



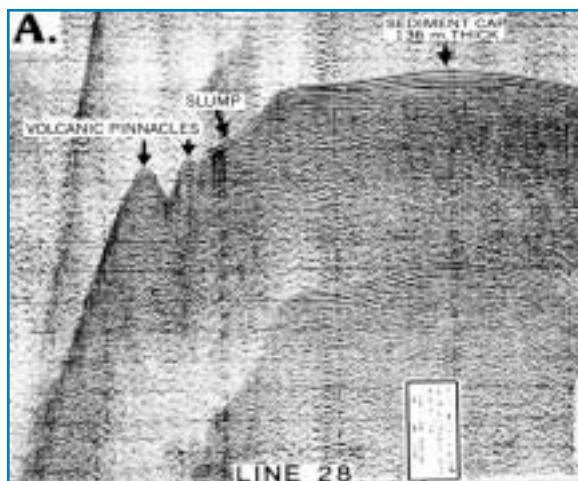
Encroûtements riches en cobalt

- Caractéristiques
- Composition
- Utilisations industrielles
- Facteurs économiques
- Règlement futur

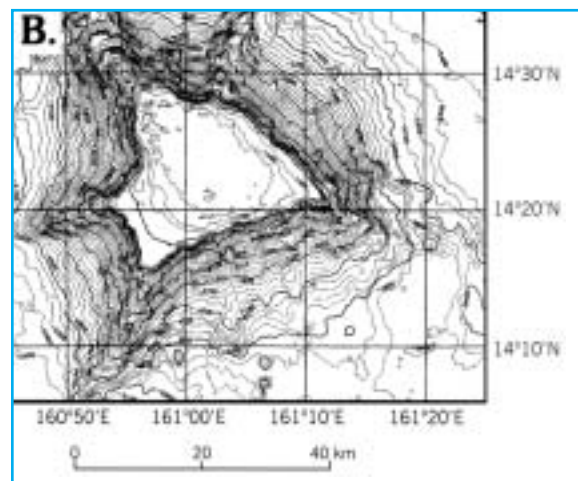
Conformément à la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de 1982, l'Autorité internationale des fonds marins est l'organe chargé d'organiser et de contrôler toutes les activités menées dans la zone internationale des fonds marins en ce qui concerne la mise en valeur des ressources. En 2001, l'Autorité a examiné une proposition en vue d'élaborer un règlement régissant les activités de prospection et d'exploration de deux ressources minérales océaniques récemment découvertes : les sulfures polymétalliques et les **encroûtements cobaltifères**. De même que le règlement relatif à la prospection et à l'exploration des nodules polymétalliques adopté en 2000, le nouveau projet de règlement régirait les activités de l'Autorité et de tout organisme privé ou public ayant conclu un contrat avec cette dernière en vue d'étudier la richesse de ces gisements dans la zone internationale des fonds marins, hors de toute juridiction nationale.

Présence, formation et répartition

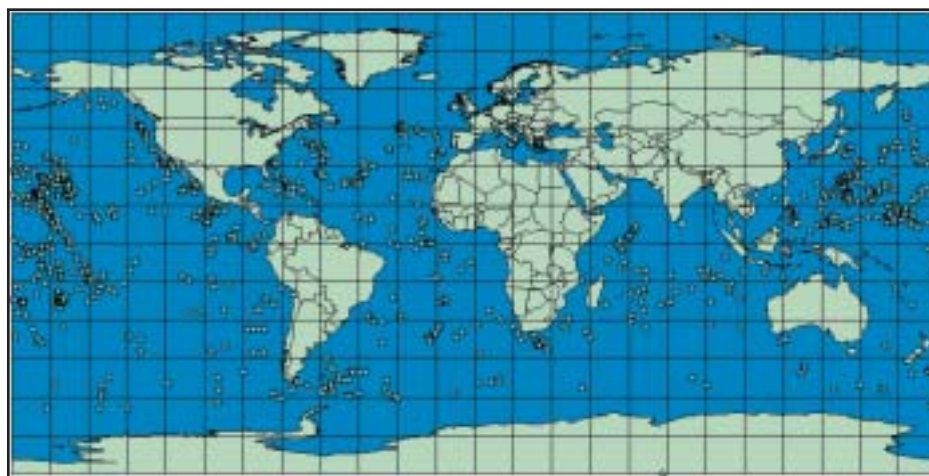
Les gisements oxydés d'encroûtements de ferromanganèse riches en cobalt sont omniprésents dans les océans du globe sur les flancs et les sommets des monts sous-marins (montagnes sous-marines), les dorsales et les plateaux, et ils se forment sur le plancher marin où les courants ont empêché la sédimentation des roches pendant des millions d'années. Ces encroûtements peuvent être énormes, certains atteignant les dimensions des chaînes montagneuses sur les continents. L'océan Pacifique, qui renferme les gisements les plus riches, contiendrait environ 50 000 monts sous-marins, mais très peu d'entre eux ont été cartographiés et échantillonnés en détail. Par ailleurs, on trouve beaucoup moins de montagnes sous-marines dans les océans Atlantique et Indien.



A. Profil de sismique-réflexion d'un mont sous-marin dans le Pacifique central



B. Carte bathymétrique d'un mont sous-marin tabulaire (guyot) des Îles Marshall (Pacifique central occidental)



Points d'échantillonnage d'encroûtements de ferromanganèse cobaltifères

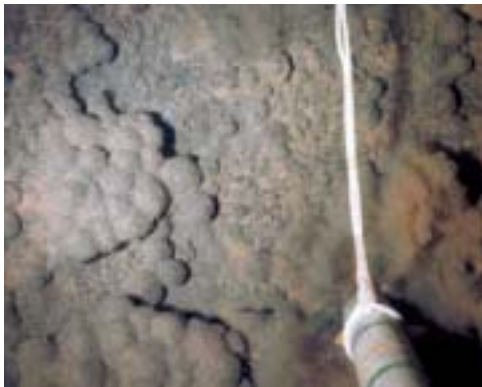
Les encroûtements sont composés de minéraux qui se forment sur les roches par précipitation à partir de l'eau de mer froide, phénomène sans doute favorisé par l'activité bactérienne. Ils couvrent des plages dont l'épaisseur peut atteindre 25 centimètres, s'étendant sur de nombreux kilomètres carrés. Selon une estimation, environ 6 350 000 kilomètres carrés, soit 1,7 % des fonds océaniques, sont couverts par des encroûtements cobaltifères, ce qui équivaut à une masse totale de près d'un milliard de tonnes de cobalt.

Les encroûtements ne se forment pas dans les zones où la surface rocheuse est tapissée de sédiments, mais dans des profondeurs comprises entre 400 et 4 000 mètres, contrairement aux nodules de manganèse qui se forment entre 4 000 et 5 000 mètres de profondeur. Les plus épais et les plus riches en cobalt apparaissent sur le bord extérieur de la région apicale des monts sous-marins, sur les terrasses et sur de vastes ensembles, à des profondeurs de 800 à 2 500 mètres.

Les encroûtements se forment généralement au rythme d'une couche moléculaire tous les un à trois mois, soit de 1 à 6 millimètres par million d'années, ce qui est l'un des processus naturels les plus lents sur terre. Par conséquent, la formation d'un encroûtement épais peut prendre jusqu'à 60 millions d'années. Dans certains

d'entre eux on retrouve la trace de deux périodes de formation s'étendant sur les 20 millions d'années écoulées, avec une interruption dans l'accrétion du ferromanganèse vers la fin du Miocène, il y a environ 8 à 9 millions d'années, lorsqu'une couche de phosphorite s'est déposée. Cette séparation entre matériaux plus anciens et plus jeunes peut permettre d'identifier des gisements plus anciens et donc plus riches. La présence de gisements plus riches à des profondeurs où l'eau est plus pauvre en oxygène a conduit les chercheurs à attribuer une partie de l'enrichissement en cobalt à la faible teneur en oxygène de l'eau de mer.

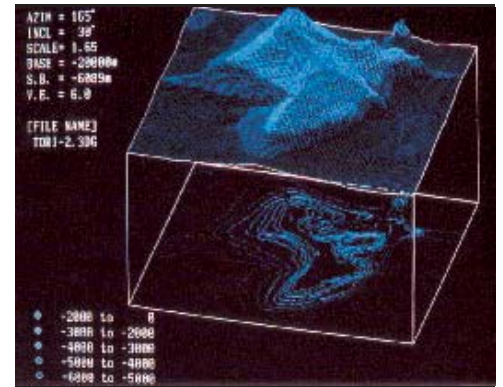
Compte tenu de la qualité, du tonnage et des conditions océanographiques, la région centrale du Pacifique équatorial semble la plus prometteuse en termes d'exploitation, notamment les zones économiques exclusives des États-Unis (Johnston Island et Hawaï), des Îles Marshall, des États fédérés de Micronésie ainsi que les eaux internationales au milieu de l'océan Pacifique. En outre, les encroûtements situés dans les eaux peu profondes renferment la plus grande concentration de minéraux, ce qui constitue un atout non négligeable pour l'exploitation. (Les zones économiques exclusives sont des zones océaniques qui s'étendent jusqu'à 200 miles marins à partir des lignes côtières et à l'intérieur desquelles les États côtiers bénéficient de droits exclusifs sur les ressources.)



Encroûtements de ferromanganèse sur un mont sous-marin (CoRMC-H. Auki)



Section d'un encroûtement de ferromanganèse (CoRMC-H. Auki)



Modélisation d'un mont sous-marin contenant des encroûtements de ferromanganèse (CoRMC-H. Auki)

Caractéristiques et composition

Outre le cobalt, les encroûtements contiennent également de nombreux autres éléments métalliques et de terres rares, tels que : titane, cérium, nickel, platine, manganèse, phosphore, thallium, tellure, zirconium, tungstène, bismuth et molybdène. Les encroûtements sont composés de vernadite (oxyde de manganèse) et de feroxyhyte (oxyde de fer). Les encroûtements épais contiennent des quantités moyennes de carbonate fluorapatite, tandis que la plupart des encroûtements contiennent de faibles quantités de quartz et de feldspath. Leur teneur maximale en cobalt peut aller jusqu'à 1,7 %, et de vastes zones de certains monts marins peuvent présenter des encroûtements dont la teneur moyenne en cobalt peut atteindre 1%. Ces proportions de cobalt sont plus élevées que celles des gisements terrestres où elles varient entre 0,1 et 0,2 %. Après le cobalt, les minéraux les plus précieux sont, par ordre d'importance : le titane, le cérium, le nickel et le zirconium.

Il est également indispensable de tenir compte des différences de propriétés physiques entre les encroûtements et les roches sur lesquelles ils reposent. Les substrats rocheux étant de types très variés, ces différences sont difficiles à distinguer par les techniques de télédétection habituelles. Toutefois, leur rayonnement gamma beaucoup plus élevé peut aider à les isoler de leur substrat rocheux. Ainsi, la mesure de ce rayonnement par télédétection peut être utile pour l'exploration des encroûtements recouverts d'une fine couche sédimentaire et pour mesurer l'épaisseur des encroûtements sur les monts sous-marins.

Les prospecteurs ont défini un certain nombre de critères pour identifier des zones d'exploitation d'encroûtements, notamment : de vastes monts marins situés à une profondeur de 1 000 à 1 500 mètres, dont l'âge soit supérieur à 20 millions d'années, qui ne sont pas couronnés par des atolls ou des récifs de grandes dimensions, qui sont situés dans des zones parcourues en permanence par de forts courants de fond, associées à une zone pauvre en oxygène bien développée,

à une faible profondeur dans la colonne d'eau et à l'abri de débris fluviaux et éoliens notables. De surcroît, ils rechercheront un fond peu accidenté, la présence de terrasses, d'enselements et de couloirs sur les sommets, avec une pente stable et sans volcanisme local. Ils choisiront de préférence des encroûtements d'une teneur moyenne en cobalt d'au moins 0,8 % et d'une épaisseur moyenne d'au moins 4 centimètres.

Composition minéralogique des dépôts de sulfures polymétalliques du plancher océanique

	Dépôts d'arrière-arc	Dépôts de dorsale médio-océanique
Fe-sulfure	pyrite, marcassite, pyrrhotite	pyrite, marcassite, pyrrhotite
Zn-sulfure	sphalérite, wurtzite	sphalérite, wurtzite
Cu-sulfure	chalcopryrite, isocubanite	chalcopryrite, isocubanite
Silicates	silice amorphe	silice amorphe
Sulfates	anhydrite, barytine	anhydrite, barytine
Pb-sulfures	galène, sels sulfurés	
As-sulfures	orpiment, réalgar	
Cu-As-Sb-sulfures	tennantite, tétraédride	
métaux natifs	or	

Utilisations industrielles

Les types de métaux contenus dans les encroûtements cobaltifères (notamment le cobalt, le manganèse et le nickel) sont utilisés pour conférer des propriétés spécifiques à l'acier, telles que la dureté ou la résistance et empêcher la corrosion. Dans les pays industriels, entre un quart et la moitié de la consommation de cobalt est employée par l'industrie aéronautique pour la fabrication des superalliages. Ces métaux sont également utilisés dans les industries chimiques et de haute technologie, notamment pour fabriquer des cellules photovoltaïques et des piles solaires, des supraconducteurs, des systèmes laser de pointe, des catalyseurs, des piles à combustible et des aimants de grande puissance ainsi que des outils de coupe.

État actuel des recherches

La première étude systématique des encroûtements a été effectuée en 1981 dans le Pacifique central et les travaux ont été faits par plusieurs groupes réunissant les pays suivants : Allemagne, États-Unis d'Amérique, Union des Républiques socialistes soviétiques (puis Fédération de Russie), Japon, France, Royaume-Uni, Chine et République de Corée. Les études sur le terrain entreprises par les États-Unis d'Amérique, l'Allemagne, le Royaume-Uni et la France sont terminées. Les études les plus détaillées ont porté sur des gisements situés dans le Pacifique équatorial, principalement à l'intérieur des zones économiques exclusives des États insulaires. Les encroûtements cobaltifères, tout comme d'autres gisements de minéraux ont fait l'objet de 42 campagnes (1981-2001) dans les eaux profondes du Pacifique, le coût total des opérations de recherche et d'exploration étant compris entre 70 et 100 millions de dollars. Un grand nombre de ces campagnes ont été effectuées par le Japon pour le compte des petits États insulaires en développement membres de la Commission du Pacifique Sud pour les sciences de la terre appliquées (SOPAC), dans le cadre d'un projet sur 15 ans, commencé en 1985.

Exploration et exploitation minière futures

Pour localiser les zones susceptibles d'être productives, il faut tout d'abord élaborer des cartes détaillées des gisements et appréhender dans sa totalité la microtopographie des monts marins, notamment des profils sismiques. Lorsque les sites d'échantillonnage ont été identifiés, on prélève des échantillons par dragage et carottage et on procède à des levés au moyen de caméras vidéo et de sonars pour définir le type et la répartition des encroûtements, des roches et des sédiments. Des navires de grande taille et bien équipés seront nécessaires en raison du nombre important d'émetteurs acoustiques de fond, des dimensions de l'équipement remorqué et du volume des échantillons prélevés. Lorsque les opérations de prospection seront plus avancées, on conseille d'utiliser des submersibles avec équipage ou des véhicules sous-marins téléguidés. Pour les évaluations environnementales, il sera nécessaire d'utiliser des mouillages de courantomètres, de prélever des échantillonnages et de procéder à des levés biologiques.

L'exploitation des encroûtements est techniquement beaucoup plus difficile que celle des nodules de manganèse. La récupération des nodules est relativement aisée puisqu'ils reposent sur un substrat de sédiments meubles, tandis que les encroûtements sont plus ou moins solidement rattachés au substrat. Pour une exploitation réussie, il est indispensable de récupérer les croûtes sans enlever trop de substrat rocheux, ce qui diluerait considérablement la teneur en minerai. L'une des méthodes de récupération proposées fait intervenir un véhicule qui se déplace sur le fond marin et qui est attaché à un navire d'exploitation minière en surface, au moyen d'un système de conduite de remontée hydraulique et d'un câble électrique. Il est doté de têtes articulées qui pourraient fragmenter les croûtes tout en réduisant au maximum la quantité de substrat rocheux prélevée (figure). Parmi les systèmes novateurs qui ont été suggérés, on peut citer la découverture au jet d'eau pour séparer les encroûtements de la roche, la lixiviation chimique in situ et le détachement des croûtes du substrat par effet acoustique. En dehors du Japon, les travaux de recherche-développement sur les techniques d'extraction des encroûtements restent limités. Même si plusieurs idées ont été avancées, la recherche n'en est encore qu'à ses débuts.

Environnement des monts sous-marins

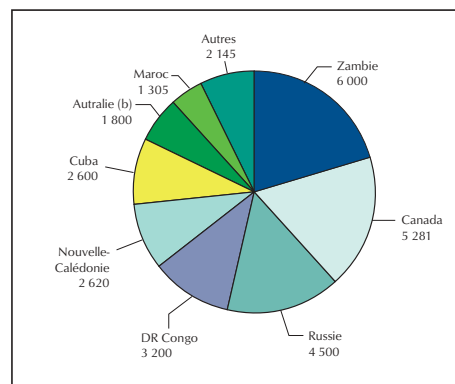
Il est essentiel de procéder à des études supplémentaires pour mieux connaître la nature des communautés biologiques qui vivent sur les monts sous-marins et formuler des recommandations sur l'impact de l'exploration et de l'exploitation des encroûtements sur l'environnement. On sait peu de choses sur ces communautés, outre le fait qu'elles sont complexes et variables; deux monts sous-marins à la même profondeur peuvent avoir des composants biologiques complètement différents. Leur composition et leurs caractéristiques dépendent de la structure des courants, de la topographie, des sédiments du fond marin, des types de roches et de la couverture rocheuse, de la taille du mont, de la profondeur et de la teneur en oxygène de l'eau de mer.

Il est aussi essentiel d'étudier les courants qui circulent autour des monts sous-marins pour pouvoir mettre au point des matériels et des techniques d'extraction appropriés, et déterminer les trajets d'évacuation des particules et déchets remis en suspension. Les monts sous-marins font obstacle à l'écoulement des courants océaniques, ce qui augmente le mélange turbulent et produit des remontées d'eau qui renforcent la productivité primaire. Les effets de ces courants se font le plus souvent sentir sur le pourtour du sommet des monts, zone où l'on trouve les encroûtements les plus épais.

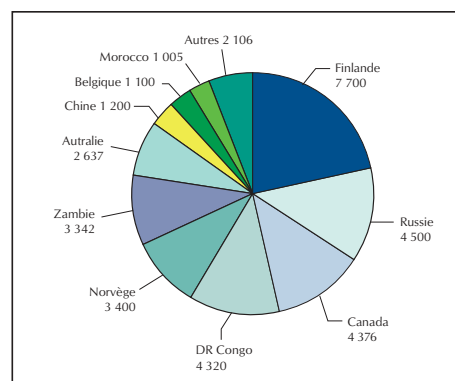
Facteurs économiques

Outre une teneur en cobalt plus élevée que celle des nodules de manganèse abyssaux, les encroûtements ont l'avantage d'être situés à l'intérieur des zones économiques exclusives des États insulaires, dans les eaux peu profondes plus proches des installations côtières. À la fin des années 70, on a pris conscience de l'intérêt économique potentiel des encroûtements et, en 1978, les prix du cobalt se sont envolés à la suite de la guerre civile dans les régions d'extraction minière du Zaïre (devenu la République démocratique du Congo), qui était alors le plus gros producteur de cobalt du monde. Du fait de la baisse continue de la production dans ce pays, dès 2000, la Zambie, le Canada et la Fédération de Russie réunis représentaient plus de la moitié de la production minière mondiale, soit environ 29 500 tonnes (schéma).

Production de cobalt, 2000 (en tonnes)



Mine de cobalt



Cobalt raffiné

Le prix du cobalt sur le marché du disponible, à l'instar de celui de nombreux autres métaux communs, a enregistré une baisse constante sur 30 mois depuis mai 1999, passant de plus de 20 dollars la livre à moins de 10 dollars la livre. Traditionnellement, le prix du cobalt a toujours été plutôt volatil : pendant la période de troubles qu'a connue en 1979 la province de Shaba, dans l'ex-Zaïre, le prix a quadruplé en quelques semaines. À cette époque, le Zaïre représentait près de la moitié de l'offre mondiale. La production est désormais beaucoup moins concentrée géographiquement, mais la demande est plutôt inélastique par rapport au prix à court et à moyen terme. Si l'offre devient insuffisante, le prix peut toujours doubler assez rapidement.

L'une des raisons de l'incertitude qui caractérise l'offre repose sur le fait que, pour les principaux producteurs du Zaïre et de la Zambie, la production de cobalt n'est qu'un sous-produit de l'extraction minière du cuivre. Ainsi, l'approvisionnement en cobalt est lié à la demande de cuivre, de même que l'approvisionnement en tellure. Ces aléas ont conduit les entreprises industrielles à chercher des solutions de remplacement, de sorte que le marché de ces matériaux n'enregistre qu'une

croissance limitée. La découverte de sources alternatives importantes devrait inciter à les utiliser à nouveau et entraîner une expansion du marché. La demande d'un ou de plusieurs des nombreux métaux autres que le cobalt qui se trouvent concentrés dans les encroûtements pourrait finalement devenir la principale raison évoquée pour entreprendre l'extraction.

Malgré les incertitudes économiques et technologiques, au moins trois entreprises se sont déclarées intéressées par l'extraction des encroûtements. L'évolution de plusieurs facteurs pourrait modifier l'environnement économique et favoriser l'extraction minière sous-marine, par exemple les priorités en matière d'utilisation des sols, les questions relatives à l'eau douce et les préoccupations environnementales dans les zones minières terrestres. On s'aperçoit de plus en plus que les encroûtements cobaltifères constituent une ressource potentielle importante. Il est donc nécessaire d'entreprendre des recherches et des explorations et de mettre au point des technologies pour obtenir de nouvelles informations sur les divers aspects de leur extraction.

Valeur des métaux présents dans une tonne métrique d'encroûtements cobaltifères

	Prix moyen du métal (1999 dollars/kg)	Teneur moyenne des encroûtements (ppm)	Valeur d'une tonne métrique de minerai (dollars)
Cobalt	\$39,60	6 899	\$273,20
Titane	7,70	12 035	92,67
Cérium	28,00	1 605	44,94
Zirconium	44,62	618	27,58
Nickel	6,60	4 125	27,23
Platine	13 024,00	0,5	6,37
Molybdène	8,80	445	3,92
Tellure	44,00	60	2,64
Cuivre	1,65	896	1,48
Total	—	—	\$480,03

kg = kilogramme; ppm = partie par million, soit un gramme par tonne.

Règlement futur

Les questions relatives au régime de prospection et d'exploration des sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères dans la zone internationale des fonds marins ont été abordées en profondeur pour la première fois en août 2002, par les 36 membres du Conseil de l'Autorité et par la Commission juridique et technique du Conseil. La question avait été portée à l'attention de l'Autorité par la Fédération de Russie en 1998. Plusieurs clauses types ont été élaborées par le secrétariat en 2001, compte tenu des observations des participants à un atelier scientifique convoqué par l'Autorité, en 2000.

Il fallait notamment déterminer si ces deux catégories de ressources devaient être couvertes par des règlements distincts et dans quelle mesure ils devaient différer des réglementations en vigueur pour les nodules polymétalliques, adoptées par l'Autorité en 2000. Le régime dit « parallèle » envisagé par la Convention sur le droit de la mer, aux termes duquel les secteurs des fonds marins attribués aux prospecteurs potentiels sont partagés équitablement entre ces contractants et l'Autorité, a été élaboré pour régir l'extraction des nodules qui sont disséminés sur des zones étendues, lesquelles peuvent être partagées de manière plus équitable.

Au contraire, les encroûtements cobaltifères et les sulfures polymétalliques se développent dans des zones plus concentrées, ils sont répartis de façon plus inégale et leur teneur en métal varie considérablement d'un endroit à l'autre. Par ailleurs, la plupart des gisements connus d'encroûtements et de sulfures se trouvent dans des zones relevant de la juridiction nationale et leur mise en valeur concurrencerait celle de la zone internationale des fonds marins. Il a donc, entre autres, été proposé que plutôt que d'exploiter ses secteurs réservés, l'Autorité pourrait conclure des accords d'entreprises conjointes avec les contractants.

L'Autorité poursuivra ses travaux sur ce point en 2003.