

Les ressources minérales

du futur sont-elles au fond des mers ?

« Il existe au fond des mers des mines de zinc, de fer, d'argent, d'or, dont l'exploitation serait très certainement praticable. »
Jules Verne – *Vingt mille lieues sous les mers*, 1869

L'humanité a un besoin vital de découvrir de nouvelles ressources naturelles exploitables, en raison de la croissance démographique mondiale et de la demande économique de pays émergents fortement peuplés tels que la Chine et l'Inde. Tout comme les énergies, les ressources minérales sont un élément clé du développement des économies industrielles et ne sont pas davantage renouvelables. L'envolée du cours des matières premières et des métaux nous incite à rechercher de nouveaux gisements (Figure 1).

La plupart des gisements riches ou faciles d'accès ont déjà été exploités sur les continents. Ainsi la teneur des gisements terrestres de cuivre a progressivement diminué de 3 à 0,5 % en un siècle. Pendant ce temps, des explorations scientifiques menées depuis près de trente ans ont identifié dans les océans divers types

de concentrations minérales, que nous commençons maintenant à apprécier pour leur intérêt économique.

L'immense domaine qu'est l'océan, couvrant les deux tiers de la planète (60 % au-delà de 2000 mètres de profondeur), est encore relativement inconnu, alors que ses richesses pourraient très bientôt devenir précieuses pour répondre aux besoins mondiaux en énergie et matières premières.

1 L'océan, un Eldorado pour les ressources du futur ?

Au cours des explorations scientifiques des grands fonds, ont été identifiés plusieurs dépôts métalliques revêtant des formes très caractéristiques, que l'on a nommés **nodules polymétalliques**, **encroûtements cobaltifères** ou dépôts de **sulfures hydro-**

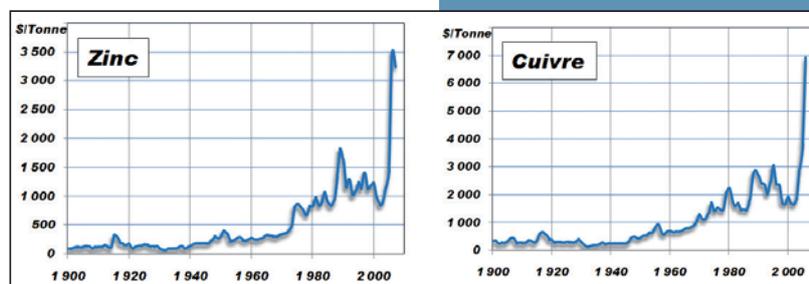


Figure 1

Depuis 2004, les cours de la plupart des métaux, notamment le zinc et le cuivre, connaissent une envolée brutale, sans précédent dans l'histoire industrielle.

thermaux. Ont été également identifiées des ressources énergétiques potentielles originales telles que des **hydrates de gaz** et de l'**hydrogène naturel** (leur histoire est retracée dans le Chapitre de J.-L. Charlou). Ces découvertes ont ouvert de nouvelles frontières pour la recherche et l'exploitation de ressources minérales et énergétiques dans les océans. En regardant de près les gisements marins, on a pu mettre en évidence la présence d'une multitude de métaux, très différents d'un minerai à l'autre : fer, manganèse, cuivre, zinc, or, argent, cobalt, plomb, baryum, platine, titane, cérium, zirconium, molybdène, tellure, mais aussi des éléments plus rares : cadmium, indium, sélénium, antimoine, mercure... et qui pourraient devenir intéressants à exploiter.

Depuis quelques années, l'industrie minière mondiale commence effectivement à se pencher sur ces ressources potentielles marines. Encore mal connues, ces dernières naissent en fait au cours de processus géologiques et géochimiques spécifiquement sous-marins, qui n'ont pas d'équivalent dans le domaine aérien, sur la croûte continentale. D'une part, la salinité de la mer facilite la mise en solution et le transport des métaux sous une forme dissoute. D'autre part, on sait que la température d'ébullition de l'eau augmente avec la pression et donc avec la profondeur : ainsi, à 3000 mètres de profondeur, la pression est voisine de 300 bars et la température d'ébullition de l'eau dépasse 400 °C, au lieu

de 100 °C au niveau de la mer. La combinaison de ces deux facteurs contribue aux processus de concentration des métaux, lesquels tendent alors à s'accumuler à des profondeurs peu accessibles, posant des difficultés d'exploitation. Dans le cas des nodules polymétalliques, des encroûtements cobaltifères et des sulfures hydrothermaux, les métaux se déposent directement sur le plancher océanique, ce qui faciliterait leur « ramassage » tout en limitant les incidences possibles sur l'environnement, si l'on en vient à les exploiter un jour.

Un autre facteur qui nous encouragerait à nous tourner vers ces gisements marins est la facilité à déplacer des installations spécifiques sur un navire. Celles-ci poseraient moins de difficultés que les installations minières terrestres, dont le déplacement est difficile et coûteux.

Le défi est lancé. Il faut d'abord comprendre précisément les processus géologiques et chimiques mis en jeu dans la concentration des métaux au fond des océans, et déterminer ensuite la richesse des dépôts métalliques, avant d'étudier enfin la faisabilité de leur exploitation. Géologues, chimistes et biologistes s'associent dans des efforts de cartographie (localisation et inventaire) et d'études environnementales, préoccupation largement partagée au niveau mondial. Chaque ressource minérale de la mer est un défi en soi, chacune ayant son histoire, ses particularités et ses mystères pour l'homme. On en dénombre actuellement huit principaux

types (*Figure 2*), répartis sur différents niveaux :

- les minéralisations de faible profondeur (< 250 mètres) faisant déjà l'objet d'exploitations ;
- les minéralisations de grande profondeur (> 1 000 mètres),

qui commencent à attirer notre attention.

Plongeons dans les profondeurs sous-marines et découvrons chacune de ces ressources, du plateau continental aux grands fonds océaniques.

Figures 2 et 3

Les principaux types de ressources minérales océaniques.

Type	Localisation	Matière première exploitable	profondeur	Statut minier	Intérêt économique
1- Sel	Côtier	Sel	rivage	opérationnel	modéré
2-Sables et graviers	Littoral	Sable et gravier	Peu profond	opérationnel	élevé
3- Diamants	Marge continentale	Diamants	< 250 m	opérationnel	élevé
4-Placer marins	Plages, eaux peu profondes	Etain, or, chrome, zirconium, terres rares, titane	Peu profond	opérationnel	modéré
5- Phosphates	Eaux peu profondes et anciens volcans	Phosphate	Peu profond à profondeur moyenne	à non opérationnel	faible
6- Nodules	Grandes plaines abyssales	Cuivre, Cobalt, Nickel,	4500m à 5500 m	ressources potentielles	modéré
7-Croûte de manganèse	Anciens volcans intraplaques	Cobalt, Cuivre, Platine	1000m à 2500m	ressources potentielles	Modéré à élevé
8-Sulfures hydrothermaux	Rides volcaniques	Cuivre, Zinc, Argent, Or, Cobalt, Plomb	1000 à 4000m	ressources potentielles	élevé

	Nodules		Encroutements		Sulfures hydrothermaux		
	Clipperton	Pacifique	Pacifique	Polynésie	SW pacifique	Est Pacifique	Atlantique
%							
Fer	6,90	12,70	15,99	15,08	11,22	25,45	27,64
Mn	25,40	18,50	21,95	19,48	0,18	0,05	0,04
Cuivre	0,82	0,42	0,09	0,27	3,48	3,85	8,49
Zinc	0,14	0,09	0,07	0,06	16,28	10,46	6,64
Cobalt	0,24	0,24	0,69	0,79	0,00	0,04	0,11
Nickel	1,28	0,63	0,41	0,38	0,00	0,00	0,02
Titane	0,53	0,78	1,20	0,93	-	-	-
Soufre	-	-	-	-	21,46	33,34	31,59
Baryum	0,28	0,20	0,18	0,14	12,19	1,99	3,35
Silice	7,60	8,80	4,14	2,40	14,84	11,48	8,24
grammes/tonnes							
Plomb	450	820	1626	1163	14493	1180	450
Platine	0,10	0,10	0,64	1,05	-	-	-
Or	-	-	-	-	2,44	0,61	3,40
Argent	<0,2	<0,2	<0,2	<10	404	115	81
Arsenic	159	159	272	248	1484	351	211
Cérium	530	530	1605	702	-	-	-
Molybdène	520	360	442	307	132	103	55
Zirconium	350	620	618	484	-	-	-

2 Les ressources minérales océaniques du plateau continental

Toute substance minérale concentrée par des processus géologiques et qui pourrait être utilisée par l'homme peut être considérée comme ressource minérale. Comme ressource largement exploitée, on peut citer le sel et les granulats marins, qui représentent une activité très importante et dont l'exploitation est ancestrale et les techniques bien au point.

Actuellement, plusieurs réserves de ressources minérales sont connues à de faibles profondeurs d'eau : les placers¹, les diamants et les phosphates.

2.1. Les placers de minéraux lourds

Certains minéraux de forte densité sont extraits des roches continentales lors des processus d'altération, puis ils sont entraînés par les fleuves pour finir dans les océans sous forme de « placers », dans les formations sédimentaires.

On trouve ces placers sur les plages côtières et le plateau continental, et on les exploite pour l'étain (7 % de la production mondiale), l'or, le platine, le titane, le chrome, le zirconium et les terres rares. La Malaisie, premier producteur mondial d'étain, extrait 30 % de sa production des placers

1. Accumulations de minéraux lourds dont les éléments ont été détachés par érosion des sources primaires de minéralisation et concentrés par des processus de sédimentation faisant intervenir divers agents comme la gravité, l'eau, le vent et la glace.

sous-marins. En Thaïlande et en Indonésie, 50 % de la production d'étain proviennent de l'océan.

2.2. Les diamants

Des zones diamantifères sont exploitées au large de la Namibie et de l'Afrique du Sud. L'exploitation s'effectue entre 200 et 400 mètres de profondeur. Depuis le début des années 1990, la société De Beers possède le quasi monopole de l'extraction des diamants au large de l'Afrique et extrait 50 % de sa production à partir des gisements sous-marins.

2.3. Les phosphates

Des restes d'organismes marins s'accumulent dans les sédiments et forment des « nodules de phosphate ». Ces boules s'accroissent de 1 à 10 millimètres en 1 000 ans et atteignent des concentrations de 12 à 18 % en phosphates.

Ces dépôts de phosphates se forment sur des terrasses sous-marines, dans des zones de forte productivité liée à des upwellings². Ces formations se trouvent généralement dans des fonds inférieurs à 1 000 mètres dans les régions tropicales. La plupart des dépôts sont d'âge miocène (il y a 5 à 23 millions d'années).

Le phosphore est un nutriment nécessaire à la croissance de tous les organismes vivants.

2. Un « upwelling » est une remontée d'eau qui se produit lorsque de forts vents marins poussent l'eau de surface des océans, laissant ainsi un vide où peuvent remonter les eaux de fond, et avec elles une quantité importante de nutriments.

Sa consommation mondiale annuelle est de 150 millions de tonnes. Les réserves connues représentent environ une cinquantaine d'années de consommation. En 2007, un permis d'exploration a été lancé par la société Bonaparte sur ce type de dépôt au large de la Namibie. Les nodules de phosphates s'y trouvent à des profondeurs comprises entre 150 et 300 mètres. La découverte d'un gisement suffisamment riche – de l'ordre de 50 millions de tonnes de sédiments contenant entre 10 et 15 % de phosphates – permettrait une exploitation rentable pendant une vingtaine d'années.

3 Les ressources minérales potentielles des grands fonds océaniques

Par grande profondeur, au-delà de 1000 mètres, on rencontre de toutes autres sortes de gisements : les nodules polymétalliques, les encroûtements cobaltifères et les sulfures hydrothermaux (voir Figures 2 et 3). Que sont ces minerais qui nous attirent ainsi ?

3.1. Les nodules polymétalliques, ces boules au fond de la mer

Des concrétions rocheuses en forme de boules sombres de quelques centimètres de diamètre (Figures 4, 5 et 6) ont été découvertes sur le plancher océanique. Ces « nodules » de la mer ont vite révélé leur contenu métallique : manganèse, nickel ou cuivre..., ce qui en fait une réserve minérale potentielle.



3.1.1. Immersion dans l'univers des nodules

Les premiers nodules polymétalliques furent récoltés par faible profondeur dans la mer de Kara en 1868. Peu de temps après, entre 1873 et 1876, le navire britannique *Challenger* découvrit que les nodules étaient communs dans les grands fonds océaniques ; on en a même trouvé plus récemment dans quelques lacs ! Leur intérêt a été souligné dès les années 1950, car leur teneur en divers métaux s'est avérée égale ou supérieure à celles des principaux gisements terrestres ; par exemple, les concentrations en **nickel** sont au moins égales à celles des gisements de latérites³, celles du **cuivre** supérieures à celles des grands gisements de porphyre cuprifère exploités à terre (0,5 % de cuivre) et celles du **cobalt** comparables à celles trouvées sur terre.

Bien que communs, les champs de nodules ne présentent pas tous le même intérêt, car leur abondance et leur richesse en métaux varient

3. La latérite (du latin *later* = brique) est une roche rouge ou brune. Elle constitue un produit commun de l'altération des roches continentales sous les climats tropicaux. Elle tient sa couleur de la présence d'oxyde de fer.

Figure 4

Un champ de nodules polymétalliques dans le Pacifique Nord. Clarion-Clipperton, zone du permis minier français.



Figure 5

Un nodule du Pacifique.



Figure 6

Coupe dans un nodule montrant les zones concentriques de croissance.

énormément. Dès 1973, des champs particulièrement denses et à haute teneur en métaux intéressants ont été découverts le long d'une ceinture est-ouest du Pacifique Nord, dans la zone Clarion-Clipperton.

Les nodules reposent toujours dans un environnement sédimentaire constitué d'argiles rouges, de boues siliceuses à radiolaires⁴, ou de boues carbonatées à foraminifères⁵. Ces sédiments, toujours très chargés en eau, reposent sur une croûte volcanique présentant un relief caractéristique de 100 à 300 mètres de haut, allongé nord-sud sur plusieurs dizaines de kilomètres, et qui s'était formé à l'axe de la dorsale Pacifique il y a 30 à 40 millions d'années. Cette topographie en rides et vallées parallèles permet le déplacement secondaire des particules par le jeu des courants ou de la gravité, et génère localement des zones à faible taux de sédimentation dans lesquelles les nodules peuvent se former. Les sédiments eux-mêmes, constitués de poussières d'origine continentale et de squelette d'organismes planctoniques, s'accumulent très lentement (3 à 10 millimètres par milliers d'années). Or, la formation de nodules, encore plus lente, se fait essentiellement dans ces zones à faible vitesse de

sédimentation et au relief très particulier, ce qui explique une disposition régionale discontinue des champs de nodules.

3.1.2. Comment se forment les nodules ?

La croissance des nodules, déterminée par datation radiochronologique, est particulièrement lente, même pour un phénomène géologique : de l'ordre du millimètre par million d'années ! Il semble bien exister un taux de sédimentation optimal pour la formation des nodules, une étroite fourchette entre 2 et 10 mm tous les mille ans : en dessous, seuls des encroûtements hydrogénés se forment ; au-dessus, on passe d'un sol marin à un sédiment, inapte à la formation de nodules. On a pu aussi noter des corrélations entre vitesse de croissance des nodules et variations climatiques, la croissance pouvant même s'arrêter pendant les périodes glaciaires.

La plupart des modèles actuels admettent une origine exclusivement sédimentaire des nodules. Mais est-ce aussi simple ? La vie marine à toutes les échelles de temps joue-t-elle un rôle dans la genèse des nodules ?

Quatre sources chimiques d'éléments particulières ou dissous ont été avancées comme étant à l'origine de la formation de ces nodules : les poussières volcaniques (sans nécessité de volcanisme actif), les apports continentaux par les fleuves, les sources hydrothermales (voir plus loin au paragraphe 3.3 *l'encart « Les paysages des*

4. Un radiolaire est un protozoaire (animal unicellulaire) des mers chaudes, dont le squelette est à base de silice.

5. Un foraminifère est un protozoaire à squelette calcaire, vivant à la surface de la mer (espèce pélagique) ou dans les eaux profondes (espèce benthique).

fonds marins ») et les organismes d'origine planctonique. On note par exemple que les nodules les plus riches sont issus de la « dissolution » de tests⁶ d'organismes à base de silice : il existe donc un lien entre productivité planctonique en surface et formation des nodules sur le fond. D'ailleurs, la quantité d'éléments nécessaires à leur formation est pratiquement disponible à partir des seuls résidus planctoniques qui s'accumulent dans le sédiment ! Des fragments d'organismes servent même souvent de point de départ – de « nucleus » – pour la formation des nodules. Enfin, par leur implication dans les processus d'oxydo-réduction, les micro-organismes jouent certainement un rôle important dans les processus de dissolution, de mise en solution puis de précipitation des métaux concentrés dans les nodules, dissolution de carbonates ou précipitation d'oxydes de manganèse et de fer.

En définitive, il n'y a pas plusieurs phénomènes fondamentaux en jeu dans la genèse et la croissance des nodules, mais des nodules qui ont des histoires géologiques différentes. Outre les phénomènes physiques de sédimentation, il semble bien que la vie, la dynamique des plaques lithosphériques et les variations climatiques globales jouent un rôle essentiel.

6. Le test d'un organisme marin est sa pellicule protectrice minérale.

LES NODULES : DU FER, DU MANGANÈSE ET DE L'EAU

Les couches concentriques constituant les nodules renferment principalement des hydroxydes de manganèse et de fer. Les processus d'oxydation des ions ferreux Fe^{2+} et manganèse Mn^{2+} jouent un rôle central dans la formation des nodules :



Outre les composés amorphes d'oxyhydroxyde de fer ($\text{FeOOH}_{(\text{aq})}$), deux formes cristallines d'oxyde de manganèse sont présentes : la birnessite et la todorokite.

Les couches les mieux cristallisées sont les plus riches en nickel et en cuivre, insérés dans les réseaux cristallins d'hydroxydes de manganèse et de fer.

3.1.3. La composition des nodules

Les nodules polymétalliques sont constitués de couches concentriques correspondant à des phases de croissance successives autour d'un noyau central (*voir la Figure 6*). Ce noyau est souvent constitué d'anciens nodules, de fragments rocheux (basalte, calcaire), de restes d'animaux et parfois de dents de requins ! Les nodules sont principalement constitués de fer, de manganèse et d'eau (40 %) (*Encart « Les nodules : du fer, du manganèse et de l'eau »*).

Dans les nodules du Pacifique, la concentration moyenne est de 0,42 % en cuivre, 0,63 % en nickel, 0,24 % en cobalt et 18,50 % en manganèse. La zone Clarion-Clipperton est particulièrement riche en cuivre (0,82 %), nickel (1,28 %) et manganèse (25,40 %) (*voir la Figure 3*). Des estimations récentes sur cette seule zone, d'une surface d'environ 9 millions de km^2 (soit 15 % des fonds du Pacifique situés entre 4 000 et 5 000 mètres de fond), donnent un poids de nodules de

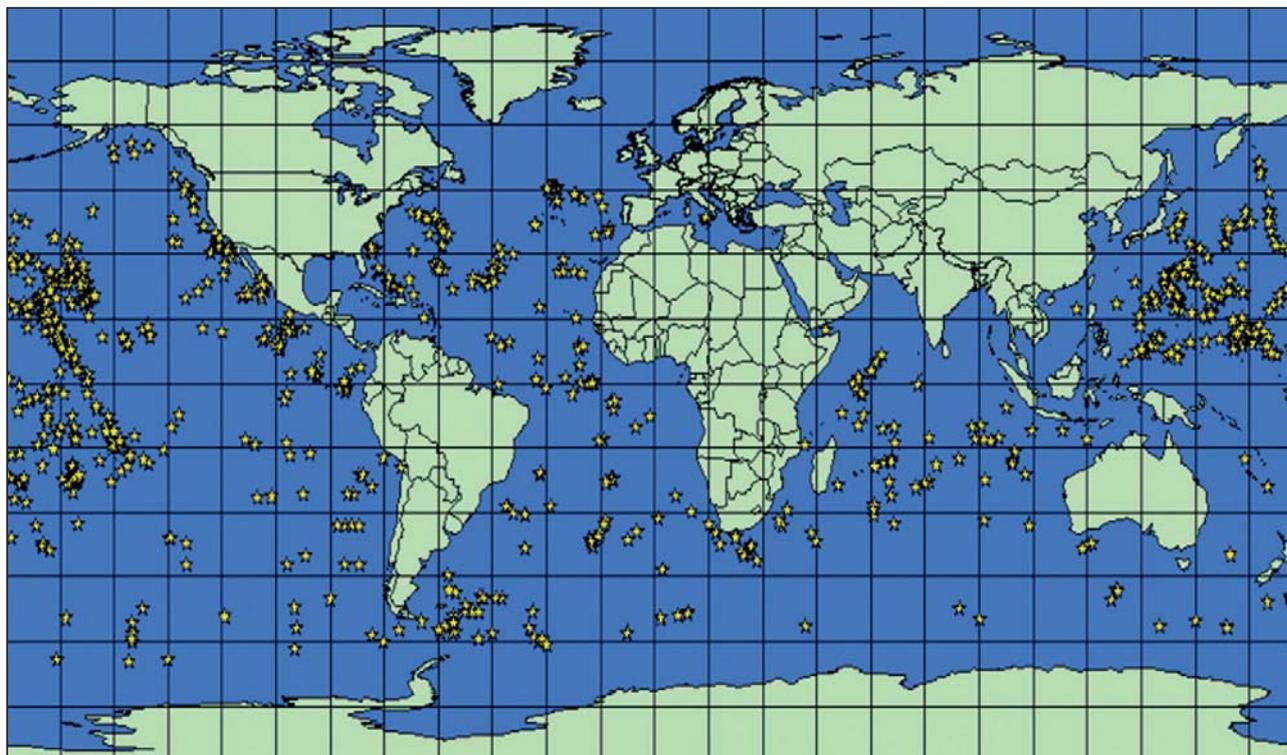


Figure 7

La plupart des substrats durs des grands fonds océaniques sont recouverts d'encroûtements ferro-mangnésifères (points jaunes).

l'ordre de 34 milliards de tonnes, soit 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt.

Tous les nodules ne sont pas identiques et l'on distingue deux grands types morphologiques :

- les **nodules à surface lisse**, générés à partir des éléments contenus dans l'eau de mer (origine purement « hydrogénétiq ue ») : ils reposent sur le sédiment et sont pauvres en manganèse ($Mn/Fe < 2,5$) ;
- les **nodules à surface rugueuse**, générés à partir d'éléments contenus dans le sédiment (« diagénétiq ues ») : partiellement enfouis, ils sont riches en manganèse ($Mn/Fe > 4$).

Et il existe même des nodules de type « mixte » : ils présentent une surface supérieure lisse d'origine hydrogénétiq ue et une surface inférieure rugueuse d'origine diagénétiq ue.

3.1.4. Exploiter les nodules polymétalliques ?

Les nodules renferment des quantités de métaux équivalentes et parfois supérieures à celles des gisements terrestres (valeur « métal contenu » : cuivre + nickel + cobalt = 2,4 %, voir la [Figure 3](#)). La prise de conscience de l'importance économique potentielle des nodules, et des risques associés, géopolitiques tout autant qu'environnementaux, conduisit le président Johnson en 1966 à demander que les grands fonds soient déclarés « patrimoine commun de l'humanité ». Cette résolution fut reprise en 1970 par l'assemblée générale des Nations unies. En tant que ressources en cuivre, les nodules représentent environ 10 % des réserves continentales et ont fait l'objet de nombreuses investigations dans les années 1970 et 1980. Ces investigations n'ont pas abouti à leur exploitation, pour diverses raisons : mauvaise estimation de la ressource,

coût élevé des traitements métallurgiques, problèmes politiques liés au droit de la mer et effondrement du cours des métaux.

L'exploitation des nodules implique de réaliser des cartes haute résolution et de comprendre les processus de formation des nodules les plus riches. La France, qui a obtenu deux permis miniers dans le Pacifique Nord, a proposé différentes approches technologiques pour leur exploitation, discutées dans le Chapitre de G. Herrouin de cet ouvrage. Les réserves sont très importantes, mais les données récentes montrent des répartitions hétérogènes qui impliquent un travail fin de cartographie et d'échantillonnage afin de sélectionner efficacement les zones les plus favorables à une exploitation.

Mais avant tout, un problème majeur que soulève tout projet d'exploitation des nodules est l'impact environnemental de leur extraction sur des surfaces considérables. Afin de limiter cet impact, il faudrait préalablement étudier la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes associés. Cet aspect environnemental est primordial pour l'obtention des permis miniers. Donc, si l'on veut chasser les nodules pour leurs richesses minérales, attention à l'environnement !

3.2. Les encroûtements cobaltifères

3.2.1. Les fonds marins sont parsemés d'un minéral : les encroûtements cobaltifères

Dans tous les océans reposent des concrétions rocheuses massives, pouvant parfois

atteindre vingt-cinq centimètres d'épaisseur et couvrant des kilomètres carrés de sol marin. Au total, on a estimé que 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des océans, sont tapissés de ce qu'on appelle familièrement des « encroûtements » (Figure 7). On les trouve à des profondeurs variant entre 400 et 4 000 mètres, sur les monts sous-marins isolés et les alignements volcaniques, au niveau des élévations sous-marines intra-plaques, ou encore dans les formations coralliennes d'anciens atolls immergés (Figure 8).

Les investigations ont réellement démarré en 1981 dans l'océan Pacifique central. Cela fait donc plus de vingt ans que de nombreux pays comme le Japon, les États-Unis, la Russie, l'Allemagne, la France, la Corée, le Royaume-Uni, la Chine, s'intéressent à

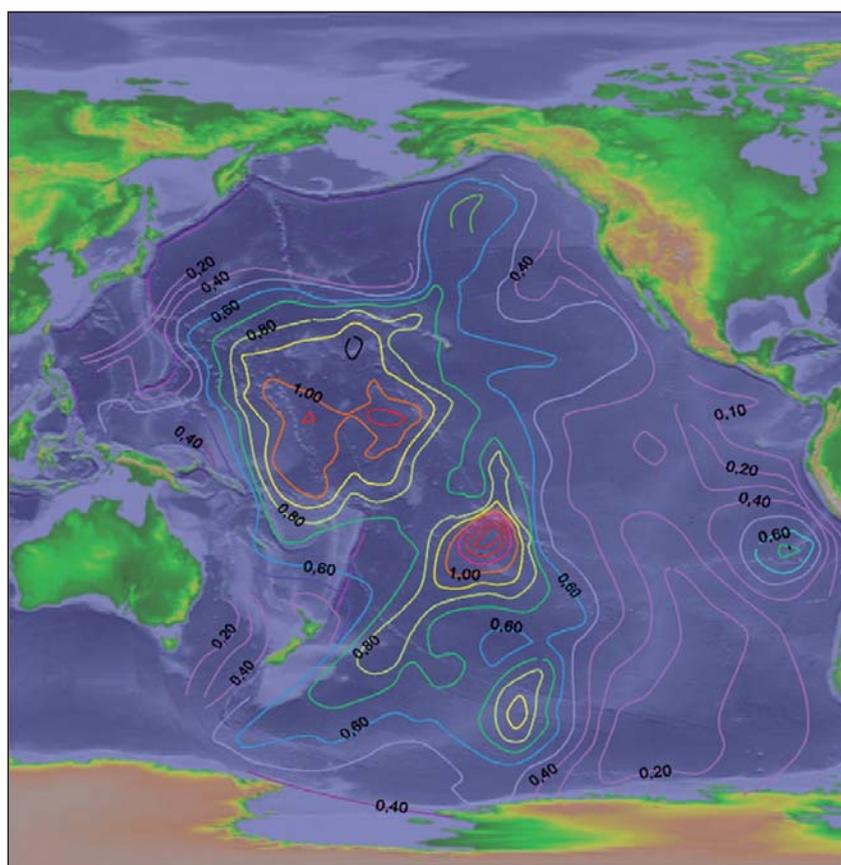


Figure 8

Un atoll, île composée de récifs coralliens entourant une dépression qui parfois correspond à un lagon. La Polynésie Française rassemble 85 des 425 atolls que compte la planète, 77 se regroupent dans l'Archipel des Tuamotu.

Figure 9

Courbes d'isoteleur normalisée en cobalt dans l'océan Pacifique (intervalle des contours : 0,1 %). Les valeurs maximales en cobalt sont centrées sur la Polynésie française, où se concentrent les encroûtements les plus riches connus à ce jour dans les océans.



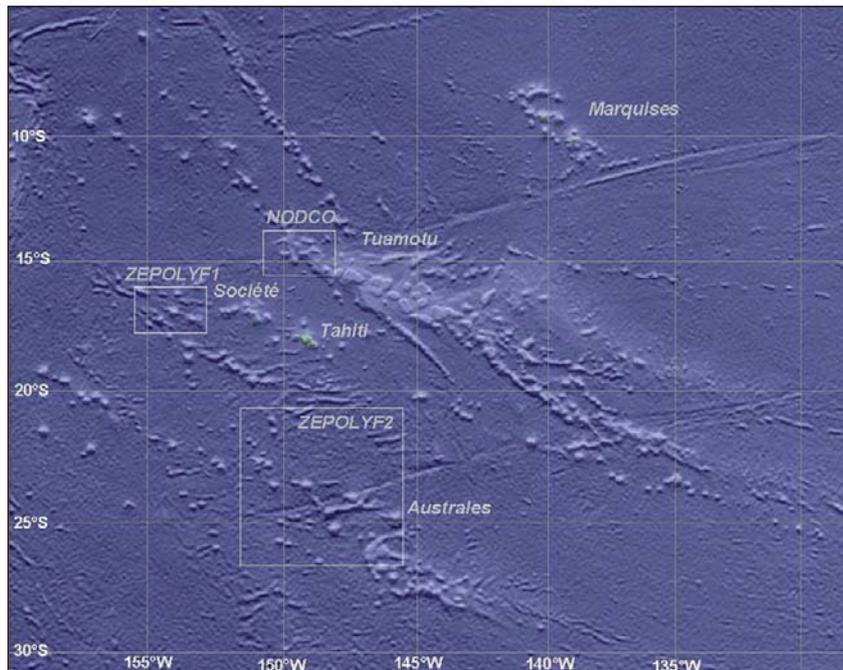
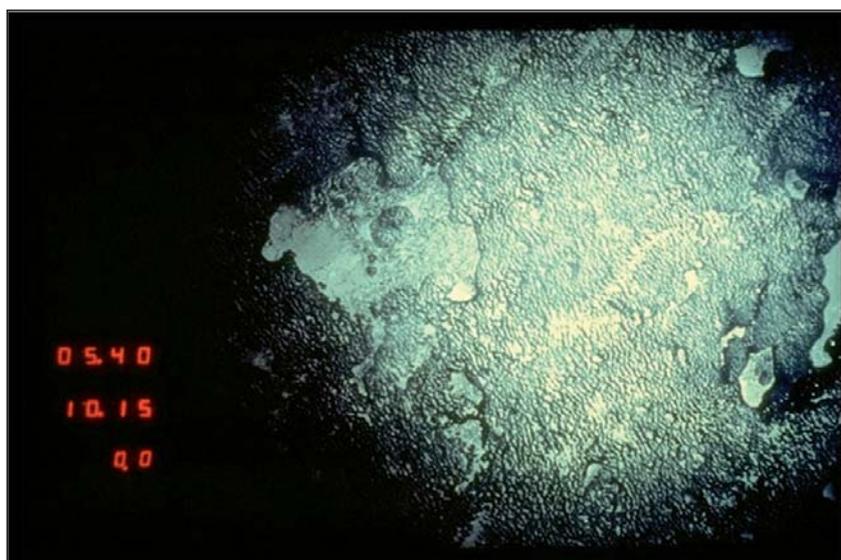


Figure 10

Localisation générale des zones d'encroûtements riches en cobalt et platine connus en Polynésie. L'archipel de Tuamotu, qui compte 78 atolls, est le cœur du gisement. On a également noté d'autres zones importantes sur d'anciens volcans et atolls sous-marins, qui n'ont pas encore été étudiés en détail.

Figure 11

Affleurement d'encroûtements cobaltifères dans la zone des Tuamotu.



ces encroûtements, qui ont ainsi fait l'objet de 42 campagnes entre 1981 et 2000, dont la majorité a été menée par le Japon pendant quinze ans depuis 1985, dans les régions Ouest Pacifique. Et pour cause, ces concrétions rocheuses renferment de nombreux métaux : fer, manganèse, cobalt etc. Ce sont de véritables minerais, des ressources potentielles !

La principale « mine » se trouve au fond de l'océan Pacifique : parmi les 50 000 volcans immergés, on en a exploré quelques-uns seulement et découvert un trésor de dépôts riches en cobalt et platine, dont la France se trouve être

un heureux héritier. En effet, les dépôts les plus riches se situent en Polynésie, et particulièrement dans les « eaux économiques françaises » (Figure 9 et 10). Les échantillons les plus précieux que l'on ait ramassés proviennent de croûtes parfois continues sur les bords externes des plateaux sous-marins tels que l'archipel de Tuamotu, et sur les volcans à des profondeurs comprises entre 800 et 2 500 mètres (Figure 11).

D'où nous viennent donc ces richesses ?

3.2.2. La genèse des encroûtements cobaltifères

Il est maintenant admis que les concrétions dites « cobaltifères » (Figure 12) commencent à se former à partir des ions ferreux Fe^{2+} et des ions manganèse Mn^{2+} présents dans l'eau de mer, qui précipitent sous forme d'oxydes de fer et de manganèse, en liaison avec des processus d'oxydation (Figure 13). La croissance des encroûtements s'opère très lentement, de l'ordre de un à six millimètres par millions d'années. Ce qui laisse le temps à des métaux, notamment le cobalt et le platine, de s'y concentrer fortement, conduisant à d'épaisses croûtes dont les âges peuvent atteindre les 60 millions d'années. Les composés solides obtenus se déposent alors sur les substrats solides du fond marin (de nature volcanique ou calcaire).

Actuellement, on considère que l'ensemble des métaux constitutifs de ces encroûtements provient de l'eau de mer. De plus, il a été constaté

que la croissance des encroûtements est renforcée lorsque la teneur en oxygène de l'eau de mer est minimale. Il est probable que les processus de précipitation soient également influencés et renforcés par l'activité bactérienne... Ces hypothèses demandent à être examinées et discutées à partir de données de terrain précises. En effet, on a trouvé plusieurs microsphérules d'origine météoritique dans certaines zones. Elles contiennent du nickel, du cobalt et des platinoïdes en quantité appréciable. Un calcul rapide montre néanmoins que leur contribution ne rend pas compte des teneurs élevées en cobalt et en platine dans des encroûtements. Dommage pour le rêve !

Sur le plan scientifique, des efforts demeurent nécessaires pour mieux comprendre les règles de répartition, la variabilité des épaisseurs et de composition et les divers processus impliqués dans la formation de ces encroûtements.

3.2.3. Composition chimique des encroûtements : pourquoi « cobaltifère » ?

Ainsi, comme les nodules polymétalliques, les encroûtements sont essentiellement constitués d'oxydes de fer et de manganèse. Ces derniers sont cependant en moyenne trois fois plus riches en cobalt (voir la Figure 3) et pourraient constituer le premier minerai de ce métal, si bien qu'on les a qualifiés de « cobaltifères ». Ils renferment même beaucoup plus de cobalt que les minerais exploités à terre (deux à trois fois plus que dans les latérites),

où la teneur n'excède jamais 0,1 à 0,2 %, devant le chiffre-record de 1,8 % en cobalt contenu dans les encroûtements de Polynésie. Or, on considère qu'un site est « potentiellement économique » lorsque les concentrations en cobalt sont supérieures à 1 %, et ce, dans des croûtes ayant au minimum 5 centimètres d'épaisseur et avec une certaine continuité sur des surfaces relativement planes.

Le cobalt n'est à ce jour qu'un « sous-produit » de l'extraction d'autres métaux. Mais il est aujourd'hui en forte demande et sa production a doublé

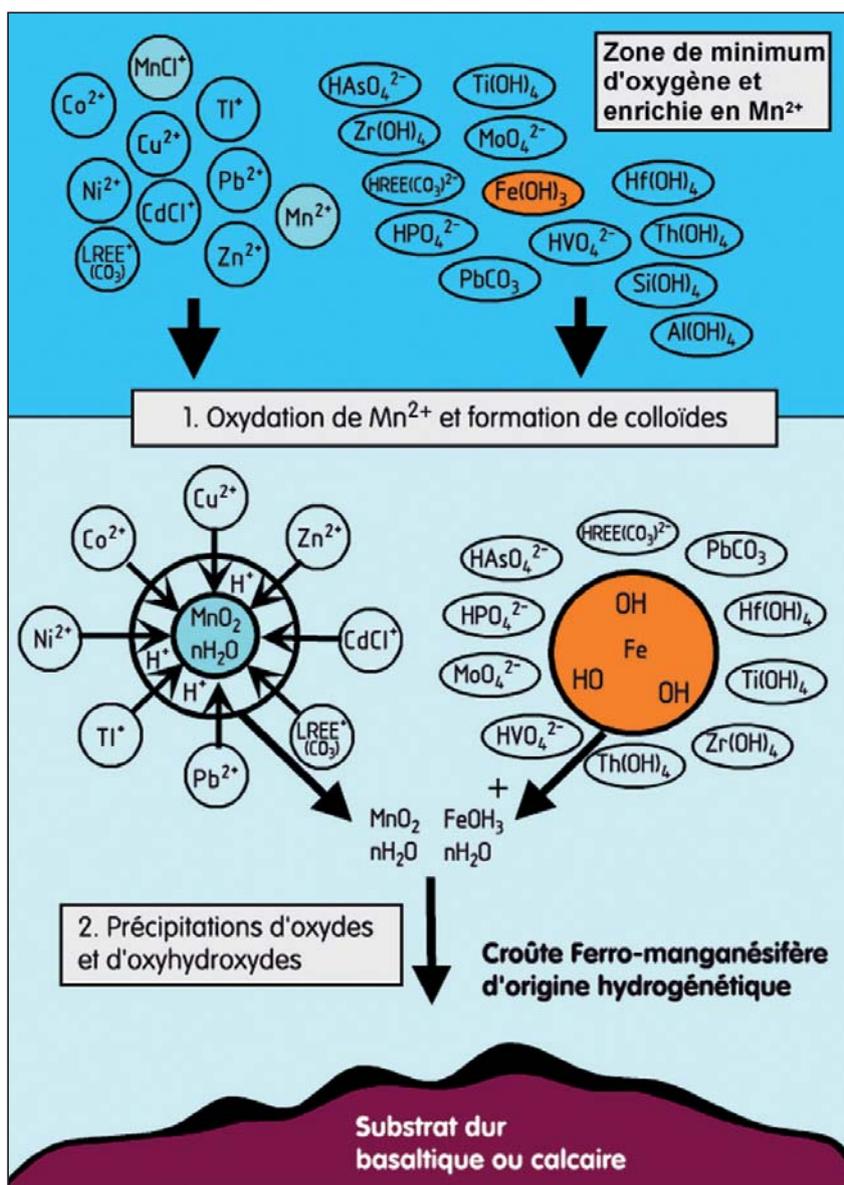


Figure 12

Échantillon d'encroûtement cobaltifère des Tuamotu.

Figure 13

Modèle chimique de la formation des encroûtements : des colloïdes et des phases complexes de métaux se forment.



LES PAYSAGES DES FONDS MARINS

Le fond des océans présente une morphologie très tourmentée, avec des chaînes de montagnes, des volcans et d'immenses plaines, bordées de fosses gigantesques. Quelle activité règne dans ce paysage ?

Au fond des océans s'élève la plus grande chaîne de montagne de la planète, formée des dorsales médio-océaniques, qui courent sur environ 60 000 kilomètres (Figure 14). Ces dorsales soulignent la ligne d'écartement des plaques tectoniques mises en mouvement par les cellules de **convection** du **manteau terrestre** (Figure 15). La remontée du manteau surchauffé sous les dorsales permet, par baisse de pression, la fusion de ses roches et la formation à quelques kilomètres de profondeur de chambres de lave en fusion. Lorsque la lave remonte à l'axe des dorsales, elle se solidifie, forme des volcans et constitue une nouvelle croûte de **lithosphère** océanique, parcourue d'un réseau de failles, fissures et crevasses. C'est ainsi que de part et d'autre des dorsales, le plancher de la mer s'élargit progressivement de deux centimètres (dorsale Atlantique) à plusieurs dizaines de mètres (dorsale Est Pacifique) par an : on nomme ce phénomène l'accrétion océanique.

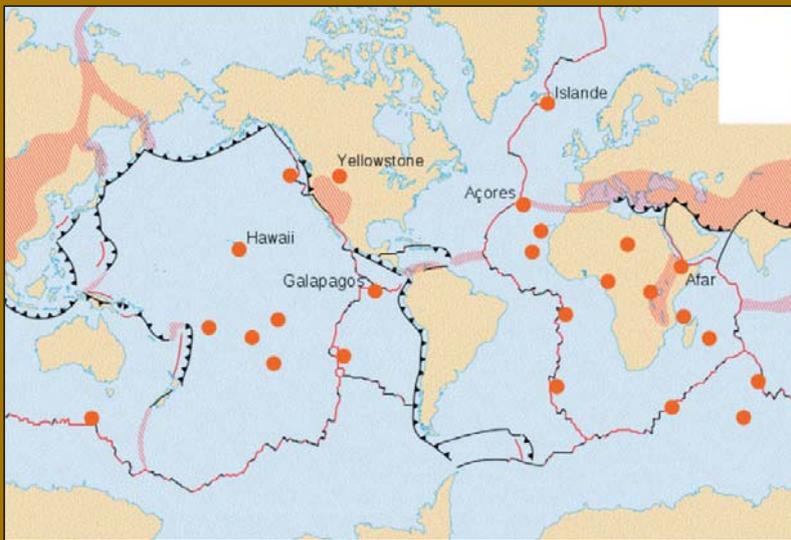


Figure 14

Les dorsales océaniques (lignes oranges), la plus grande chaîne de montagne de la Planète. Sur ses 60 000 km, le segment le plus long est la dorsale Atlantique (7 000 km).

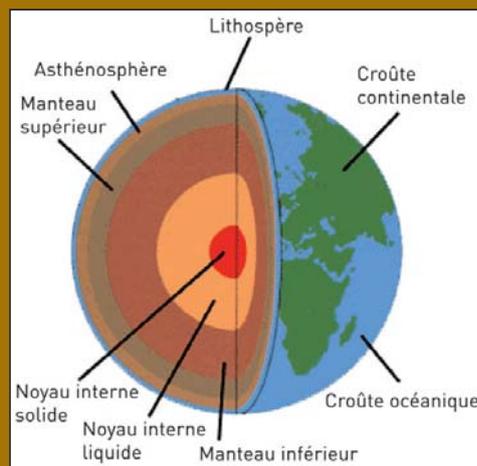


Figure 15

Dans les profondeurs de la Terre, le manteau, constitué de roches chaudes et pâteuses, est animé de mouvements de convection à l'origine du déplacement des plaques tectoniques de la lithosphère.

L'eau de mer s'infiltré dans le labyrinthe de fissures de la croûte océanique et y circule jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Elle entre en contact avec les roches profondes, réchauffées par la chambre de lave en fusion (1 200 °C), et devient alors un fluide enrichi en minéraux et pouvant dépasser les 400 °C : on l'appelle le **fluide hydrothermal** (*hydros* = mer, *thermos* = chaud). Moins dense, ce fluide peut remonter à l'axe de la dorsale et jaillir sous la pression hors de la roche, en formant d'impressionnants **fumeurs**, et parfois, elle se solidifie sous forme de majestueux **édifices hydrothermaux** pouvant s'élever jusqu'à plusieurs dizaines de mètres (Figures 16 a et b) !

entre 1999 et 2006. Il est en fait principalement utilisé pour réaliser des aciers spéciaux pour les nouvelles technologies, en particulier les alliages pour l'aviation et les batteries. Environ le tiers de la production de cobalt est utilisé dans l'industrie aérospatiale.

Le deuxième atout des encroûtements, c'est le platine, qui s'y trouve souvent très concentré. Ce métal, très abondant sur certains sites, pourrait également être un sous-produit non négligeable : il est réclamé en particulier par l'industrie des catalyseurs (pots d'échappement et piles à combustible). Enfin, les encroûtements sont une source potentielle de nombreux autres éléments métalliques tels que le titane, le cérium, le nickel, le thallium, le tellure, le zirconium, le tungstène, le bismuth ou encore le molybdène (voir la Figure 3).

Les enjeux d'une exploitation des encroûtements pour le cobalt et le platine sont réels. Mais à quel prix et avec quelles technologies ? Il manque encore des données de terrain et des calculs précis : contrôles géologiques de zones riches, continuité des dépôts, rugosité du fond, influence du substratum sur la dilution au ramassage etc. À ce jour, aucune étude de terrain par plongée n'a été réalisée sur ce type de dépôt au fond des océans... mais des projets américains sont en cours autour d'Hawaï.

3.3. Les sulfures polymétalliques hydrothermaux

Partir à la recherche d'un autre minéral majeur, les sulfures

C'est par ces phénomènes de **circulation** et **d'émissions hydrothermales** que le globe perd progressivement de sa chaleur. Ainsi circuleraient chaque année sur les dorsales près de $1,3$ à $9,0 \times 10^{17}$ grammes d'eau évacuant une quantité de chaleur de l'ordre de 36 à 44×10^{18} calories. Ces chiffres représentent l'équivalent d'une circulation de la masse totale des eaux océaniques au travers des systèmes hydrothermaux, tous les cinq à onze millions d'années. Il s'agit donc d'un phénomène majeur à l'échelle du globe terrestre : depuis l'origine des océans il y a près de quatre milliards d'années, la totalité de l'eau des océans aurait ainsi transité plusieurs centaines de fois au travers de la croûte océanique.



Figure 16

a – À proximité des dorsales océaniques, les événements hydrothermaux – cheminées et fumeurs – sont pareils à une tuyauterie souterraine qui évacuerait une partie de la chaleur interne de la Terre. L'édifice hydrothermal le plus haut connu mesure quarante mètres de haut.
b - Fumeurs actifs dans le bassin de Lau (Îles Tonga, Sud-Ouest Pacifique). Les cheminées de fumeurs sur la gauche sont principalement constituées de sulfure de zinc et de cuivre ($ZnFeS$ et $CuFeS_2$) et fortement concentrées en or.

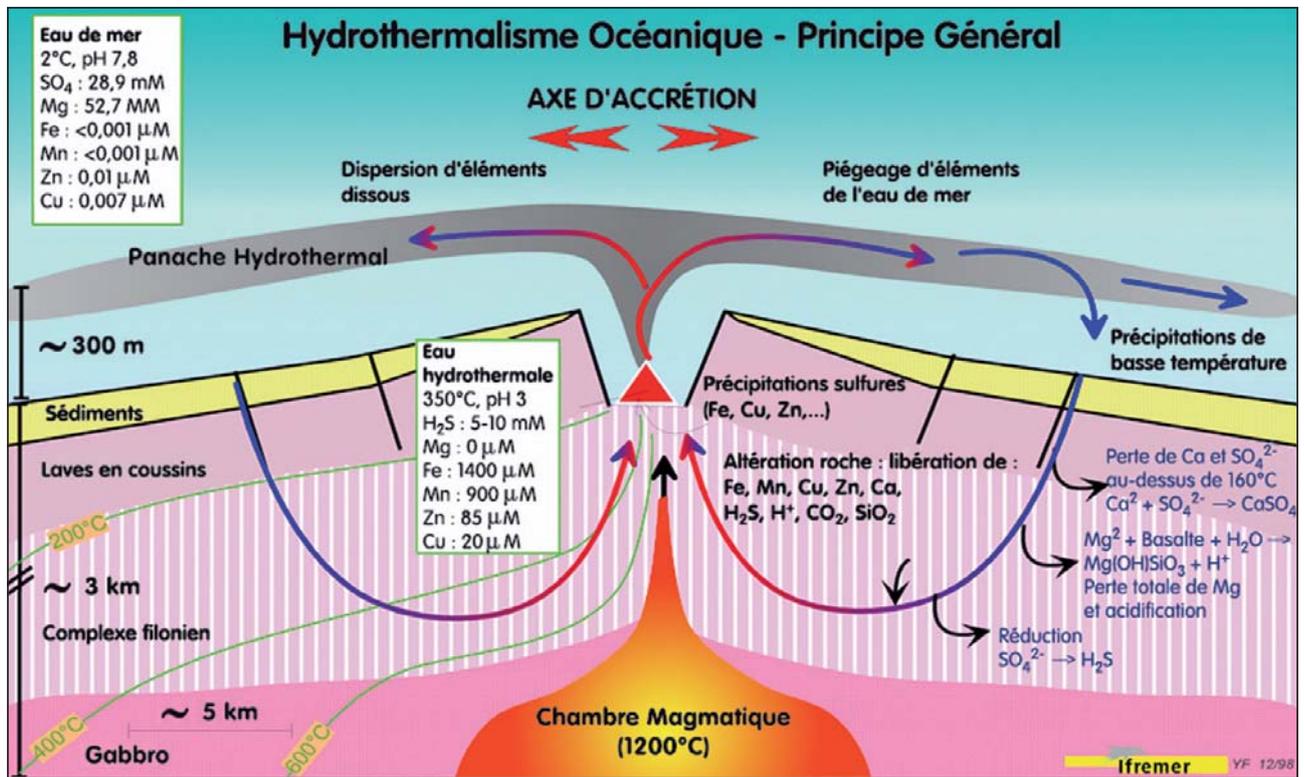


Figure 17

Schéma d'une coupe transversale de dorsale rapide (les échelles ne sont pas respectées) : les phénomènes volcaniques et hydrothermaux se déroulent dans le graben (fossé) axial, lieu d'écartement des plaques tectoniques. Les fluides hydrothermaux, au contact des roches profondes, s'enrichissent en métaux et subissent des mouvements de convection. En remontant à la surface, au niveau de l'axe d'accrétion, les métaux précipitent sur le plancher océanique sous forme d'accumulations de sulfures, une partie des métaux se disperse sur plusieurs dizaines de kilomètres dans le panache hydrothermal.

polymétalliques hydrothermaux, nous donne ici l'occasion de visiter le relief océanique et de découvrir un univers étonnant, dans toute sa richesse et sa complexité... il semble que Jules Verne n'est pas loin ! Édifices hydrothermaux, cheminées, fumeurs, dorsales et rifts, volcans sous-marins... comment se structure un paysage aussi complexe ? Plongée dans ces reliefs... **(Encart « Les paysages des fonds marins »)**

Depuis trente ans, on a exploré le fond des océans et déniché près de 150 sites hydrothermaux. Lorsque l'on découvrit sur certains sites la présence de dépôts riches en éléments métalliques (voir la **Figure 16 b**), il apparut que les fonds océaniques pouvaient receler de véritables mines ! Nous avons à faire au phénomène de *minéralisation hydrothermale* : au cours de la circulation hydrothermale sont extraits, transportés et concentrés des métaux qui se déposent sous forme de sulfures métalliques, associations moléculaires de métaux avec du soufre, dont les

fumeurs regorgent. On avait donc découvert les *sulfures polymétalliques hydrothermaux*. Exploration des sources de ce minéral : tout débute dans les profondeurs de la Terre...

3.3.1. Quand les sulfures hydrothermaux naissent et s'accumulent dans la mer

Loin en dessous de la croûte terrestre, à quelques kilomètres de profondeur, la chambre **magmatique** renferme de la lave en fusion à 1200 °C. L'eau de mer, froide et pauvre en métaux, mais riche en sels, pénètre le long des failles et fissures et se réchauffe fortement à l'approche de la chambre magmatique. Dès que sa température dépasse 160 °C, du sulfate de calcium CaSO_4 précipite sous forme d'anhydrite, tandis que le sulfate dissous SO_4^{2-} est progressivement réduit en sulfure d'hydrogène H_2S qui reste dissous dans l'eau. En même temps, il se produit d'intenses réactions chimiques qui altèrent fortement les roches traversées et aboutissent à une perte totale du magnésium, lequel entre

dans les minéraux résultant de l'altération la lave. Une des conséquences de ces réactions est l'acidification du fluide, augmentant sa capacité à solubiliser les métaux contenus dans les roches. La forte salinité de l'eau de mer facilite également le transport des métaux sous forme de sels chlorés. Il se génère ainsi des fluides acides, « réduits », chauds (350 °C), dépourvus de magnésium et chargés en autres métaux (Figure 17). De faible densité, ces fluides remontent et subissent des mouvements de convection, pour ressortir sous forme de sources chaudes en formant des fumeurs, dans les zones de fissuration les plus récentes de la dorsale. Au contact de l'eau de mer environnante (2 °C), ces fluides hydrothermaux refroidissent rapidement et les sulfures métalliques solides cristallisent sur le plancher océanique sous forme de grandes et fascinantes cheminées.

Un groupe d'une dizaine de fumeurs noirs de 2 cm de diamètre émettant un fluide contenant 100 ppm de métaux à 2 m/s, produit 250 tonnes de sulfures métalliques par an. Un champ actif peut regrouper une cinquantaine de ces fumeurs et la durée de vie du champ peut être de plusieurs dizaines de milliers d'années. Dans un tel système, environ 1,5 millions de tonnes de sulfures (principalement sulfures de fer, FeS_2) peuvent être produites tous les cent ans. On estime toutefois que plus de 95 % des métaux sont dispersés dans l'eau de mer. Il faut donc un piège efficace et des configurations

géologiques particulières pour retenir un pourcentage plus important des métaux.

Lorsque les systèmes sont stables, se forment des monts de sulfures polymétalliques pouvant dépasser 70 mètres de haut et quelques centaines de mètres de diamètre. Ces amas de sulfures peuvent totaliser des dizaines de millions de tonnes. Les volumes, tonnages et concentrations en éléments valorisables de tels dépôts sont identiques à ceux de nombreuses mines exploitées à terre. Les monts sont constitués, en surface, d'éboulis de cheminées cassées cimentées par des circulations ultérieures. Ils sont surmontés d'un complexe de cheminées actives sur une surface de quelques dizaines de mètres carrés (Figures 18, 19 et 20). Sur certains sites, les dépôts s'organisent au contraire dans et autour des dépressions formant le cratère du volcan. Les monts se forment non seulement par accumulation de cheminées cassées en surface, mais aussi par précipitation

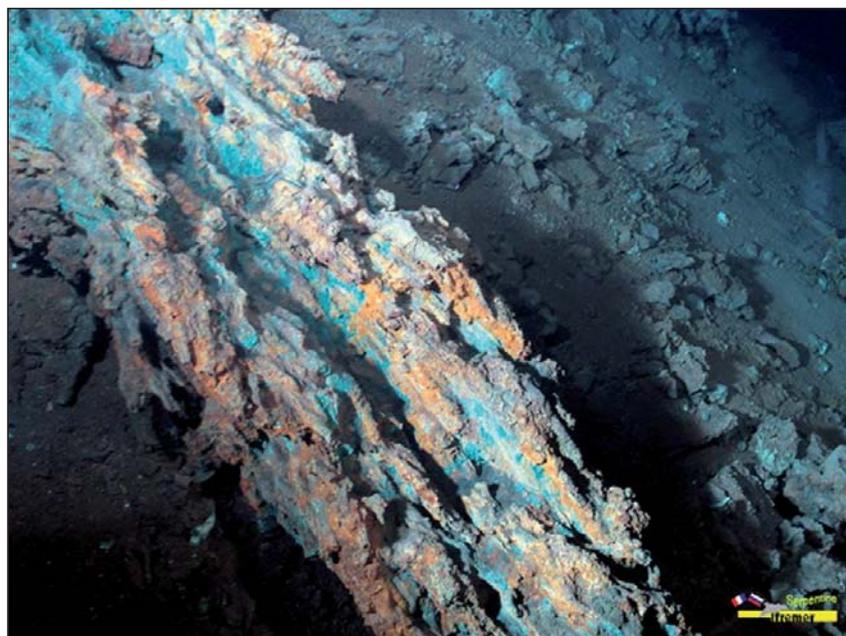


Figure 18

Cheminée riche en minéraux de cuivre (en jaune), formée à partir d'un fluide de 350 °C. Dorsale du Pacifique Est 13° N.

Figure 19

Ancienne cheminée riche en cuivre et partiellement oxydée (les minéraux verts visibles en surface sont des chlorures de cuivre).



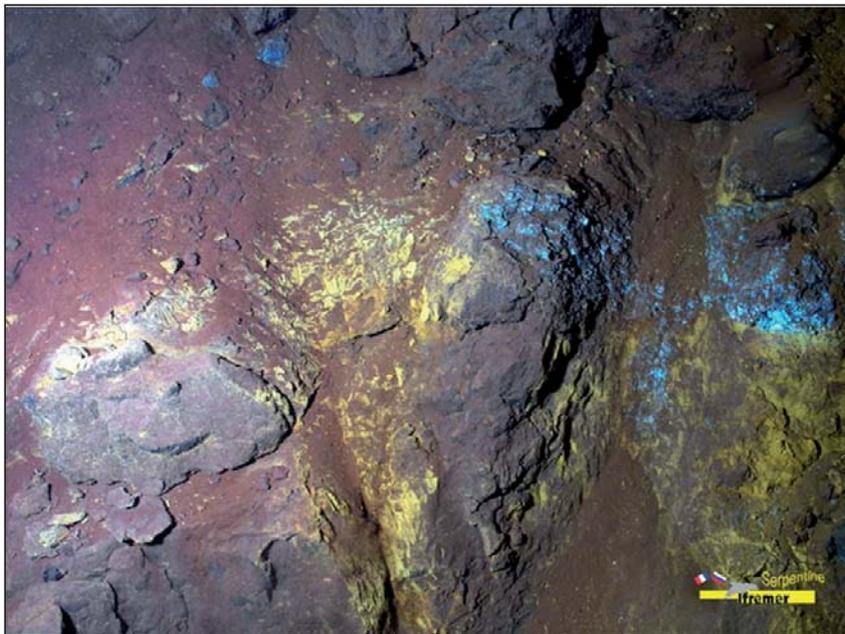


Figure 20

Affleurement de sulfures massifs oxydés en surface. Ces roches sont identiques aux sulfures des amas sulfurés fossiles exploités sur les continents.

Figure 21

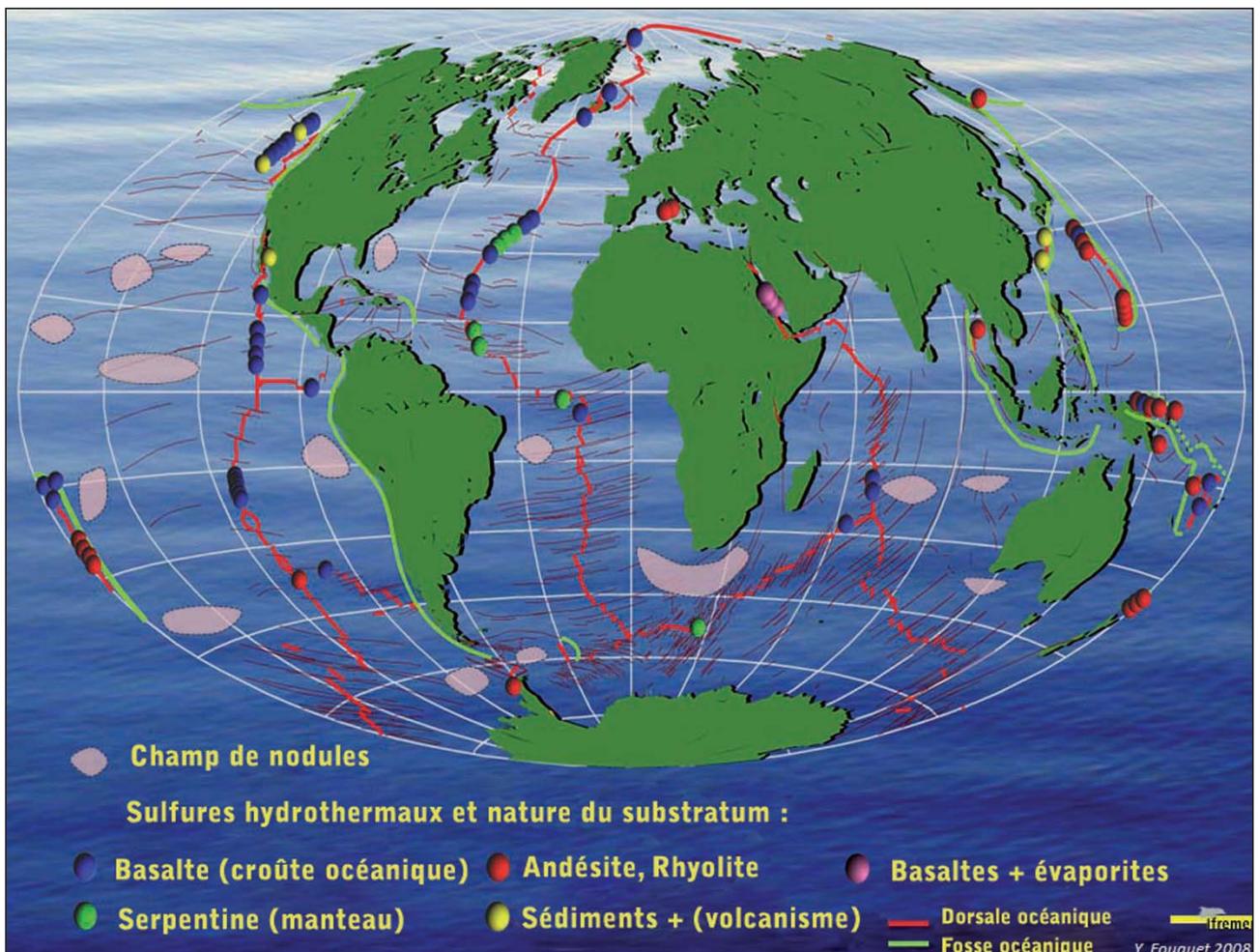
Principaux champs hydrothermaux connus dans les océans. La nature des roches du substratum joue un rôle important sur la composition des fluides et des minéralisations sulfurées.

de minéraux à l'intérieur, ainsi que par remplacement du substratum. Le résultat final est une accumulation de sulfures massifs.

Ainsi l'activité hydrothermale est un important mécanisme de concentration des métaux, qui s'accumulent sous forme d'amas de sulfures polymétalliques : une mine pour l'homme !

3.3.2. Partir à la chasse aux sulfures polymétalliques hydrothermaux

Au cours d'explorations, menées en 1962, furent observées les premières minéralisations hydrothermales, associées à des saumures chaudes (70 °C), à l'axe de la mer Rouge. S'en suivit la découverte en



1978 des premiers fumeurs noirs (350 °C) sur la dorsale du Pacifique Est, à près de 3000 mètres de profondeur, avec leurs amas de dépôts sulfurés. Ces sulfures polymétalliques observés pour la première fois représentaient seulement quelques dizaines de milliers de tonnes. Mais comme on sait que les fluides les plus profonds sont les plus aptes à transporter les métaux (fortes pressions donc hautes températures d'ébullition), il est certainement intéressant de plonger beaucoup plus bas. C'est ainsi que l'on a trouvé dernièrement les dépôts les plus riches, en descendant jusqu'à 4000 mètres de profondeur. On connaît maintenant plusieurs champs hydrothermaux, sur lesquels les dimensions et teneurs des minéralisations sont similaires à celles de mines exploitées à terre, c'est-à-dire plusieurs millions de tonnes (*Figure 21*).

Pour découvrir les gisements de sulfures polymétalliques, les explorateurs ont dû sillonner le paysage volcanique sous-marin, dans des environnements bien diversifiés : dorsales rapides, dorsales lentes, bassins arrière-arc et volcans intra-plaque. Dans le monde de l'océan profond, les risques de surprise sont quasi infinis (*Encart « Des sulfures hydrothermaux, à travers les régions volcaniques »*) !

3.3.3. Quelle composition chimique pour les sulfures hydrothermaux ?

Les sulfures hydrothermaux se sont révélés être des minerais très riches, davantage encore que les nodules et

les encroûtements cobaltifères : l'ensemble cuivre + zinc atteint 20 % dans les bassins arrière-arc et 15 % sur les dorsales lentes (Atlantique) et rapides (Pacifique Est). De plus, la plupart des sites sont fortement enrichis en argent et souvent en or. Certains sites spécifiques de l'Atlantique, associés à des roches du manteau, sont également très riches en cobalt.

On sait maintenant que les sulfures polymétalliques ont tous été extraits et transportés par des fluides hydrothermaux, donc selon un processus unique. Pourtant, ils présentent des compositions très variables. En fait, les facteurs déterminant leur nature – substrat et métaux – sont à chercher dans l'environnement géodynamique, la nature du substratum affecté par les circulations hydrothermales, la profondeur d'eau, les phénomènes de séparation de phase ou encore la maturité des dépôts (*Encart « Des métaux différents selon l'environnement géodynamique »*)... autant de paramètres différents, autant de possibilités de composition pour nos minerais.

4 Exploiter les gisements marins : les enjeux économiques et politiques

Face à l'évolution de la demande mondiale et à l'envolée probablement durable sur le long terme du cours des matières premières, l'industrie minière mondiale s'intéresse depuis quelques années aux ressources minérales des grands fonds. Où en sommes-

DES SULFURES HYDROTHERMAUX, À TRAVERS LES RÉGIONS VOLCANIQUES

Les dorsales rapides : de nombreux champs hydrothermaux mais petits et instables

Les dorsales sont dites rapides lorsque leurs plaques s'écartent à des vitesses dépassant 6 centimètres par an et pouvant atteindre 17 centimètres par an, telle la dorsale du Pacifique Est, au nord de l'Île de Pâques. C'est au large du Mexique, à la latitude de 21° N, qu'ont été découverts les premiers fumeurs noirs. Certains prédisaient que l'activité serait particulièrement intense plus au sud, sur la portion la plus rapide de la dorsale (ouverture : 17 centimètres par an), entre les latitudes de 15 et 20° S. De nombreuses campagnes ont été conduites dans les années 1980 et 1990, en particulier par des équipes américaines, françaises et allemandes. Les découvertes se sont effectivement multipliées, depuis le Mexique jusqu'à l'Île de Pâques : 13° N, 11° N, 9°50' N, 17°30' S, 18°15' S, 18°30' S, 21°30' S... (**Figure 21**). Au cours d'une seule campagne de plongées du submersible Nautille (*voir encart du Chapitre de D. Desbruyères, « Les robots en mer »*), 70 sites hydrothermaux ont été détectés entre 17 et 19° S, sur la dorsale la plus rapide au monde. La démonstration était faite que l'importance de l'activité dépendait de la vitesse d'ouverture. Cependant, le nombre ainsi que la dimension très réduite des champs hydrothermaux – quelques centaines de mètres carrés – traduisent des systèmes extrêmement instables, en raison de la fréquence des mouvements tectoniques et du nombre important des éruptions volcaniques. Cette configuration empêche d'envisager l'exploitation des accumulations minérales observées sur ces sites. Les concentrations de sulfures à l'axe de la dorsale sont insignifiantes du point de vue métallogénique. Les seuls dépôts à fort tonnage sur les dorsales rapides se situent sur des volcans éloignés de quelques kilomètres de l'axe sur lesquels des amas de sulfures de plusieurs millions de tonnes ont été localisés.

Les dorsales lentes : des champs hydrothermaux rares mais vastes et stables dans le temps

Les dorsales dites lentes, telles que la dorsale Atlantique, s'ouvrent à des vitesses n'excédant pas 2 centimètres par an. Pendant plusieurs années, il était admis que ces dorsales n'étaient pas favorables à la formation de fumeurs noirs – aucun d'entre eux n'y avait encore été observé. L'explication étant que les chambres magmatiques, plus localisées et plus profondes, ne devaient pas permettre aux fluides les plus chauds d'atteindre la surface. En 1985, la découverte, à quelques mois d'intervalle, de deux champs de fumeurs noirs à 26° N et 23° N sur la dorsale Atlantique a démontré que l'hydrothermalisme chaud était un phénomène général sur les dorsales, quelque soit leur vitesse d'ouverture. Depuis, les découvertes se sont multipliées, et une quinzaine de sites à sulfures sont maintenant connus le long de la ride médio-Atlantique.

La combinaison de l'effet thermique et topographique focalise les convections hydrothermales sur les points hauts et chauds des segments volcaniques (par exemple le site Lucky Strike, **Figure 22**). Cependant, des sites sont connus à la base et au sommet des murs du rift axial, leur emplacement est donc contrôlé non plus par le volcanisme, mais par la tectonique. D'autres sites viennent d'être découverts dans les extrémités de segments (Sites Rainbow, Saldanha, et Menez Hom, voir la **Figure 22**) dans des contextes où la faible productivité magmatique en surface laisse apparaître les roches du manteau. Ces découvertes élargissent considérablement le champ d'investigation potentiel, puisqu'il ne s'agit plus maintenant d'explorer uniquement les sommets volcaniques, mais aussi la base et le sommet des murs du rift : elles démontrent également que les volumes de sulfures des dorsales lentes sont plus importants que ceux des dorsales rapides.

Les dorsales couvertes de sédiments

Un cas particulier concerne les portions de dorsales couvertes de sédiment, en raison de la proximité des continents. Dans ces environnements, les convections hydrothermales affectent successivement les roches basaltiques de la croûte océanique, puis les sédiments qui jouent le rôle d'écran et de piège vis-à-vis des métaux. La campagne de forage ODP

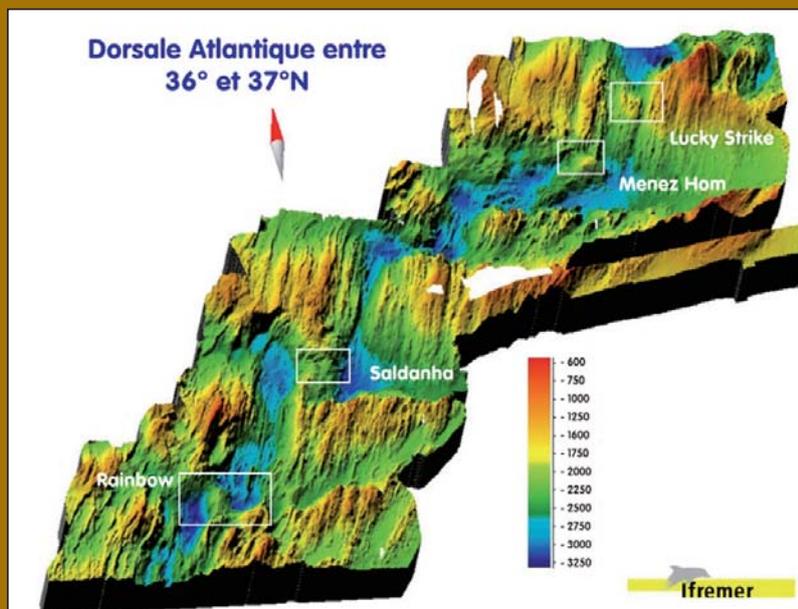


Figure 22

Sites hydrothermaux le long de la dorsale Atlantique dans le sud des Açores.

(*Ocean Drilling Program*) en 1996 (LEG-ODP 169) a démontré l'importance de ces pièges pour la formation d'amas sulfurés : au cours de forages, on y a trouvé le plus grand dépôt de sulfures connu dans les océans. Les estimations obtenues, grâce à un échantillonnage tridimensionnel, atteignent près de quinze millions de tonnes de minerai particulièrement riche en cuivre et en zinc. On a ainsi montré qu'une partie importante des minéralisations ne se forme pas uniquement sur le plancher océanique mais également en profondeur, par remplacement des roches.

Les bassins arrière-arc et les arcs volcaniques : des domaines de formation de croûte océanique en arrière des grandes fosses océaniques

À l'opposé des dorsales, qui sont le lieu de création de la croûte océanique, les bassins arrière-arc se forment dans les environnements où les plaques sont détruites. À la fin des années 1980, ces bassins situés en arrière des grandes fosses océaniques, ont attiré l'attention des métallogénistes, du fait que la grande majorité des gisements fossiles exploités à terre sont formés dans ce type de contexte. En effet, de par leur localisation près des continents, ils s'y incorporent préférentiellement lors des collisions de plaques.

Les bassins arrière-arc peuvent être considérés comme de petites dorsales volcaniques formées en arrière des grandes fosses océaniques. L'injection d'eau de mer au niveau des zones de plongement des plaques lithosphériques (zones de subduction) induit un abaissement du point de fusion des roches. En conséquence, les poches de lave formées viennent alimenter les îles volcaniques (arcs volcaniques) formant des alignements en arrière et parallèles à la fosse. Les îles Tonga et les Mariannes sont des exemples d'îles formées par ce processus. Ces contextes sont favorables à l'installation de cellules de convection hydrothermale et abritent plusieurs champs hydrothermaux.

La grande instabilité des bassins arrière-arc, ainsi que la grande variabilité de nature des roches volcaniques qui leur sont associées, ont conduit à la découverte de sites hydrothermaux extrêmement variés quant à la composition des fluides et des minéralisations associées. Ces bassins se classent selon leur degré de maturité. Les bassins jeunes peuvent s'ouvrir en domaine de croûte continentale (bassin d'Okinawa) ou de croûte d'arc insulaire (bassin de Lau, bassin de Manus). Dans ce dernier cas, l'influence des produits de fusion issus de la zone de subduction se fait sentir jusque dans la composition de dépôts hydrothermaux associés. Nous pouvons ainsi voir la marque de phénomènes globaux tels que la subduction dans les phénomènes locaux et la formation des dépôts minéraux. Les bassins plus évolués sont comparables à de petites dorsales sur lesquelles le basalte est dominant et les processus minéralisateurs sont très proches de ceux des dorsales.

DES MÉTAUX DIFFÉRENTS, SELON L'ENVIRONNEMENT GÉODYNAMIQUE

L'interaction eau de mer/roches de la croûte océanique conduit à des dépôts riches en cuivre, zinc et argent

En domaine de dorsales rapides, les réactions se produisent sur le basalte. Les dépôts sont principalement constitués de sulfures de fer, de cuivre et de zinc. Leurs compositions varient peu d'un site à l'autre, alors qu'en fonction de la profondeur et des phénomènes d'ébullition, la composition des fluides varie considérablement. Des salinités plus faibles que celle de l'eau de mer correspondent à la condensation des phases vapeurs produites lors de la séparation de phase, alors que les fluides plus salés que l'eau de mer correspondent à la concentration du sel dans les saumures résiduelles. Les métaux ont tendance à se concentrer dans ces dernières phases. Les dépôts les plus jeunes à l'axe sont enrichis en zinc et argent tandis que les dépôts plus anciens, généralement hors axe, sont enrichis en cuivre, le zinc étant alors essentiellement concentré au sommet et en surface des dépôts. Certains sites sont enrichis en certains éléments, tels que le sélénium et le cobalt.

L'interaction eau de mer/croûte océanique/sédiments mène à des dépôts riches en cuivre, zinc, plomb, arsenic

Dans certains environnements, comme dans le golfe de Californie ou sur la côte Ouest du Canada, la dorsale est proche des continents et peut être noyée sous une couverture de sédiments. Les eaux hydrothermales doivent alors se frayer un passage au travers des sédiments, avant d'émerger sur le plancher océanique. Au cours de cette traversée, l'acidité des fluides, très forte au départ, est neutralisée par réaction avec les carbonates marins. Les réactions chimiques solubilisent certains éléments, tels que le plomb et l'arsenic, qui sont riches dans les sédiments d'origine continentale. Une partie des autres métaux se dépose au sein des sédiments qui constituent un piège efficace. Ces environnements sont donc enrichis en plomb et arsenic par rapport aux sites formés directement sur les basaltes.

L'interaction eau de mer/roches de type arcs insulaires produit des dépôts riches en zinc, cuivre, plomb, arsenic, argent et or

Dans les bassins arrière-arc, les roches volcaniques ont une composition intermédiaire entre celle de la croûte océanique et celle de la croûte continentale. Les dépôts hydrothermaux qui leur sont associés sont maintenant bien connus, en particulier en arrière des fosses et des arcs insulaires de l'ouest du Pacifique. Les compositions de ces dépôts sont intermédiaires entre celles des dorsales et celles qui se forment en contexte de croûte continentale. En particulier, les échantillons prélevés en surface sont très riches en zinc (comme les fluides) et en plomb. Une particularité de ces sites est leur forte teneur en argent et or dont les concentrations moyennes peuvent dépasser 10 g/t pour l'or et 250 g/t pour l'argent (*voir la Figure 3*). (À titre indicatif, dans les mines terrestres, l'or est considéré comme un élément valorisable à partir de teneurs voisines ou parfois inférieures à 1 g/t.)

L'interaction eau de mer/roches de type continental conduit à des dépôts riches en zinc, plomb, cuivre, argent, antimoine, mercure

Certains sites hydrothermaux, tel celui d'Okinawa près du Japon, se forment dans des bassins sédimentaires issus de l'érosion du continent et s'ouvrant dans une croûte continentale. Il s'agit donc ici d'une interaction entre l'eau de mer et la croûte continentale. Les dépôts hydrothermaux associés sont fortement enrichis en plomb (plusieurs dizaines de %), arsenic, argent et or, comparativement à leur équivalent des dorsales et aux bassins arrière arcs.

L'interaction eau de mer/roches du manteau favorise la formation de dépôts riches en cuivre, zinc, cobalt et or

Depuis la fin des années 1990, de nombreuses observations ont montré que sur les dorsales lentes, les affleurements de roches du manteau terrestre étaient relativement fréquents. Certaines portions de dorsale, en particulier l'extrémité des segments volcaniques, reçoivent très peu de coulées basaltiques. Comme l'ouverture et l'écartement des plaques se poursuivent inlassablement, la déchirure provoquée porte à l'affleurement des roches sous-jacentes, c'est-à-dire des roches du manteau. Sur la dorsale Atlantique, cinq sites actifs, Rainbow, Logatchev 1 et 2, et Ashadze 1 et 2 sont sur un substratum mantellique. Ces sites résultent de la réaction entre l'eau de mer et les roches ultrabasiques du manteau. Les fluides associés sont exceptionnellement riches en méthane et surtout en hydrogène, qui résulte de réactions chimiques liées à l'hydratation des roches du manteau. Ces réactions se traduisent par une augmentation de 30 % du volume de la roche. Dans ce cas encore, la nature du substratum se marque très bien dans la composition chimique des fluides et précipités hydrothermaux. En particulier, les sulfures se caractérisent par un très fort enrichissement en cuivre, zinc, cobalt. Localement, des teneurs supérieures à 50 g/t en or ont été mesurées. À noter qu'ici, comme dans certains bassins arrière-arc, les teneurs les plus élevées se situent directement sur le plancher océanique à la surface des dépôts.

Les boues métallifères de la mer Rouge

Les sédiments métallifères de la mer Rouge représentent un cas particulier. En 1948, le navire de recherche suédois, l'Albatros, mesure dans la mer Rouge des anomalies de température et de salinité. Les premiers sédiments métallifères sont découverts au cours des années 1960 dans plusieurs fosses emplies de saumures chaudes (60 °C) à l'axe de la mer Rouge. Dès 1969, deux sociétés industrielles, Preussag et IGS, conduisent des explorations afin d'estimer les volumes des dépôts et de comprendre les conditions de formation dans diverses fosses. La mer Rouge est un océan en tout début d'ouverture ; les fosses sont localisées dans la partie la plus profonde de l'axe volcanique ; 18 fosses sont actuellement connues. La plus grande, la fosse « Atlantis 2 », couvre près de 60 km². Les sédiments métallifères y atteignent une trentaine de mètres d'épaisseur sous une couche de 180 mètres de saumure ; ils représentent 94 millions de tonnes de minerai et contiennent 1,7 millions de tonnes de zinc, 0,4 million de tonnes de cuivre, et 4 000 tonnes d'argent. En mai-juin 1979, des premiers essais de pompages sont effectués à partir d'un navire de forage en eau profonde. Mais en raison de traitements difficiles de ces minerais particulièrement fins, et du cours des matières premières relativement bas, le stade industriel n'a pas été développé.

Zonation chimique des dépôts

L'eau de mer, entrant en contact avec les roches de la croûte ou du manteau terrestre, en extrait de nombreux métaux sous forme de complexes de soufre et de chlore, et leur transport dans les fluides s'en trouve facilité. En raison des pressions élevées empêchant l'ébullition des fluides, ces capacités de transport sont renforcées. Par exemple, dans les conditions régnant sur les sources hydrothermales, le cuivre ne peut rester en solution en dessous de 300 °C et le zinc précipite entre 100 °C et 250 °C. Ces caractéristiques chimiques propres à chaque élément font que les métaux se répartissent dans les cheminées et dans les amas de sulfures selon les températures qui y règnent. Ainsi, le cuivre se trouvera dans le cœur chaud des édifices, tandis que le zinc sera concentré à l'extérieur, où il fait plus froid. Ainsi, cette « zonation » des monts et des cheminées, qui dépend de la température, implique le remplacement des assemblages précoces de basse température riches en zinc par des assemblages plus riches en cuivre. D'autres métaux suivent ces deux grandes familles d'éléments : le cobalt, le nickel, le sélénium et l'indium sont préférentiellement associés au cuivre, tandis que le cadmium, le plomb, l'argent, l'arsenic, l'antimoine et le germanium sont associés au zinc. L'or a un comportement plus complexe et peut être associé soit au cuivre soit au zinc.

nous aujourd'hui ? Tandis que l'idée d'exploiter des champs de **nodules** dans le Pacifique Nord est sérieusement étudiée, l'intérêt pour les **encroûtements** ne peut encore se concrétiser tant que des travaux de terrain n'auront pas encore identifié de dépôts continus sur des zones suffisamment plates pour un ramassage efficace. En revanche, les **sulfures hydrothermaux**, de découverte pourtant plus récente, présentent des opportunités prometteuses : contrairement aux nodules et aux encroûtements, ils s'accumulent sous forme de minerais massifs très localisés et situés directement sur le plancher océanique. Cette situation garantirait un impact environnemental minimal en cas d'exploitation, alors qu'une exploitation des nodules ou des encroûtements obligerait à ratisser de très larges surfaces, avec des effets mal connus sur l'environnement.

4.1. Les compagnies minières à l'assaut des nouveaux gisements

De nombreux champs hydrothermaux avaient été découverts au cours des campagnes scientifiques dans les grands fonds. Ils attirent aujourd'hui et plus que jamais des compagnies minières à travers le monde, qui sont venues étudier de près les gisements prometteurs.

Ainsi, le Japon a mené des investigations poussées pour évaluer des minéralisations hydrothermales riches en cuivre et plomb dans ses eaux économiques. La Russie soutient quant à elle un important programme d'exploration

et d'inventaire des ressources minérales hydrothermales le long de la dorsale Atlantique. Du côté de la Chine, l'association COMRA, *China Ocean Minerals Research and Development Association*, qui a lancé un programme d'explorations pour rechercher les ressources minérales des grands fonds, vient de découvrir en mars 2007 un premier site hydrothermal dans l'océan Indien. Dans le nord de la Nouvelle-Zélande, des explorations sont menées par la compagnie anglaise Neptune Mineral. Une autre compagnie, Nautilus Minerals (Australie), vient d'acquiescer des permis autour des Îles Fiji et des Îles Tonga (*Figure 23*). Elle réalise également des travaux intensifs d'évaluation sur les sulfures hydrothermaux au nord de la Papouasie par des profondeurs de près de 2000 mètres. En 2006, quatre mois ont été consacrés à l'évaluation des dépôts associés au volcanisme sous-marin dans le bassin de Manus. Au cours de ces campagnes ont été effectuées des opérations de cartographie, de prélèvements d'échantillons à l'aide d'un submersible ROV (*voir l'encart dans le Chapitre de D. Desbryères, « Les robots en mer »*), et des opérations de géophysique visant à estimer le volume des dépôts. Pendant deux mois de campagnes (avec un coût de quatre millions de dollars), on a réalisé des forages pour évaluer la composition des dépôts. Verdict : les minéralisations sont particulièrement riches en cuivre et or ! Les exploitations sont prévues dès 2010, a ainsi annoncé Nautilus

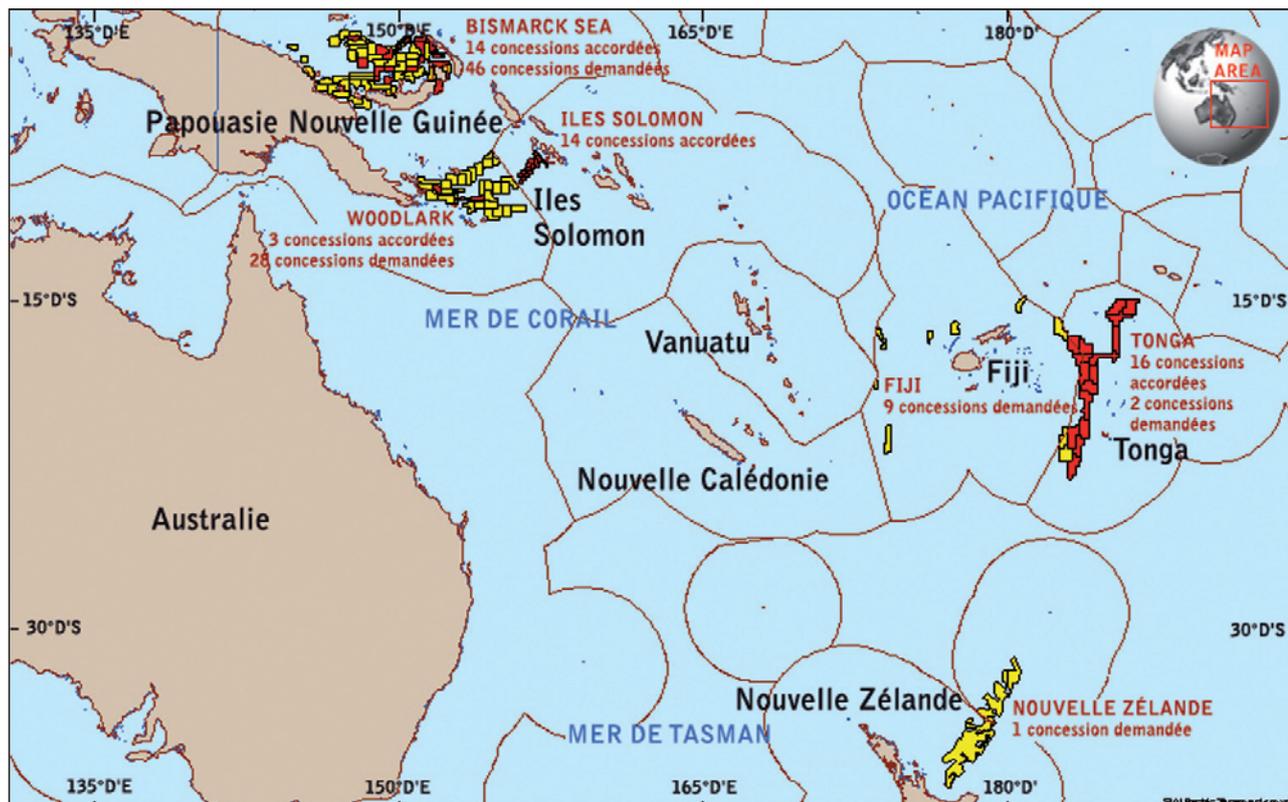


Figure 23

État des permis d'exploration de Nautilus Minerals en 2008 dans le Sud-Ouest Pacifique.

Minerals, qui lève dans ce but 334 millions de dollars de liquidités, signant **la première opération mondiale d'exploitation minière dans les grands fonds**.

En parallèle, début janvier 2007, dix-huit nouveaux permis d'exploration ont été déposés sur les sites hydrothermaux à l'ouest des Îles Fiji et près des Îles Tonga. Plus récemment, en avril 2008, la société *Tonga Offshore Mining limited*, filiale de Nautilus Minerals, a déposé auprès de l'ISA (International Seabed Authority, ISA. Voir le Chapitre de G. Herrouin) une demande d'approbation d'un plan de travail relatif à l'exploration des nodules polymétalliques dans la zone réservée de l'Autorité. L'objectif est de réaliser sur quatre ans des campagnes d'évaluation et de faisabilité d'exploitation des nodules.

Nous ne sommes pas encore au bout de nos recherches.

Seule une petite partie de l'océan profond a été explorée, et les dépôts répertoriés à ce jour sont à différents degrés de connaissance scientifique. Il est donc nécessaire de continuer les investigations scientifiques pour comprendre les processus géologiques, chimiques et biologiques qui contrôlent la formation, la taille et la diversité des minéralisations. Bien sûr, il n'est pas question d'exploiter les minerais dans les sites hydrothermaux actifs, car la température qui y règne (400 °C) et l'acidité des fluides qui y circulent rendent illusoire toute tentative, au moins dans l'état actuel de nos capacités d'action. En revanche, sont considérés comme sites d'intérêt minier potentiel les gisements dits matures : une fois leur croissance achevée, on peut envisager de les exploiter. Il sera probablement nécessaire de développer des méthodologies nouvelles pour

localiser et évaluer plus facilement ces gisements. S'y ajoutera l'obligation de définir un état de référence biologique en vue de comprendre et prévoir l'impact des exploitations éventuelles sur l'activité biologique des grands fonds.

Tels sont les nombreux défis qui accompagnent l'arrivée de l'industrie dans les grands fonds.

4.2. Une législation sur les mers qui évolue

Devant cet engouement pour les gisements marins, se pose la question importante de la législation en œuvre dans les eaux nationales et internationales, ainsi que la coordination des actions industrielles et scientifiques menées sur les mêmes zones. Pour l'instant, mis à part le cas particulier de la zone à nodules du Pacifique, tous les permis miniers se situent dans les « eaux économiques » d'un pays, ce qui peut simplifier les formalités nécessaires pour l'obtention des permis. Cependant, l'ISA, qui coordonne des bases de données interactives sur les ressources minérales dans les eaux internationales – ces eaux représentent 60 % du domaine océanique –, a lancé en 2005 une réflexion scientifique et juridique sur la spécificité des minéralisations hydrothermales. Le démarrage, annoncé pour 2010, des premières exploitations de sulfures dans le Sud-Ouest Pacifique a accéléré le processus d'élaboration d'une réglementation générale concernant les nodules, les minéralisations hydrothermales et les encroûtements cobaltifères. L'ISA envisage en

particulier d'intervenir pour contrôler à la fois les exploitations menées et les questions environnementales. Le 20 juillet 2007, elle a conclu sa treizième session par la présentation d'un projet de règlement visant la prospection et l'exploration des sulfures polymétalliques associés aux dorsales et aux systèmes volcaniques sous-marins. Les discussions se poursuivent actuellement pour déterminer la taille des permis et les tarifs qui seront appliqués pour mener des investigations dans les « eaux internationales ». Il pourrait alors exister un risque d'accès limité à certaines zones internationales, en particulier les dorsales, pour mener les recherches scientifiques. L'Autorité a donc organisé une réunion spécifique sur ce point en mai 2008.

En parallèle, l'ISA favorise les coopérations entre pays : en février 2008, elle a mis en place un fond pour financer les échanges et la formation de chercheurs. L'Inde s'implique dans le programme en mettant en place une formation technologique en 2008. De même, l'ISA cite en exemple la campagne Nodinaute coordonnée par la France dans le cadre du projet Kaplan, dans le but d'établir un état de référence écologique dans les zones à nodules de Clarion-Clipperton.

4.3. Les minerais dans l'économie mondiale

Aujourd'hui, l'économie européenne est largement dépendante, souvent à plus de 90 % de ses importations

en métaux. Très longtemps, l'Union Européenne et notamment la France ont délaissé le secteur des matières premières minérales. En revanche, les États-Unis, le Canada, l'Australie et plus récemment la Chine ont maintenu une réflexion stratégique sur ce sujet et dégagé une vision moderne sur la disponibilité des matières premières minérales à l'échelle de la Planète. Les données économiques récentes montrent pourtant que l'accès aux métaux – dont on se souvient qu'il s'agit d'une ressource non renouvelable – peut devenir un enjeu stratégique. Les possibilités offertes par les récentes découvertes ouvrent des perspectives pour tous les pays du monde. La France est particulièrement bien placée grâce à l'étendue de son domaine maritime (deuxième zone économique exclusive mondiale), la variété

de ses fonds océaniques et la qualité de ses équipes de recherche. Les recherches nécessaires, complexes et coûteuses, nécessiteront une collaboration internationale structurée dans laquelle la France s'est déjà fortement impliquée, assurant dans de nombreux cas le leadership des actions. Il est également important que l'Europe se définisse une stratégie géopolitique face aux autres grands pôles mondiaux et finance enfin des recherches dans les eaux internationales au lieu de se restreindre, comme c'est le cas actuellement, à ses seules eaux économiques. C'est un enjeu majeur si l'Europe veut conserver sa position de premier plan mondial au niveau scientifique et technologique, et se positionner sur les enjeux économiques nouveaux que constituent les ressources potentielles des grands fonds océaniques.

Bibliographie

- Cronan D. (2000). Handbook of marine mineral deposits, CRC Press London, 406 p.
- Hein J., Koschinsky A., Bau M., Manhein F., Kang J.K., Robert L. (2000). Cobalt-rich ferromanganese crust in the Pacific, In Cronan editor, D., Handbook of marine mineral deposits, CRC Press London, 239-279.
- Fouquet Y. (2002). Sulfures polymétalliques hydrothermaux océaniques, Les techniques de l'industrie minière, **15** : 51-65.
- Fouquet Y. (2003). Prospective sur les ressources minérales des grands fonds océaniques. État des connaissances. Éléments d'appréciation. Rapport interne Ifremer DRO/GM/03/10 6, 57 p.
- Hoffert M. (2008). Les nodules polymétalliques dans les grands fonds océaniques, Société Géologique de France, Vuibert, 429 p.
- Clairet S. (2007). Au plus profond des océans, les trésors d'un monde à venir, Diplomatie, Hors série n° 2, *Géopolitique et géostratégie des mers et des océans*, 92-93.
- Lenoble J.P. (1996). Les nodules polymétalliques bilan de 30 ans de travaux dans le monde, Chronique de la recherche minière N° 524, 15-37.
- Varet J. (2005). Les matières premières minérales, flambée spéculative ou pénurie durable, Futuribles n° 308, 15-23.
- Rona P. (2003). Resources of the seafloor. *Science*, **299** : 673-674.
- Scott S.D. (2001). Deep Ocean Mining. *Geoscience Canada*, **28** : 87-94.

Crédits photographiques

- Fig. 1 : Diagramme construit d'après les données USGS.
- Fig. 4 : Ifremer – Campagne NIXONAUT.
- Fig. 5 : Ifremer – Y. Fouquet.
- Fig. 6 : Ifremer.
- Fig. 7 : Document ISA.
- Fig. 12 : Ifremer/Y. Fouquet Campagne NODCO.
- Fig. 13 : Modifié d'après Hein *et al.*, 2000.
- Fig. 15 : SEED/Schlumberger, www.seed.slb.com/
- Fig. 16b : Ifremer – Campagne NAUTILAU.
- Fig. 17 : Modifié d'après Yves Fouquet, 2002.
- Fig. 18 : Ifremer/Yves Fouquet.
- Fig. 19 : Ifremer – Campagne SERPENTINE 2007. Site Logatchev, dorsale Atlantique 14°45' Nord.
- Fig. 20 : Ifremer – Campagne SERPENTINE 2007. Site Krasnov, dorsale Atlantique 64°38' Nord.