au demandeur sera régi par les dispositions de l'article 27 du présent Règlement.

### **Article 27**

#### **Superficie du secteur et restitution**

1. Le contractant restitue les blocs qui lui ont été attribués, conformément aux paragraphes 2, 3 et 4 du présent article.

2. À la fin de la cinquième année suivant la date du contrat, le contractant doit avoir restitué :

a) 50 % au moins du nombre de blocs qui lui ont été attribués; ou

b) Si ces 50 % ne correspondent pas à un nombre entier, le nombre entier de blocs immédiatement supérieur.

3. À la fin de la dixième année suivant la date du contrat, le contractant doit avoir restitué :

a) 75 % au moins du nombre de blocs qui lui ont été attribués; ou

b) Si ces 75 % ne correspondent pas à un nombre entier, le nombre entier de blocs immédiatement supérieur.

4. À la fin de la quinzième année suivant la date du contrat, ou à la date à laquelle il présente une demande de droits d'exploitation, si cette date est antérieure, le contractant désigne 25 au maximum des blocs restants, qu'il conservera.

5. Les blocs restitués reviennent à la Zone.

6. Dans des circonstances exceptionnelles, le Conseil peut, à la demande du contractant et sur recommandation de la Commission, suspendre le calendrier des restitutions. Ces circonstances exceptionnelles sont déterminées par le Conseil et incluent notamment les circonstances économiques du moment ou d'autres circonstances exceptionnelles imprévues liées aux activités opérationnelles du contractant.

### **Appendice 2 : Paramètres modèles**

1. Un certain nombre de caractéristiques physiques des sulfures polymétalliques des fonds marins et des milieux géologiques où ils se trouvent sont considérés ici comme guide pour la sélection de zones de prospection. On trouvera ci-après une brève description des principaux paramètres utilisés pour les dorsales médio-océaniques. Un examen minutieux des autres configurations géologiques énumérées au tableau 1 déborde le cadre du présent document mais devrait être inclus dans toute autre étude sur l'exploration mondiale des sulfures polymétalliques des fonds marins. Pour plus de renseignements, le lecteur peut se reporter aux documents de synthèse de Hannington *et al.* (1995, 2005) et Herzig et Hannington (1995, 1999, 2000) sur le sujet. L'Étude technique n° 2 intitulée « Sulfures polymétalliques et encroûtements ferromanganésifères riches en cobalt : état et perspectives », publiée par l'Autorité internationale des fonds marins, fournit également des données complémentaires.

## 1. Considérations géologiques

2. Les dépôts de sulfures massifs sont le produit d'événements fumeurs noirs à haute température (350 °C) situés dans les zones volcaniques sous-marines actuellement en activité ou qui l'ont été récemment, y compris les dorsales médio-océaniques des grands fonds marins, les dorsales sédimentées, les monts sous-marins intraplaques, les arcs volcaniques et les zones d'affaissement au niveau de l'arc interne. Les précipités hydrothermaux consistent en des accumulations massives de minéraux métalliques, dont principalement la pyrite, la pyrrhotite, la chalcopyrite et la sphalérite, que l'on trouve au niveau et en dessous du plancher océanique autour des événements hydrothermaux. La plupart des accumulations de sulfures sont associées à une activité hydrothermale continue, mais quelque 20 % de ces sites ne sont plus en activité.

3. Environ 65 % des gîtes de sulfures connus se situent sur les dorsales médio-océaniques, le reste se trouvant dans des bassins d'arrière-arc (22 %), sur des arcs volcaniques sous-marins (12 %) et sur des volcans intraplaques (1 %). La répartition des événements est plus ou moins proportionnelle à la longueur des dorsales et des arcs; les dorsales médio-océaniques ont une longueur totale de 55 000 kilomètres, et les arcs insulaires et les bassins d'arrière-arc adjacents ont une longueur totale de 22 000 kilomètres. On trouve des sulfures dans différents substrats, dont le basalte des dorsales médio-océaniques, les roches ultramafiques intrusives et les laves plus évoluées associées aux arcs volcaniques, ainsi que dans des sédiments qui couvrent la croûte océanique et la croûte continentale. Les zones favorables à la présence de sulfures polymétalliques comprennent les zones de faille intense et d'éruption sous-marine, généralement détectables à l'aide de la bathymétrie régionale. Les fumeurs noirs sont plus abondants sur les dorsales médio-océaniques rapides, ce qui dénote le flux de chaleur élevé et le volcanisme volumineux du plancher océanique dans ce milieu. Cependant, les sulfures les plus abondants ne sont pas toujours associés aux vitesses d'expansion les plus rapides; les plus grands gîtes se trouvent dans des centres d'expansion moyenne et lente, dans les volcans situés dans l'axe des dorsales, dans les bassins d'arrière-arc profonds et dans les rifts sédimentés voisins des marges continentales. Le manque de connaissance sur les gîtes de sulfures dans certaines parties des océans (les régions polaires et l'océan Austral, par exemple) est dû essentiellement aux difficultés que présente la recherche marine sous ces latitudes. De récentes découvertes de panaches hydrothermaux et de sulfures massifs dans le Haut-Arctique et l'Antarctique confirment que l'activité hydrothermale sous-marine dans des zones océaniques éloignées est légèrement différente de celle observée ailleurs.

4. Dans la Zone, les dorsales médio-océaniques et les volcans intraplaques sont les reliefs volcaniques dominants qui abritent des sulfures polymétalliques (dorsale Est-Pacifique, dorsale médio-atlantique et dorsale centrale indienne, par exemple; voir fig. 1). Les différents types de dorsales médio-océaniques se distinguent par leur vitesse d'expansion et leur morphologie, qui varient selon les contraintes tectoniques régionales et les taux de production magmatique. Les dorsales rapides (dont la vitesse d'expansion totale est de 6 à 10 cm par an) se forment lorsque la croûte océanique est relativement mince et se caractérisent par d'abondantes éruptions volcaniques; les dorsales moyennes (4 à 6 cm par an) et les dorsales lentes (1 à 4 cm par an) se forment lorsque la croûte est relativement épaisse et se caractérisent, quant à elles, par un volcanisme intermittent qui se produit entre de longues périodes d'extension tectonique ou d'activité intrusive magmatique. Les

dorsales rapides représentent environ 25 % de la longueur totale des dorsales, tandis que 15 % de ces dernières sont classées comme dorsales moyennes et 60 % comme dorsales lentes. Les centres d'expansion ultra-rapide, comme la dorsale Est-Pacifique (jusqu'à 17 cm par an), et ultralente, comme les dorsales Arctique et centrale indienne (<1 cm par an), sont également connus. Le taux de production magmatique, la profondeur du magma subaxial et l'étendue de l'extension magmatique par rapport à l'extension tectonique influent sur l'ampleur et la vigueur de la convection hydrothermale sur les dorsales. Il y a une corrélation générale entre la vitesse d'expansion et l'incidence de l'activité hydrothermale, mais, comme indiqué précédemment, les plus grands gîtes de sulfures se trouvent habituellement là où les éruptions volcaniques sont épisodiques et alternent avec de longues périodes d'activité tectonique intense.

5. Les dorsales et les bassins d'arrière-arc sont segmentés physiquement à des échelles allant de dizaines à des centaines de kilomètres par diverses zones de relais, dont des failles transformantes, des centres d'accrétion en recouvrement et d'autres discontinuités non transformantes. Ces éléments ont une incidence sur la répartition de la chaleur magmatique et la circulation hydrothermale convective, formant des frontières naturelles dans les zones susceptibles d'être choisies pour l'exploration des sulfures polymétalliques. À l'échelle des segments des grandes dorsales, l'activité hydrothermale à haute température est fréquente le long des parties les plus creuses de la dorsale, au milieu des segments, tandis que le bout des segments est généralement dépourvu de magma et de chaleur.

6. Sur les dorsales rapides, comme la dorsale Est-Pacifique, la vitesse d'épanchement de la lave sur le plancher océanique est supérieure à la vitesse d'expansion, de sorte que les coulées s'accumulent pour former des hauteurs volcaniques localisées pouvant atteindre jusqu'à 100 mètres au-dessus du plancher océanique alentour. Les fissures éruptives occupent le plus souvent un graben axial étroit (de plus ou moins 1 km de large), qui n'est pas l'emplacement le plus courant pour les événements hydrothermaux. L'activité hydrothermale coïncide avec les zones d'éruption volcanique les plus récentes. Cependant, de fréquentes éruptions peuvent perturber l'écoulement des fluides hydrothermaux et enfouir les gîtes de sulfures qui se situent le long des fissures éruptives. En conséquence, les complexes de griffons dans les dorsales rapides tendent à être de petite taille (moins de quelques milliers de tonnes, poids sec) et les gîtes de sulfures peuvent être rapidement éloignés de leur source de chaleur par les taux d'expansion rapides.

7. Les centres d'expansion lente et moyenne, comme la dorsale médio-atlantique et la dorsale centrale indienne, se caractérisent par des taux de production magmatique inférieurs et une ascension plus structurée des fluides hydrothermaux que les centres d'expansion rapide. Les dorsales lentes, en particulier, se caractérisent par une vallée axiale large (jusqu'à 15 km) et profonde (jusqu'à 2 km) délimitée par des failles. Là, les éruptions ne se produisent que très rarement ou à des intervalles de centaines à des milliers d'années. Pour les dorsales les plus lentes, ces intervalles peuvent atteindre des dizaines de milliers d'années. Jusqu'à 1984, il était communément admis que l'activité hydrothermale sur les dorsales lentes serait limitée par le manque de chaleur magmatique à proximité du plancher océanique. Après la découverte du champ hydrothermal TAG à la dorsale médio-atlantique, il s'est avéré que les dorsales lentes pouvaient abriter certains des plus vastes systèmes hydrothermaux sous-marins qui pouvaient se situer bien en dehors de l'axe, là où le substrat est suffisamment stable pour supporter la formation de

monticules de sulfures pendant des centaines d'années, contrairement aux champs de griffons plus récents situés près de la zone néovolcanique qui n'ont pas eu le temps d'accumuler des sulfures massifs. L'activité hydrothermale sur les dorsales lentes se concentre habituellement le long des parois de la vallée du rift. En raison de la poussée qui s'exerce sur les fluides hydrothermaux, il n'est pas rare que l'activité hydrothermale à haute température se produise au sommet des hauteurs structurelles à de nombreux kilomètres du centre du rift. C'est pourquoi l'exploration des dorsales lentes doit s'étendre à de vastes zones voisines du rift.

8. Les volcans localisés hors de l'axe de la dorsale peuvent également se prêter à une activité hydrothermale. Ils se situent en général à une distance de 5 à 10 kilomètres des dorsales. Leur diamètre varie : de quelques kilomètres, il peut atteindre des dizaines de kilomètres. On connaît quelques grands gîtes de sulfures où ces volcans sont proches de la dorsale (à 13° au nord de la dorsale Est-Pacifique, par exemple). Cependant, la plupart des volcans localisés hors de l'axe ne se caractérisent que par des précipités d'oxyde de ferromanganèse à basse température, ce qui peut expliquer la petite taille des corps magmatiques ou l'absence de failles profondes associées à ce type de volcanisme.

9. La plupart des événements de la dorsale médio-océanique se situent entre 2 000 et 3 000 mètres de profondeur, mais beaucoup se forment également à des profondeurs atteignant 4 000 mètres (voir fig. 6 et tableau 1). Les événements les plus profonds se forment sur des centres d'expansion lente ou ultralente, d'où est absente la poussée au niveau de la croûte qui est associée à une forte production magmatique subaxiale. Cependant, à une échelle régionale, l'activité hydrothermale est essentiellement concentrée au sommet des édifices volcaniques (partie la plus creuse des centres d'expansion de la dorsale médio-atlantique; sommets des monts marins localisés hors de l'axe). Localement, on peut trouver des gîtes de sulfures dans des dépressions volcaniques ou tectoniques situées sur les hauteurs volcaniques (grabens du rift au sommet d'un segment de dorsale; caldeira au sommet des arcs volcaniques). Les flancs extérieurs, plus profonds, des dorsales ou des volcans se prêtent moins à une activité hydrothermale et sont moins susceptibles d'abriter des quantités notables de sulfures polymétalliques, sauf en présence de grandes structures qui concentrent l'ascension des fluides hydrothermaux.

10. Contrairement à ce qui se produit dans les zones où les encroûtements pourraient être exploités, la couverture sédimentaire ne doit pas dissuader l'exploration de sulfures polymétalliques, à moins qu'elle ne soit si épaisse qu'elle empêche les fluides hydrothermaux d'atteindre le plancher océanique. Cependant, on peut cibler en particulier certains milieux très sédimentés, comme les dorsales sédimentées et les marges de divergence, pour l'exploration de sulfures polymétalliques présents dans les sédiments, notamment lorsqu'il existe d'autres indicateurs de minéralisation (flux de chaleur élevé, présence d'activité hydrothermale dans le sous-sol océanique ou altération du sédiment). L'un des plus vastes gîtes de sulfures polymétalliques (celui de Middle Valley sur la dorsale de Juan de Fuca) est une zone presque entièrement recouverte par les sédiments où des manifestations hydrothermales sont toutefois évidentes et indiquent une minéralisation à proximité du sous-sol océanique. Dans les modèles retenus aux fins de la présente étude, la couverture sédimentaire ne figure pas parmi les milieux géologiques favorables, mais ce critère, associé à la présence ou à l'absence d'indicateurs hydrothermaux, sera probablement utilisé par les explorateurs lors de

la sélection des blocs à activité volcanique limitée qui seront dégagés des concessions au terme de la phase initiale d'exploration.

11. Dans de nombreuses zones d'activité volcanique et tectonique récente, le relief bathymétrique peut être caractéristique de processus magmatiques et hydrothermaux pouvant conduire à des concentrations de sulfures polymétalliques, mais aussi d'une extrême irrégularité ou d'une instabilité du sol qui peuvent faire obstacle à toute exploitation à venir. Les parois des grabens de rifts ou caldeiras des sommets d'édifices volcaniques d'activité récente sont par définition instables et accidentées, bien qu'on trouve parfois, dans le fond des rifts et des caldeiras, des surfaces planes où les sulfures polymétalliques peuvent s'accumuler. Généralement, le relief dans les centres d'expansion rapide atteint des dizaines à des centaines de mètres de haut sur une distance allant jusqu'à 1 kilomètre; dans les centres d'expansion lente, il peut s'élever à des centaines de mètres sur une distance d'un kilomètre. À certains endroits, des éruptions volcaniques continues peuvent entraver l'exploration ou l'exploitation des sulfures. À proximité de certains arcs volcaniques, la navigation est interdite en raison des dangers d'éruption.

## **2. Considérations diverses**

12. Les communautés biologiques associées aux événements hydrothermaux actifs sont généralement présentes dans les gîtes de sulfures polymétalliques ou à proximité. La réglementation peut interdire toute activité susceptible de les perturber, de sorte que, dès le début, une grande partie des dépôts connus de sulfures serait exclue de toute exploration commerciale. Les griffons de sulfures inactifs ne sont pas habituellement associés à des communautés biologiques vivantes et pourraient donc faire l'objet d'une exploitation, mais ils se forment souvent à proximité d'événements actifs (dans un rayon de 1 à 2 km) et sont presque toujours associés aux mêmes caractéristiques géologiques. Les activités perturbant les accumulations de sulfures inactives voisines de sites actifs auraient probablement des effets inconnus sur les systèmes actifs voisins et les communautés biologiques qui leur sont associées.

13. Sur certains sites, le matériel abandonné (câbles, dragues, matériel de pêche, instruments scientifiques) peut présenter un danger d'emmêlement. Ainsi, sur le monticule TAG, qui a été foré en 17 endroits différents sur un secteur de moins de 250 mètres, se trouvent de nombreux trous abandonnés, et même une tige de forage.

## **3. Superficie des zones d'exploration**

14. Le nombre escompté d'événements hydrothermaux à haute température et leur répartition sur les dorsales médio-océaniques limiteront l'étendue optimale de la zone d'exploration. En règle générale, on ne connaît pas l'espacement des événements, mais diverses mesures géophysiques donnent une indication du nombre d'événements sur les dorsales. Ainsi, la perte de chaleur des zones axiales des dorsales médio-océaniques à l'échelle mondiale est de l'ordre de  $1,8 + 0,3 \times 10^{12}$  watts (Mottl, 2003). Environ 10 % de cette chaleur est émise à la température des fumeurs noirs. À supposer que le flux de chaleur soit de 2 à 5 mégawatts pour un seul fumeur noir (débit d'émission de 1 à 2 kg/s : Converse *et al.*, 1984, par exemple), l'écoulement de fluides à haute température dans les fonds marins (10 % de  $1,8 + 0,3 \times 10^{12}$  W) équivaldrait à quelque 50 000 à 100 000 fumeurs noirs (soit au moins un fumeur noir pour 1 km de dorsale). Cependant, le nombre de fumeurs noirs répertoriés est extrêmement faible en comparaison et leur répartition est loin d'être uniforme. Un



seul champ d'événements de grande taille peut contenir jusqu'à 100 fumeurs noirs, dont l'émission totale de chaleur s'élèverait entre 200 et 500 mégawatts (Becker and Von Herzen, 1996, par exemple). Un champ d'événements situé tous les 50 à 100 kilomètres pourrait dès lors être responsable de l'émission de fluides à haute température estimée dans les dorsales médio-océaniques. Bien que cette estimation ne tienne pas compte des variations à grande échelle du flux de chaleur en fonction de la vitesse d'expansion et d'autres facteurs, elle constitue une indication préliminaire utile pour choisir la superficie d'une zone d'exploration le long d'un segment déterminé d'une crête de dorsale.

15. Des estimations indépendantes qui se fondent sur la répartition réelle des sites d'événements connus suggèrent que l'espacement des gîtes de sulfures le long des segments des dorsales médio-océaniques pourrait être assez régulier à l'échelle régionale. Il ressort d'une analyse de 100 gîtes de sulfures connus, dans 32 zones de 5 degrés sur 5 degrés retenues pour la présente étude, que l'espacement moyen entre les gîtes est de 98 kilomètres (voir tableau 2). Pour ceux qui se situent dans la Zone (n = 43), l'espacement moyen est de 95 kilomètres. L'espacement est plus important sur les dorsales lentes (167 km) que sur celles à expansion rapide (46 km), mais les gîtes situés sur les dorsales lentes sont en moyenne plus étendus.

16. Étant donné la dispersion des événements, il faudra peut-être attribuer des blocs en plusieurs lieux distincts, dans des zones favorables probablement non contiguës, ce qui demandera un travail d'évaluation considérable. Les zones non favorables pourraient être systématiquement restituées sur la période de 15 ans fixée dans le projet de règlement, mais il est plus probable que les explorateurs identifieront rapidement les gîtes les plus favorables et conserveront un nombre minimum de blocs non contigus. Cette possibilité est envisagée dans le modèle des blocs non contigus.

#### 4. Superficie des zones d'exploration

17. La superficie minimale des zones d'exploration est fonction de l'importance des découvertes qui pourraient y être faites et des caractéristiques géologiques de ces zones. Les gîtes de sulfures de grande taille sont généralement associés à des caractéristiques géologiques aisément repérables sur les levés bathymétriques (grabens ou caldeiras de quelques dizaines de kilomètres au maximum). Parmi les autres caractéristiques locales figurent les failles, les essaims de dykes, les lacs de lave et d'autres unités d'origine volcanique dont les dimensions sont comprises entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres. Des gîtes de sulfures épars peuvent prendre la forme de monticules isolés ou de groupes de cheminées et de monticules dont le diamètre est compris entre une dizaine et quelques centaines de mètres. Ils peuvent être distants de plusieurs centaines de mètres ou de plusieurs centaines de kilomètres et sont fréquemment séparés par des étendues de lave ou de sédiments stériles. Sur le segment Endeavour de la dorsale Juan de Fuca (fig. A1), 30 sites recelant des sulfures sont répartis entre huit champs hydrothermaux, dans un secteur de 10 kilomètres dans la vallée axiale. Les principaux champs hydrothermaux sont régulièrement espacés tous les 2 ou 3 kilomètres (fig. A2). Dans le champ hydrothermal TAG, les trois principaux monticules de sulfures massifs (TAG, MIR et Alvin) sont situés dans un secteur d'environ 25 kilomètres carrés (fig. A3). Compte tenu de ces observations, les secteurs de nature à être retenus pour une exploration plus poussée (levés bathymétriques haute résolution, photographie

des fonds marins et autres observations et échantillonnages) ne devraient pas dépasser 100 kilomètres carrés.

18. Sur la centaine de sites hydrothermaux à haute température et de gîtes de sulfures polymétalliques considérés dans la présente étude, seul un tiers environ présente une accumulation de sulfures polymétalliques d'un diamètre compris entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres (Hannington et divers collaborateurs, 1995; Fouquet, 1997). Les levés de ces zones sont pour la plupart incomplets et les dimensions qui ont été signalées englobent de vastes affleurements de sulfures non contigus et des substrats stériles entre les cheminées et les monticules. Il est difficile d'évaluer si les amas de sulfures sont contigus, même lorsqu'on dispose de levés très détaillés. Comme illustré par un certain nombre d'exemples, les estimations préliminaires fondées sur les parties affleurantes des gîtes ne permettent pas de déterminer avec précision la quantité de sulfures reposant sur le plancher océanique ou à faible profondeur. Ce n'est qu'en forant que l'on en saura un peu plus, encore que l'évolution des techniques géophysiques pourrait faciliter la tâche.

19. Lorsque les premiers sulfures polymétalliques ont été découverts dans le secteur de la dorsale de l'Explorer dans le Pacifique Nord-Est (fig. A1), les observations faites depuis un submersible ont permis d'estimer que le monticule le plus vaste faisait 250 mètres sur 200 mètres. De récents levés à haute résolution ont montré que le secteur était principalement constitué de lave recouverte de sédiments non contigus contenant des traces de fer et ne comptait que quatre groupes de cheminées de 50 mètres de diamètre, couvrant moins de 25 % de la superficie considérée initialement comme recelant des sulfures massifs (<<http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations>>). Lors du lever du gîte Sunrise, sur les flancs du volcan sous-marin Myojin Knoll, dans l'arc Izu-Bonin, on a signalé une zone de minéralisation en sulfures de 400 mètres sur 400 mètres (fig. A4). Partant du principe que le relief atteignait 30 mètres et que la masse volumique s'établissait à 1,9 gramme par centimètre cube, l'on a estimé que le gîte recelait une accumulation totale de 9 millions de tonnes de sulfures massifs (Iizasa et divers collaborateurs, 1999). Ce calcul repose sur trois hypothèses : i) on a estimé que les affleurements de sulfures couvraient la totalité de la zone étudiée (zone délimitée par des pointillés sur la carte), y compris les secteurs entre les crêtes et les monticules de sulfures qui sont dissimulés par les sédiments; ii) la totalité du relief observé correspondait à une accumulation de sulfures massifs sur un fond plat et non à des failles ou à des unités volcaniques souterraines (par exemple, des dômes de lave); iii) la masse volumique était uniforme et représentait la totalité du volume pris pour base dans les calculs. Dans la figure A4, les levés ont porté sur une distance linéaire de 5 kilomètres seulement pour l'ensemble de la zone délimitée (400 m x 400 m), soit une couverture visuelle inférieure à 30 % (dans le cas de levés effectués à partir d'un submersible ou au moyen de caméras remorquées, le champ de visualisation est limité à 10 m autour de la route suivie pendant le levé). Les affleurements de sulfures identifiables à l'œil nu, tels que les cheminées actives ou inactives, ne couvrent qu'un quart environ de la zone. Étant donné les limites inhérentes aux levés visuels et les incertitudes qui entourent les calculs, les estimations concernant le tonnage sont sujettes à caution.

20. Les forages fournissent des données suffisamment précises pour faire ensuite des extrapolations à partir d'observations réalisées en surface et estimer la continuité des affleurements de sulfures. Deux exemples de gîtes de sulfures

présents dans des sédiments illustrent l'importance du forage. À Middle Valley, sur la dorsale Juan de Fuca, et dans la dépression d'Escanaba, sur la dorsale Gorda, les fonds marins se caractérisent par de nombreux blocs de sédiments surélevés, de plusieurs centaines de mètres de diamètre et 50 mètres de haut. Des forages et d'autres levés détaillés ont révélé que la plupart de ces monticules étaient principalement constitués de filons-couches enfouis d'origine volcanique. Toutefois, le forage d'un monticule à Middle Valley (Bent Hill, dont la partie apparente fait 90 m sur 60) a traversé des sulfures massifs sur 95 m en dessous du plancher océanique; 300 mètres plus loin, on a également découvert qu'un deuxième monticule plus petit et recouvert de sédiments (le monticule ODP) était lui aussi principalement composé de sulfures massifs (David et divers collaborateurs, 1992). À l'inverse, le forage de monticules présentant des caractéristiques analogues à celles de la dépression d'Escanaba (270 m x 100 m) a montré que des sulfures massifs n'étaient présents que dans une toute petite zone entre 5 et 15 mètres de profondeur (Zierenberg et Miller, 2000).

21. Il n'a été possible de faire des estimations fiables concernant la taille des accumulations de sulfures que dans un petit nombre de cas, à savoir lorsqu'on dispose de données obtenues par forage. Dans le cas du monticule TAG (200 m x 45 m), sur la dorsale médio-atlantique, 17 trous forés à une profondeur maximale de 125 mètres ont indiqué la présence de 2,7 millions de tonnes de sulfures massifs ayant un pourcentage en masse de cuivre de 2 % et de 1,2 million de tonnes de minéralisation sous forme de stockwerks ayant un pourcentage en masse de cuivre de 1 % (Hannington et divers collaborateurs, 1998). Dans le cas des monticules Bent Hill et ODP, à Middle Valley, quatre forages en profondeur ont permis d'estimer que le tonnage combiné représentait entre 10 et 15 millions de tonnes (Fouquet et divers collaborateurs, 1998; Zierenberg et divers collaborateurs, 1998). Si l'on se fie aux surfaces visibles, il se pourrait que les autres gîtes les plus riches situés sur les dorsales médio-océaniques comprennent entre 100 000 et 1 million de tonnes, mais l'on ne dispose d'aucune donnée issue de forages. Toutefois, la grande majorité des gîtes de sulfures qui ont été repérés sont beaucoup plus petits. Le diamètre des structures individuelles et des monticules de sulfures dépasse rarement quelques dizaines de mètres et le tonnage se limite à quelques milliers de tonnes pour chacun d'eux. Sur la dorsale d'Endeavour, les 30 édifices de sulfures répartis sur 10 kilomètres totalisent 50 000 tonnes tout au plus. Pour la plupart, les gîtes de sulfures dans les ouvertures arrière-arc et les arcs volcaniques du Pacifique Ouest ressemblent par la taille à ceux des dorsales médio-océaniques.

22. Les estimations concernant le tonnage sont également sujettes à caution puisque l'on sait très peu de choses sur les propriétés physiques des monticules et des cheminées de sulfures. Hannington et ses collaborateurs (1998) sont partis d'une masse volumique comprise entre 3,5 et 4 pour calculer le tonnage du monticule TAG, se fondant pour ce faire sur les mesures réalisées à bord du navire d'observation à partir des carottes qui avaient été prélevées. Toutefois, la masse volumique sèche de cheminées, d'encroûtements et de sédiments prélevés en d'autres endroits est beaucoup plus faible. Les cheminées de la dorsale du Pacifique Est ont une masse volumique sèche comprise entre 1 et 2 grammes par centimètre cube et une teneur en eau *in situ* de 25 à 50 % (Crawford et divers collaborateurs). On peut s'attendre à trouver une masse plus élevée à l'intérieur des monticules par suite du compactage, du remplissage des espaces vides et de la recristallisation hydrothermale des sulfures, mais les résultats ne sont pas uniformes.

## 5. Comparaison avec les sulfures extraits à terre

23. Bien que l'on ne puisse estimer avec précision la quantité de sulfures présente dans les fonds marins, on s'attend à ce qu'elle se rapproche de celle de certains types de gisements de sulfures fossiles exploités à terre. Deux modèles semblent pouvoir être utilisés. Les gisements de sulfures massifs de type Chypre ont longtemps été considérés comme s'apparentant le plus aux sulfures polymétalliques qui se sont formés dans les dorsales médio-océaniques et dans les bassins d'arrière-arc matures (voir par exemple Hannington et divers collaborateurs, 1998, et les références qu'ils citent dans leur ouvrage), tandis que les gisements « kuroko » au Japon sont analogues aux sulfures polymétalliques présents dans les arcs volcaniques. Le recours à la méthode des analogues à des fins prédictives part du principe que les conditions de la formation des minerais ont été uniformes au fil des périodes géologiques, puisque les dépôts comportent des traces fossiles de tous âges. Il est peu probable que les éléments trouvés aujourd'hui dans les fonds marins présentent des caractéristiques très différentes par rapport à ce que nous connaissons des gisements terrestres. Il est donc vraisemblablement inutile de mettre au point des modèles concernant la teneur et le tonnage des sulfures polymétalliques propres aux fonds marins.

24. Les données relatives aux gisements de type Chypre donnent un tonnage médian de 1,6 million (fig. A5). Elles laissent à penser que les gisements sont importants parce que les tonnages et les teneurs ne sont connus ou signalés que lorsque les gisements ont une taille suffisante pour être exploités de façon commerciale. La vaste majorité des dépôts de sulfures sont soit trop petits soit d'une teneur trop faible pour être exploités, et de nombreux gisements de petite taille ne sont pas pris en compte dans les réserves annoncées. Les gisements de type Chypre comportent plus de 90 zones productives possibles mais non mises en valeur recelant moins de 100 000 tonnes chacune et probablement de nombreuses autres zones plus petites qui n'ont jamais été considérées comme prometteuses (voir Hannington et divers collaborateurs, 1998, et les références qu'ils citent dans leur ouvrage). Cette situation se rapproche de celle des nombreux cheminées et monticules isolés que l'on trouve dans des segments actifs des dorsales médio-océaniques. Lorsque les zones productives possibles mais non mises en valeur sont prises en compte, les courbes indiquent des tonnages nettement moins importants (fig. A5). Dans le cas des gisements de type Chypre, le tonnage médian est inférieur à 500 000 si l'on tient compte des dépôts considérés comme non rentables pour être exploités.

25. Lors de l'extraction des gisements « kuroko » au Japon, on a consigné avec précision les dimensions des corps minéralisés extraits. Sur les 44 gisements exploités dans le bassin d'Hokuroku, la superficie moyenne des corps minéralisés était de quelque 200 mètres sur 200 mètres (Tanimura et divers collaborateurs, 1983). Les réseaux de filons couvraient généralement moins de 100 kilomètres carrés et contenaient jusqu'à 10 corps minéralisés. Sangster (1980) a décrit le même genre de distribution des corps minéralisés dans des secteurs d'exploitation de sulfures massifs au Canada, qui recèlent en moyenne 12 gisements dans une zone de 84 kilomètres carrés. Dans ces secteurs, le gisement le plus important recèle en général entre 60 et 70 % de la totalité des réserves; le gisement le plus important après celui-là n'en contient qu'entre 10 et 20 %. Le suivant peut se trouver entre des dizaines et des centaines de kilomètres plus loin. Ces comparaisons peuvent servir à déterminer la superficie à retenir pour les zones d'exploration des sulfures

polymétalliques présents dans les fonds marins, mais il faut se souvenir que les zones représentées dans les secteurs miniers comportent généralement des gisements pour lesquels différentes couches stratigraphiques sont exposées (en d'autres termes, le nombre de gisements exposés sur terre sur des surfaces érodées risque d'être plus élevé que sur des fonds marins plats).

26. La répartition des gîtes de sulfures par taille dans la plupart des zones des fonds marins laisse à penser que des taux d'exploitation comparables à ceux des mines terrestres conduiraient à un épuisement des ressources en un an dans un secteur d'une superficie de 2 500 kilomètres carrés. Sauf en de très rares cas, il faudrait rechercher de nouvelles ressources ailleurs si l'on souhaite poursuivre l'exploitation pendant plusieurs années.

## 6. Comparaison avec l'exploration commerciale des fonds marins dans les zones économiques exclusives

27. Les licences d'exploration commerciale octroyées à deux sociétés (Nautilus Minerals dans la partie orientale du bassin Manus, en Papouasie-Nouvelle-Guinée, et Neptune Minerals dans la région de l'arc des Tonga-Kermadec, en Nouvelle-Zélande) montrent clairement les limites des différents modèles d'exploration et du choix des blocs attribués. Les premières licences de prospection de Neptune Minerals en Nouvelle-Zélande portaient sur 33 000 kilomètres carrés en 1999 et ont été ramenées à une concession de 7 790 kilomètres carrés (24 %) en 2003. Les licences d'exploration octroyées à Nautilus Minerals en Papouasie-Nouvelle-Guinée en 1996 couvraient 15 000 kilomètres carrés au total en 1996, mais les deux sites les plus prometteurs actuellement explorés dans la partie orientale du bassin Manus se trouvent dans une zone de 2 500 kilomètres carrés (17 %). Dans le cas des secteurs attribués tant à Neptune Minerals qu'à Nautilus Minerals, il n'aurait pas été possible de couvrir tous les gîtes de sulfures connus au moyen d'une seule licence d'exploration englobant 100 blocs contigus (fig. A6).

## Appendice 2 : Chiffres

1. Figure A1. Exemple d'une zone de 5 degrés sur 5 degrés dans le Pacifique Nord-Est (courbes de niveau équidistantes de 1 000 m) chevauchant la dorsale Juan de Fuca, et emplacements des sulfures polymétalliques repérés sur la dorsale Southern Explorer, à Middle Valley, et sur la dorsale Endeavour.

2. Figure A2. Carte de la dorsale Endeavour (30 minutes sur 30 minutes d'arc et courbes de niveau équidistantes de 100 m) qui indique l'emplacement de gîtes isolés de sulfures, à 2 ou 3 kilomètres les uns des autres.

3. Figure A3. Répartition des gîtes de sulfures dans le champ hydrothermal TAG, sur la dorsale médio-atlantique (Humphris et divers collaborateurs, 1995). Les trois principaux monticules de sulfures massifs (TAG, MIR et Alvin) sont situés dans une zone d'environ 25 kilomètres carrés.

4. Figure A4. Carte montrant les levés du gîte Sunrise effectués au moyen d'un engin submersible, sur les flancs du volcan sous-marin Myojin Knoll, dans l'arc Izu-Bonin (Iizasa et divers collaborateurs, 1999). La zone de minéralisation en sulfures cartographiée mesure 400 mètres sur 400 mètres. Compte tenu du fait que le relief atteignait 30 mètres et que la masse volumique s'établissait à 1,9 gramme par

centimètre cube, l'on a estimé que le gîte recelait une accumulation totale de 9 millions de tonnes de sulfures massifs. Toutefois, dans le cas de levés effectués à partir d'un submersible ou au moyen de caméras remorquées, le champ de visualisation est limité à 10 mètres autour de la route suivie pendant le levé. Comme indiqué sur la carte, les levés ont porté sur une distance linéaire de 5 kilomètres seulement pour l'ensemble de la zone délimitée (400 m x 400 m), soit une couverture visuelle inférieure à 30 %. Les affleurements de sulfures identifiables à l'œil nu, tels que les cheminées actives ou inactives, ne couvrent qu'un quart environ de la zone. Étant donné les limites inhérentes aux levés visuels, l'absence de données issues de forage et le fait que les sulfures ne se sont pas formés sur une surface plane, les estimations concernant le tonnage sont sujettes à caution.

5. Figure A5. Tonnage de 49 gisements de sulfures massifs de type Chypre, avec indication de la taille des gisements. Le tonnage médian (50<sup>e</sup> centile) s'établit à 1,6 million. Les données ont été établies par Singer et Mosier (1986) et ne portent que sur les gisements d'une taille jugée suffisante pour être exploités de façon commerciale ou pour lesquels des réserves ont été signalées. La vaste majorité des dépôts de sulfures sont soit trop petits soit d'une teneur trop faible pour être exploités, et de nombreux gisements de petite taille ne sont pas pris en compte dans les réserves annoncées. Les gisements de type Chypre comportent plus de 90 zones productives possibles mais non mises en valeur recelant moins de 100 000 tonnes chacune (voir Hannington et divers collaborateurs, 1998, et les références qu'ils citent dans leur ouvrage) et probablement de nombreuses autres zones plus petites qui n'ont jamais été considérées comme prometteuses. Lorsque les zones productives possibles mais non mises en valeur sont prises en compte, les courbes indiquent des tonnages nettement moins importants. Dans le cas des gisements de type Chypre, le tonnage médian est inférieur à 500 000 si l'on tient compte des dépôts qui n'ont pas été exploités.

6. Figure A6. Exemples de licences d'exploitation commerciale en Papouasie-Nouvelle-Guinée et en Nouvelle-Zélande. Les premières licences de prospection de Neptune Minerals en Nouvelle-Zélande (A) portaient sur 33 000 kilomètres carrés en 1999 et ont été ramenées à une concession de 7 790 kilomètres carrés (24 %) en 2003 (<[www.neptuneminerals.com](http://www.neptuneminerals.com)>). Les licences octroyées à Nautilus Minerals en Papouasie-Nouvelle-Guinée (B) en 1996 couvraient 15 000 kilomètres carrés au total en 1996, mais les deux secteurs les plus prometteurs actuellement explorés dans la partie orientale du bassin Manus se trouvent dans une zone de 2 500 kilomètres carrés (17 %) (<[www.nautilusminerals.com](http://www.nautilusminerals.com)>). Dans ces exemples, il n'aurait pas été possible d'englober dans une seule concession tous les gîtes de sulfures connus si l'on avait appliqué le système de licences d'exploration fondées sur 100 blocs contigus (voir également appendice 3).

### **Appendice 3 : Cartes de 32 zones considérées comme favorables à la présence de sulfures polymétalliques**

1. Trente-deux zones de 5 degrés sur 5 considérées comme favorables à la présence de sulfures polymétalliques ont été choisies. L'on a décidé arbitrairement de limiter les zones à prospecter à des secteurs de 5 degrés sur 5 dont on savait qu'ils recelaient au moins un gîte de sulfures ou des signes certains de minéralisation. Une grille comportant des mailles de 0,1 degré a été superposée sur chaque carte dans les zones considérées comme favorables à la présence de sulfures

polymétalliques et où l'exploration était envisageable. Les mailles correspondaient approximativement à des blocs de 10 kilomètres sur 10 (0,1 x 60 nm x 1 852 km = 11,11 km). Pour plus de facilité, les degrés décimaux sont utilisés pour repérer les emplacements des sulfures. Dans chaque cas, le positionnement de la grille vise à recouvrir toutes les zones favorables, compte tenu des caractéristiques géologiques de chaque zone, comme exposé dans le présent document. Dans les modèles présentés dans ce document, la superficie des secteurs favorables correspond approximativement à 20 fois la taille des blocs attribués à la fin d'un cycle d'exploration de 15 ans (20 x 25 blocs).

#### **Appendice 4 : Cartes de 12 zones d'exploration**

1. On a mesuré des zones d'exploration types fondées sur des cartes recouvrant un secteur de 5 degrés sur 5, avec des courbes de niveau équidistantes de 1 000 m, pour 12 études de cas dans la Zone. Des modèles sont présentés afin d'illustrer comment l'on peut diviser ces zones de façon à attribuer le nombre minimal de blocs d'exploration en se fondant sur le calendrier de restitution proposé dans le projet de règlement (50 % du secteur attribué sont restitués à la fin de la cinquième année, 75 % sont restitués à la fin de la dixième année, et 25 blocs au maximum sont conservés par le contractant à la fin de la quinzième année).

#### **Appendice 5 : Cartes détaillées de certaines zones, avec des courbes de niveau équidistantes de 100 mètres**

1. Une série de cartes couvrant un secteur de 30 minutes sur 30 minutes d'arc (courbes de niveau équidistantes de 100 m) illustre le choix de zones favorables pour lesquelles on dispose de données bathymétriques plus détaillées. Les données présentées proviennent de la base de données de bathymétrie multifaisceaux du National Geophysical Data Center des États-Unis (<<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/multibeam.html>>). Les cartes peuvent servir à réduire de façon notable la superficie initiale des zones favorables, mais l'on ne dispose pas de données pour tous les secteurs.