



Nodules polymétalliques

- Composition chimique
- Théories explicatives de la formation des nodules
- Répartition géographique
- Techniques d'exploration
- Techniques de traitement

NATURE DES MINÉRAUX

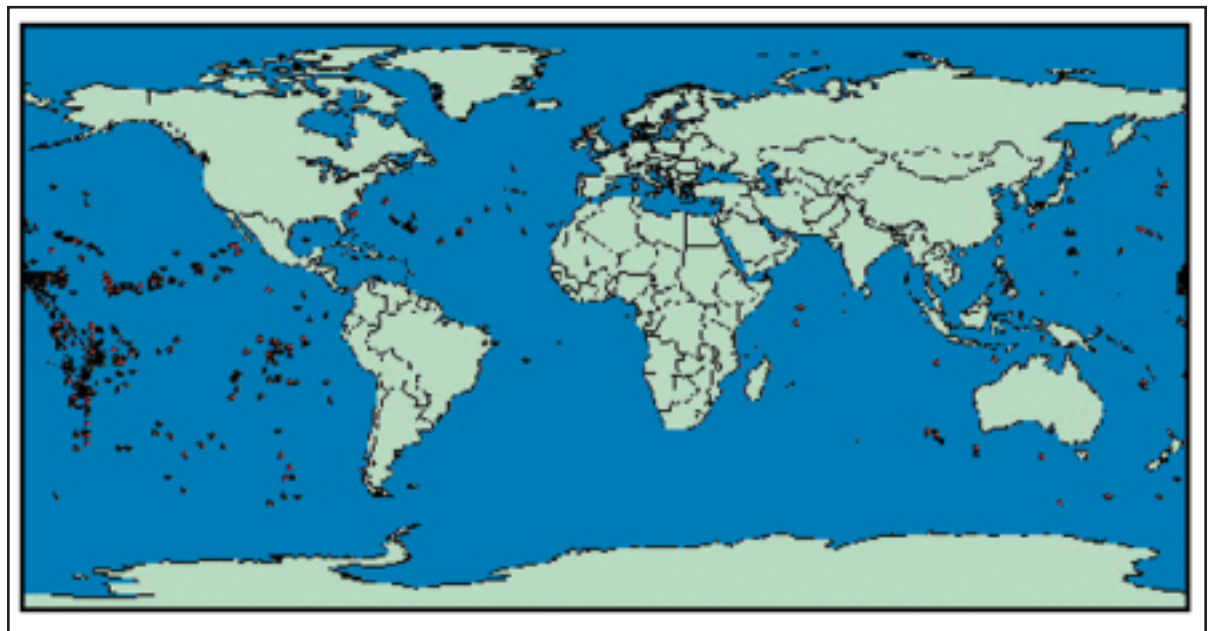
Les nodules polymétalliques ont été découverts à la fin du XIX^e siècle dans la mer de Kara, dans l'océan Arctique, au large des côtes sibériennes (1868). Par la suite, l'expédition scientifique du H.M.S Challenger (1872-1876) a permis de constater qu'on en trouvait dans la plupart des océans du globe.

Les nodules polymétalliques, ou nodules de manganèse, sont des concrétions de roche formées de couches concentriques d'hydroxides de fer et de manganèse disposées autour d'un noyau. Ce noyau, souvent microscopique, est parfois totalement transformé en minéraux manganésifères par cristallisation. Lorsqu'il est visible, il peut s'agir d'une petite coquille de microfossile (radiolaire ou foraminifère), d'une dent de requin recouverte de phosphate, d'un débris de basalte ou même d'un fragment d'ancien nodule. L'épaisseur et la régularité des couches concentriques reflètent les phases successives de croissance. Sur certains nodules, elles sont discontinues et présentent des différences importantes d'un côté à l'autre. De taille variable, les nodules peuvent être très petits et visibles seulement au microscope ou former de très grosses masses sphériques de plus de 20 centimètres. Toutefois, la plupart mesurent entre 5 et 10 centimètres de diamètre et ont à peu près la grosseur d'une pomme de terre. Leur surface est généralement lisse, parfois rugueuse, mamelonnée (globuleuse) ou irrégulière. La partie inférieure, enfouie dans les sédiments, est généralement moins lisse que la partie supérieure.

Les nodules reposent sur le fond (plancher sédimentaire), le plus souvent à demi enterrés. Certains sont complètement recouverts par les sédiments et il est arrivé que des nodules soient remontés alors qu'ils étaient invisibles sur les photographies. Leur abondance est extrêmement variable. Ils peuvent couvrir plus de 70 % du fond et sont alors contigus. On estime toutefois que, pour présenter un intérêt économique, leur abondance doit être supérieure à 10 kilogrammes par mètre carré, de 15 kilogrammes par mètre carré en moyenne dans les zones de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. On en trouve à toutes les profondeurs, mais les plus fortes concentrations ont été repérées entre 4 000 et 6 000 mètres.



Nodules polymétalliques.



Carte mondiale indiquant les endroits où des nodules polymétalliques ont été découverts.

Chimie

La composition chimique

des nodules varie selon le

type de minéraux manganésifères et selon l'importance et la nature du noyau. Les nodules ayant un intérêt économique sont composés de :

Manganèse ...29 %

Fer6 %

Silicium5 %

Aluminium3 %

Nickel*1.4 %

Cuivre*1.3 %

Cobalt*0.25 %

Oxygène1.5 %

Hydrogène...1.5 %

Sodium1.5 %

Calcium1.5 %

Magnésium ..0.5 %

Potassium ...0.5 %

Titane0.2 %

Baryum0.2 %

* le nickel, le cuivre et le cobalt sont les métaux les plus précieux.

Formation

Plusieurs théories ont été avancées pour expliquer la formation des nodules. Les deux plus connues font intervenir :

1. Le processus « hydrogénétiq ue » : les concrétions sont formées par précipitation lente des éléments métalliques présents dans l'eau de mer. Les nodules ainsi formés ont des teneurs équivalentes en fer et en manganèse et une teneur relativement élevée en nickel, cuivre et cobalt.
2. Le processus « diagénétiq ue » : le manganèse est remobilisé dans la colonne sédimentaire et précipite à l'interface eau-sédiment. Ces nodules sont riches en manganèse et pauvres en fer et en nickel, cuivre et cobalt.

Les autres mécanismes envisagés sont

- Le processus « hydrothermal » : l'origine des métaux se trouve dans les sources chaudes associées à l'activité volcanique;
- Le processus « halmyrolitique » : les constituants métalliques résultent de l'attaque par l'eau de mer des débris basaltiques;
- Le processus « biologique » : l'activité de micro-organismes favorise la précipitation d'hydroxydes métalliques.

Facteurs communs

Plusieurs de ces processus peuvent se dérouler en même temps ou se succéder au cours de la formation d'un nodule, d'où la difficulté d'opter pour l'une ou l'autre de ces théories. Plusieurs facteurs communs semblent toutefois bien établis :

1. La formation de nodules nécessite une sédimentation lente ou un processus qui élimine les sédiments avant qu'ils aient le temps de s'accumuler. Les concrétions peuvent de cette façon se développer avant d'être enfouies, c'est-à-dire privées des conditions favorables à leur développement;
2. Le plancton concentre des éléments traces tels que le cuivre et le nickel. La matière organique qui tombe sur le fond marin et qui provient du plancton mort est sans doute à l'origine de l'incorporation de métal dans les nodules;
3. Le manganèse contenu dans l'eau de mer provient principalement des sources hydrothermales c'est-à-dire du lessivage des basaltes lors de la remontée des liquides hydrothermaux au travers de la croûte océanique;
4. La formation de concrétions est favorisée par l'activité de micro-organismes.



Nodules polymétalliques (Christina Loarie)

La croissance des nodules est considérée comme l'un des phénomènes géologiques les plus lents (de l'ordre de 1 centimètre sur plusieurs millions d'années). L'âge des nodules de l'océan Pacifique est donc de 2 à 3 millions d'années. Cependant, on a aussi observé des formations rapides de dépôt de ferromanganèse près des épaves de navires coulés pendant la Première Guerre mondiale. Une croissance aussi rapide limite le nombre des hypothèses envisageables quant à l'origine des éléments et à la façon dont ils se combinent. Si les nodules se forment lentement, les hypothèses « hydrogénétiq ue » ou « diagénétiq ue » peuvent être retenues, mais s'ils se forment rapidement, il est très probable qu'interviennent des sources métalliques autres que l'eau de mer ou les sédiments. Dans ce



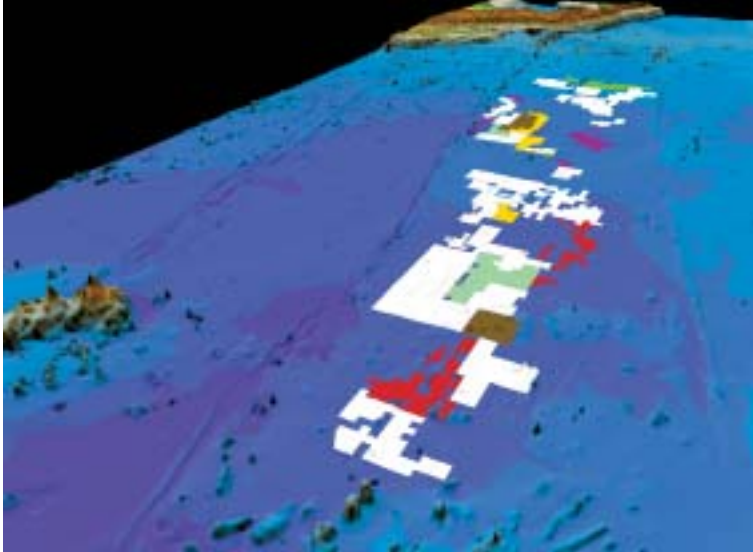
Section transversale d'un nodule polymétallique

cas, l'hypothèse « hydrothermale » ou même « halmyrolitique » serait à retenir.

Il faudrait également expliquer pourquoi les nodules demeurent à la surface alors que les sédiments se forment plus rapidement qu'eux. Même pour les boues résiduelles à radiolaires, la vitesse moyenne de sédimentation est de l'ordre de quelques millimètres tous les 1 000 ans. De ce fait, les nodules devraient être enfouis sous plusieurs mètres de sédiment. On suppose que les organismes benthiques qui vivent sur les gisements (vers polychètes ou échiuriens) « nettoient » la partie supérieure des nodules des particules qui s'y déposent et les rejettent sur le côté ou même en dessous des nodules, ce qui empêche l'enfouissement.

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

Des nodules ont été trouvés dans tous les océans et même dans certains lacs, mais on connaît surtout l'emplacement de ceux qui présentent un intérêt économique. Trois régions ont été choisies pour la prospection industrielle : le centre du Pacifique nord-central, le bassin du Pérou dans le Pacifique sud-est et le centre de l'océan Indien nord.



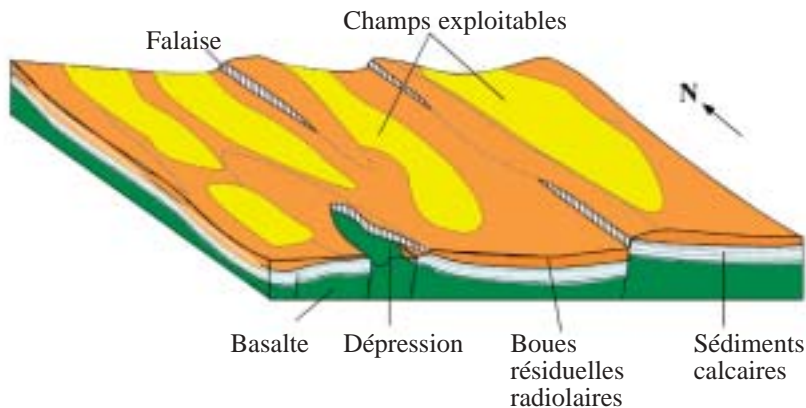
Zones réservées de l'Autorité internationale des fonds marins (en blanc). Avec l'autorisation du Law of the Sea Geoscience Group, Centre océanographique de Southampton (Royaume-Uni), 2003.

Dans ces régions, le fond marin se trouve à une profondeur de 4 000 à 5 000 mètres. Il est formé de collines abyssales, orientées nord-sud correspondant aux abrupts de la croûte océanique. Ces abrupts coïncident avec les fractures des basaltes qui se produisent pendant l'expansion de la croûte sur les dorsales médio-océaniques. À mesure qu'elle s'écarte de la dorsale, la croûte est progressivement recouverte par des sédiments.

Ainsi, dans le Pacifique nord, l'épaisseur des sédiments augmente en direction de l'ouest, passant de 50 à 150 mètres entre 120° et 155° de longitude O. Les crêtes des collines, espacées de 2 à 5 kilomètres, s'élèvent à une altitude de 100 à 300 mètres par rapport aux zones les plus basses. Des falaises verticales d'argile calcaire, qui peuvent atteindre 40 mètres de hauteur, parsèment les flancs des collines et de grandes fosses ont été observées sur les crêtes. Toutefois, si l'on ne tient pas compte de ces obstacles, la pente moyenne est inférieure à 10 %. Les champs exploitables peuvent être visualisés grâce à une simulation géostatistique établie à partir de la photographie en continu du fond. Dans les zones les plus favorables, ils mesureraient de 1 à 5 kilomètres de large sur 10 à 18 kilomètres de long et seraient orientés au nord. Ils pourraient couvrir 35 % du fond et contenir 15 kilogrammes de nodules par mètre carré.

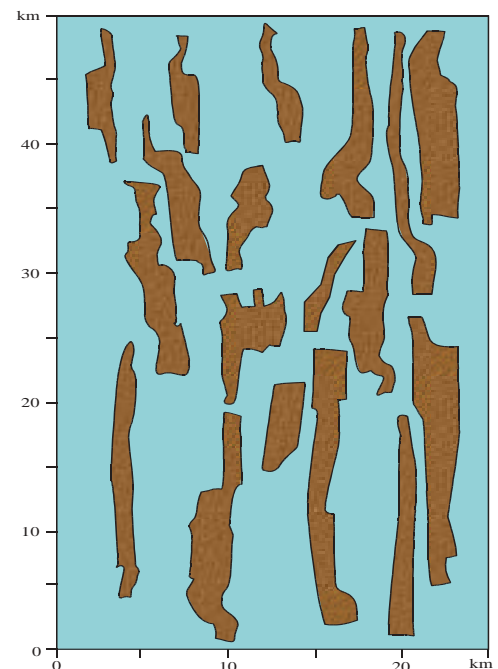
En 1965, J. Mero avait estimé à plus de 1,5 billion de tonnes la quantité totale de nodules polymétalliques présents sur le plancher océanique. Cette estimation a été ramenée à 500 milliards de tonnes par A. A. Archer en 1981. Toutefois, tous les champs de nodules ne se prêtent pas à une exploitation minière. On a tenté à plusieurs reprises de calculer les ressources probables en vue d'un développement futur en déterminant tout d'abord le nombre de « sites miniers » que pourrait accueillir la totalité des océans. Un site minier se définissait comme une portion du fond marin où une opération commerciale pourrait être poursuivie pendant 20 à 25 ans avec une production de 1,5 à 4 millions de tonnes par an de « bons nodules ». On entendait par bons nodules ceux qui contenaient en moyenne de 1,25 à 1,5 % de nickel et de 1 à 1,4 % de cuivre ainsi que de 27 à 30 % de manganèse et de 0,2 à 0,25 % de cobalt. Le nombre de ces sites variait selon les estimations de 8 à 225, ce qui correspondait, par déduction, à une ressource totale comprise entre 480 millions et 13,5 milliards de tonnes. D'autres considérations, notamment la capacité du marché mondial des métaux d'absorber la production au cours des 20 premières années et l'adoption de conditions d'extraction plus strictes, ont ramené cette variation de 3 à 10 sites, représentant une production de 100 à 600 millions de tonnes. Il s'agit là de « ressources hypothétiques obtenues par déduction ».

Dépôt de nodules polymétalliques



Champs exploitables dans des zones optimales

Simulation géostatistique dans la zone pionnière française



TECHNIQUES D'EXPLORATION

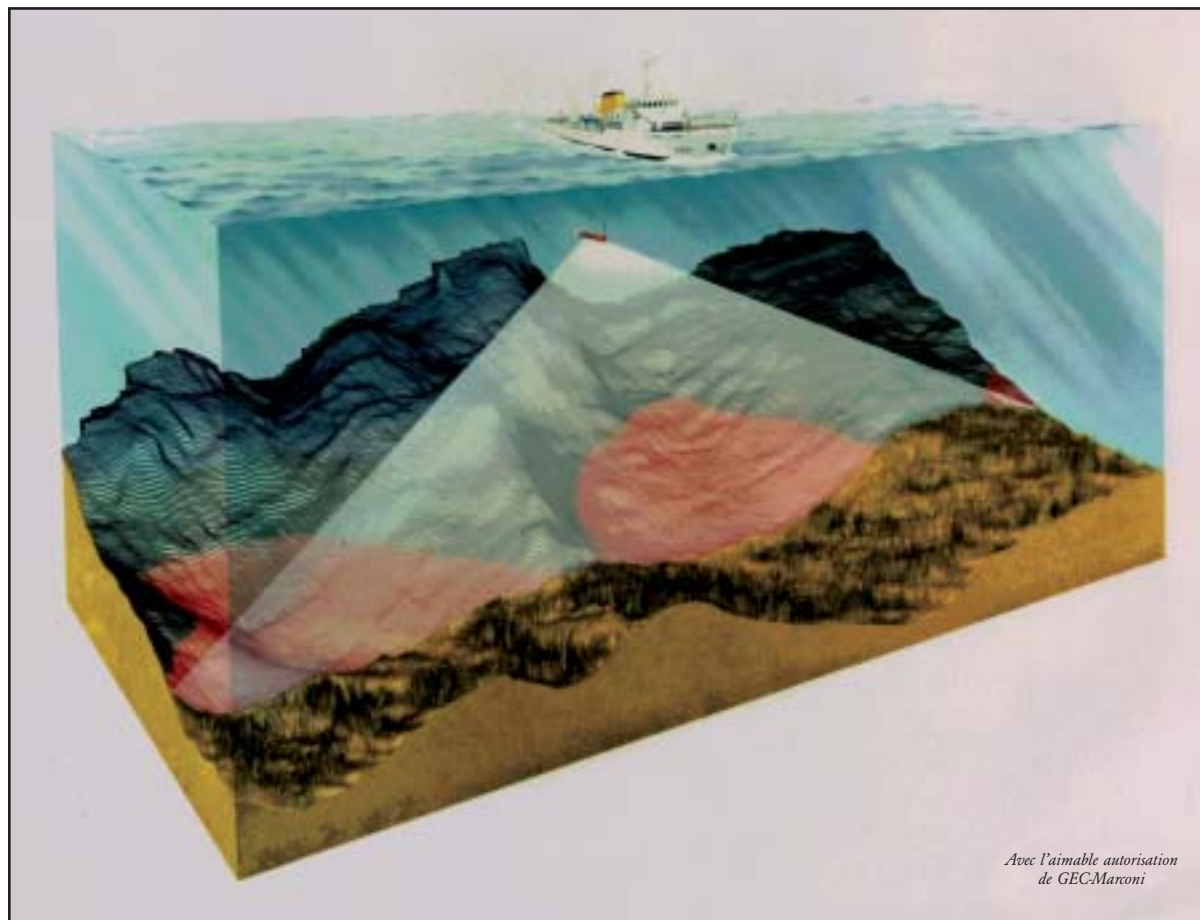
Diverses techniques ont été mises au point pour l'exploration des gisements de nodules polymétalliques. Au cours des années, des améliorations considérables ont été apportées à celles utilisées pour localiser ces ressources et en prélever des échantillons. La présente fiche technique passe en revue certaines de ces techniques.

TOPOGRAPHIE DES FONDS MARINS

L'échosondage (sonar) est utilisé depuis les années 30 pour déterminer la topographie des fonds marins. Les échosondeurs classiques émettent une onde sonore dans un cône formant un angle de 40 degrés et pointant directement sous le navire. La mesure de l'intervalle de temps qui sépare l'émission de l'impulsion sonore et son retour après réflexion sur le fond marin permet de calculer la profondeur, connaissant la vitesse de propagation du son dans l'eau (environ 1 500 mètres par seconde). Les profondeurs successives mesurées tandis que le navire avance permettent d'établir le profil topographique le long de sa route. Pour établir la carte détaillée d'une zone, il faut parcourir des trajets parallèles équidistants les uns des autres.

À la fin des années 70, des sondeurs multifaisceaux ont été mis au point. Ils émettent un ensemble de signaux acoustiques dans des faisceaux étroits (2 degrés) disposés en éventail perpendiculairement à l'axe du navire. Chaque émission fournit un ensemble de mesures de la profondeur correspondant aux différents points alignés de part et d'autre de la route du navire. Les échosondeurs modernes (sonar à balayage latéral) fournissent plus de 150 mesures pour chaque bande explorée (une tous les

130 mètres en moyenne), d'une largeur de 20 kilomètres à une profondeur de 4 000 mètres. De nombreux détails topographiques naguère invisibles peuvent à présent être discernés. La carte est établie à bord du navire dans la minute qui suit, ce qui permet de « lire » en temps réel la topographie d'une bande du fond marin. L'assemblage des bandes adjacentes est réalisé facilement par ordinateur. Avec le Système mondial de localisation par satellite (GPS) qui permet une précision de 1 mètre, la carte obtenue est aussi précise que les meilleures cartes topographiques terrestres à l'échelle 1/25 000. L'observation en surface est renforcée par des sonars remorqués le long du plancher marin. La plupart des prospecteurs ont utilisé des engins en chute libre capables de descendre par leurs propres moyens, de prélever des échantillons et de photographier le fond de l'océan puis de remonter en surface. Ces équipements peuvent récolter à chaque plongée quelques kilogrammes de nodules dans une zone de 0,25 mètre carré et photographier des secteurs d'une superficie de 2 à 4 mètres carrés. En étudiant simultanément les informations fournies par les échantillons et par les photographies, on peut estimer l'abondance de nodules en kilogrammes par mètre carré. Les bennes preneuses et les caméras actionnées par des câbles fournissent des informations plus fiables, mais le système est plus lent. Les améliorations qui ont été apportées récemment à la technologie du sonar devraient faciliter la mise au point de nouveaux appareils capables de mesurer la densité de la couche de nodules. Il suffira alors d'une campagne d'exploration plus courte pour cartographier l'abondance de nodules dans de plus vastes zones.



Modélisation d'un sondeur multifaisceaux

Avec l'aimable autorisation
de GEC-Marconi

TECHNIQUES D'EXTRACTION

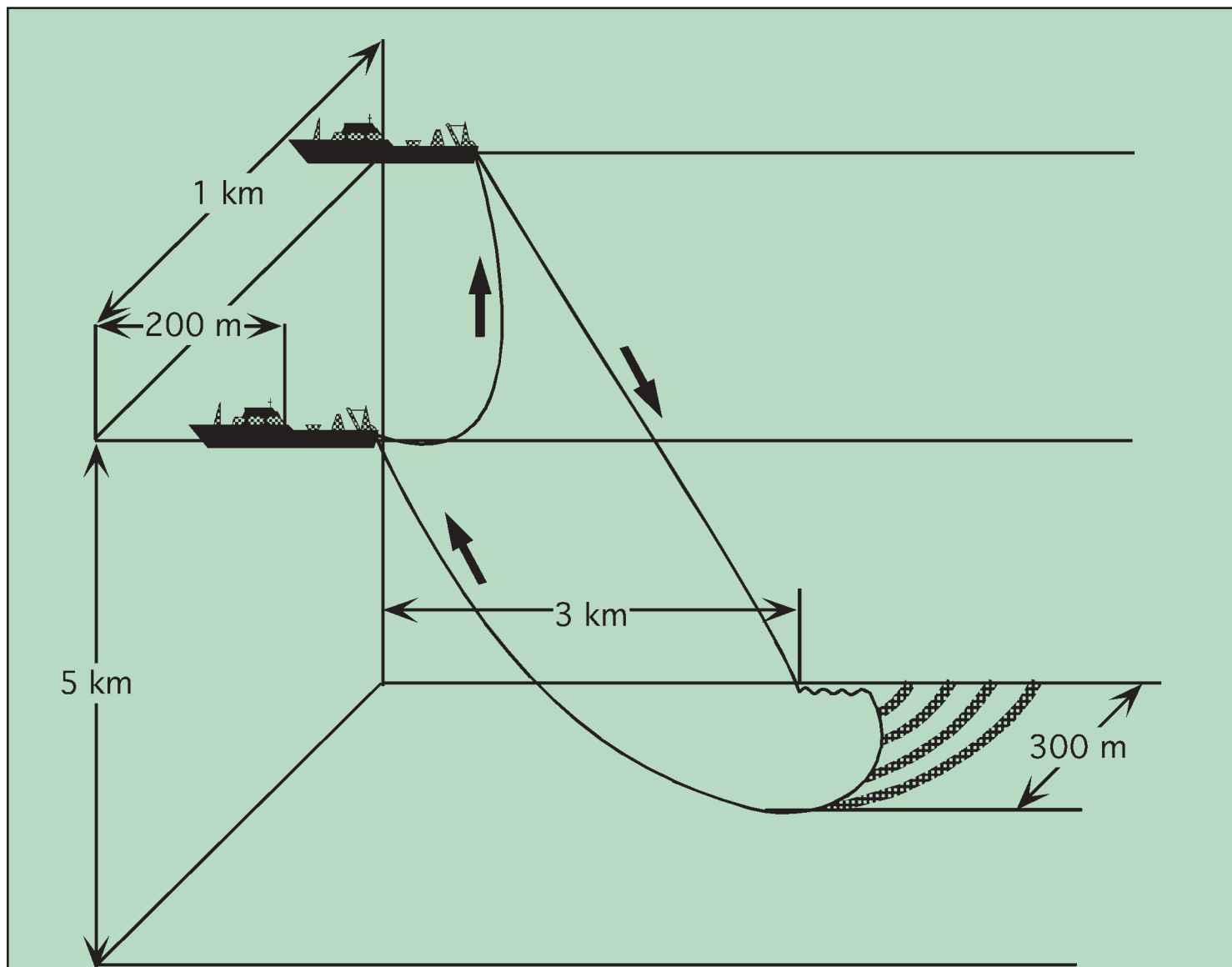
Le choix des zones se prêtant à une extraction future des nodules dépend des technologies qui seront utilisées pour l'extraction et le traitement. Les nodules doivent être présents en quantité suffisante pour pouvoir être récoltés de manière efficace par les engins d'extraction. Leur qualité - à savoir, soit leur teneur individuelle, soit la proportion de métal par rapport à la masse totale - doit être telle que le traitement métallurgique envisagé permette de récupérer les produits intéressants sur le plan commercial.

Le premier essai d'un système prototype d'extraction de nodules a eu lieu en 1970 sur le plateau de Blake au large de la Floride dans l'océan Atlantique, à une profondeur de 1 000 mètres.

Deep Sea Ventures, la société minière, avait équipé le Deep Sea Miner, un cargo de 6 750 tonnes, d'un derrick de 25 mètres et

d'un bassin central de 6 mètres par 9 (espace à partir duquel le dispositif d'extraction est déployé). Les nodules étaient remontés par injection d'air, système qui avait été testé auparavant dans un puits de mine de 250 mètres.

En 1972, un groupe réunissant une trentaine de sociétés a testé un système inventé par Yoshio Masuda, un officier de marine japonais. Le système à chaîne continue de godets se composait d'un câble de 8 kilomètres sur lequel des godets étaient fixés à intervalles réguliers. Sur un ancien baleinier, l'Akurei Maru, les godets étaient lancés à l'avant et récupérés à l'arrière. Quelques nodules ont été récoltés mais l'essai a dû être interrompu parce que le câble s'emmêlait. Un nouvel essai qu'il était prévu d'effectuer en 1975 avec deux bateaux au lieu d'un a finalement été annulé faute de financement.



Le système à chaîne continue de godets, avec deux navires

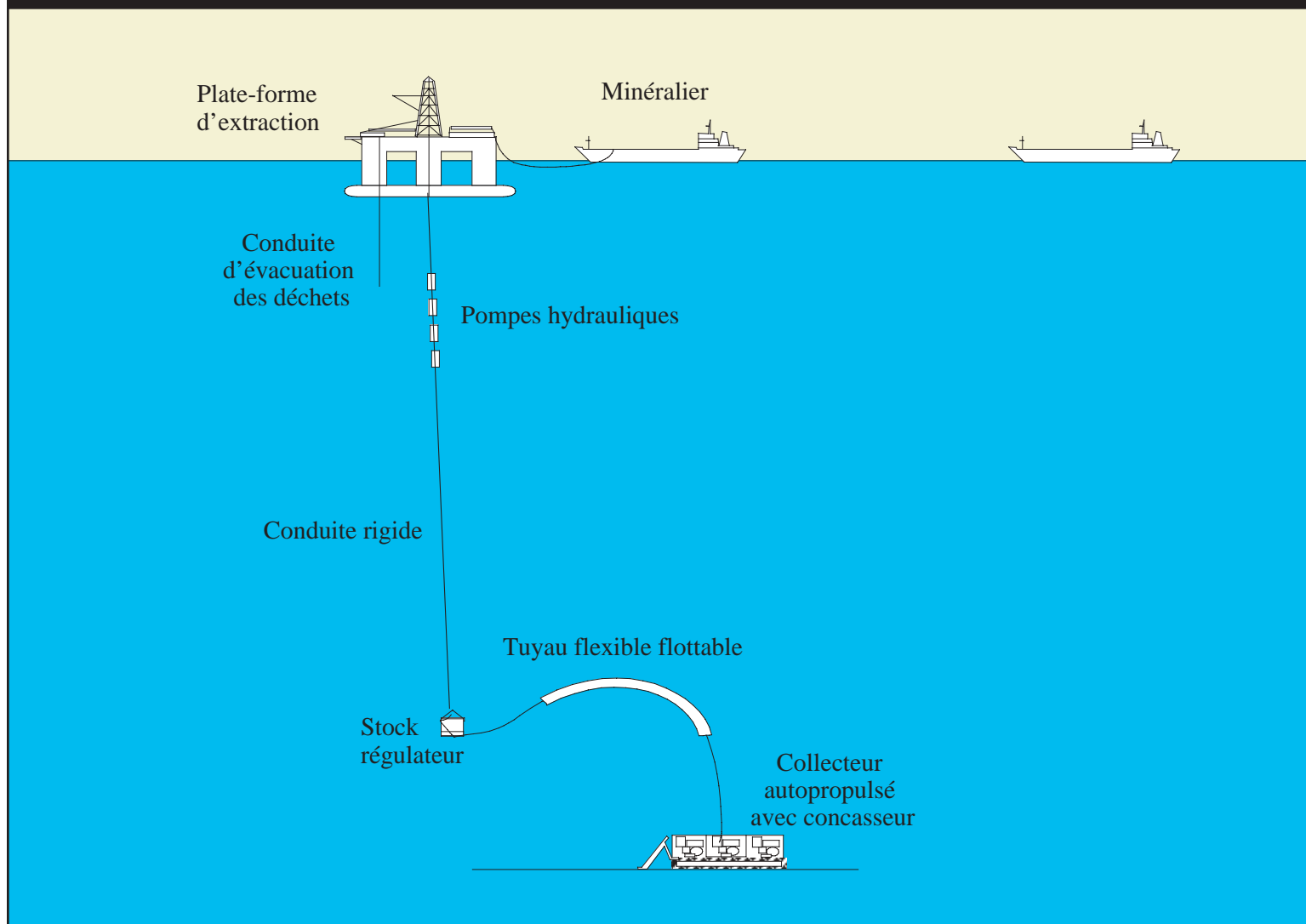
À la fin des années 70, trois consortiums américains ont effectué des essais d'extraction dans l'océan Pacifique avec des systèmes hydrauliques. Les nodules collectés sur le fond par un engin de dragage étaient amenés à la base d'une conduite rigide accrochée au fond du navire de surface. Ocean Management Incorporated (OMI) a utilisé un navire de forage à ancrage dynamique, le Sedco 445, qui était équipé d'un derrick retenu par des cardans pour réduire la transmission des mouvements du navire à la conduite. Deux systèmes de remontée ont été testés : l'un utilisait des pompes centrifugo-axiales fixées dans la conduite à une profondeur de 1 000 mètres, et l'autre assurant la remontée par injection d'air sous pression entre 1 500 et 2 500 mètres. Deux collecteurs étaient traînés à l'arrière de la conduite rigide : un engin de dragage par succion hydraulique à jets d'eau et un capteur mécanique avec une courroie transporteuse inversée. Une fausse manoeuvre a provoqué la perte du premier capteur mais près de 600 tonnes de nodules ont été recueillies au cours des trois essais réalisés à 1 250 kilomètres au sud d'Hawaï.

En 1976, Ocean Mining Associates (OMA) a équipé le Wesser Ore, un minéralier de 20 000 tonnes, d'un puits central (ouverture pratiquée dans la coque pour permettre le passage du matériel de forage), d'un derrick et d'un propulseur rotatif. Les nodules étaient prélevés par une drague à succion tirée sur des patins. La remontée des nodules se faisait par injection d'air. Le navire, rebaptisé Deepsea Miner II, a effectué ses premiers essais en 1977 à 1 900 kilomètres au sud-ouest

de San Diego (Californie). Les essais ont dû être interrompus parce que les prises électriques le long de la conduite n'étaient pas totalement étanches. Au début de 1978, deux autres essais se sont heurtés à de nouvelles difficultés dues à l'enlèvement de l'engin de dragage dans les sédiments, et à l'arrivée d'un ouragan. Enfin, en octobre 1978, 550 tonnes de nodules ont été ramenées à la surface en 18 heures, à raison d'une capacité maximale de 50 tonnes à l'heure. L'essai a pris fin après la rupture d'une pale de la pompe à succion qui a provoqué la panne du moteur électrique.

En 1978, Ocean Minerals Company (OMCO) a loué à la marine états-unienne le Glomar Explorer. Ce navire à positionnement dynamique jaugeait 33 000 tonnes et mesurait 180 mètres. Il était muni d'un système perfectionné de déploiement de la conduite rigide et des chemins de câbles. Les dimensions du puits central (61 x 22 m) facilitaient le maniement d'un capteur de grande taille. OMCO a construit un capteur motorisé muni de vis d'Archimède capable de déplacements dans la couche meuble de sédiments. Après plusieurs expériences faites à une profondeur de 1 800 mètres au large de la Californie, les premiers essais effectués au sud d'Hawaï à la fin de 1978 ont été interrompus parce que les portes du puits central refusaient de s'ouvrir. Enfin en février 1979, l'opération a été menée à bien et une énorme quantité de données a été recueillie par le système informatique perfectionné du Glomar Explorer. Ces opérations ont démontré la validité des principes de base du dragage et de la remontée.

Système d'extraction hydraulique



En 1979, la découverte d'obstacles sur le fond marin, tels que blocs, marches, falaises et fosses, a conduit des ingénieurs français à développer un système minier à navettes autonomes donnant plus d'autonomie à la fonction « collecte ». Ce système comprend une série de véhicules indépendants qui descendent seuls jusqu'au fond. Arrivés au fond, ces véhicules jettent une partie de leur lest pour se positionner soigneusement et commencer à récolter les nodules. Alimentés par des accumulateurs au plomb, ils se déplacent sur des chenilles et adaptent leur poids en lâchant du lest. Après avoir chargé 250 tonnes de nodules, ils jettent à nouveau du lest et commencent leur remontée vers la surface. Là, ils sont tirés jusqu'à un port flottant. Malheureusement, l'étude de faisabilité a montré que ce système était trop onéreux, car, pour une capacité de chargement de 250 tonnes de nodules, la taille des navettes devait dépasser 1 200 tonnes en raison de la faible performance du matériau de flottabilité disponible et/ou de la valeur élevée du rapport poids/énergie des accumulateurs au plomb.

Ce sont les systèmes hydrauliques qui offrent actuellement les possibilités les plus intéressantes. Ce procédé, imaginé par le groupe français Gemonod (Groupement pour la mise au point des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules) en 1988, comporterait : une plate-forme de surface semi-submersible de type catamaran; une conduite en acier rigide de 4 800 mètres; un tuyau flexible de 600 mètres de long et de 38 centimètres de diamètre intérieur, qui relie l'engin de dragage à la conduite rigide de remontée. Il a la forme d'une arche permettant à l'engin de dragage de s'écarter de la route suivie par la plate-forme de surface pour éviter un obstacle; un engin de dragage autopropulsé mesurant 18 m _ 15 m _ 5 m pesant

330 tonnes pour un poids apparent de 78 tonnes. En se déplaçant sur le fond, il assure la collecte des nodules et leur conditionnement pour qu'ils puissent être pompés dans le flexible.

Le transport des nodules jusqu'au port où sont situées les installations de traitement est effectué par des minéraliers à bord desquels les nodules sont transférés par un tuyau flexible sous forme d'une pulpe à haute concentration. Dans l'usine de traitement, la pulpe est stockée dans des bassins.

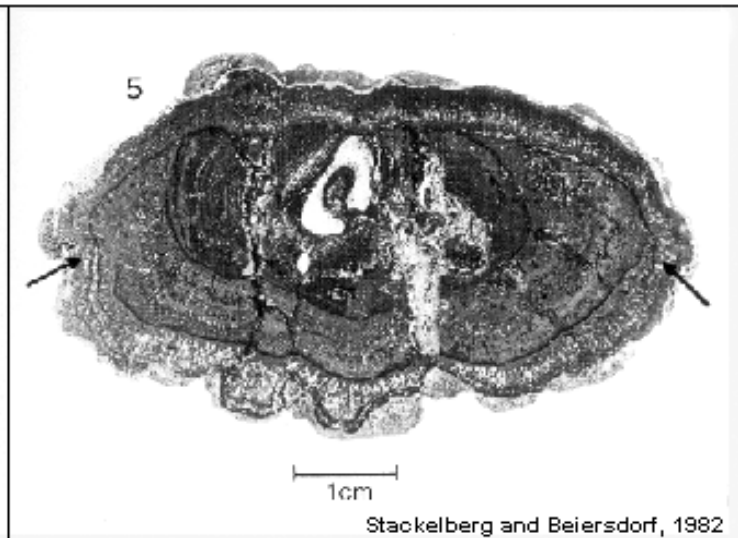
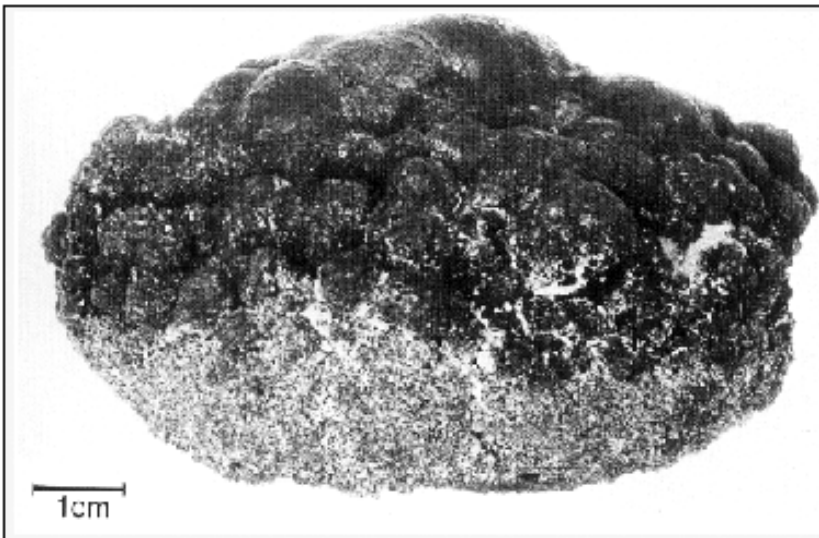
L'Inde travaille actuellement à la mise au point d'un véhicule d'exploitation minière dont les premiers essais devraient avoir lieu en 2007-2008. Le Directeur du « National Institute of Ocean Technology » a déclaré, à l'occasion d'un atelier organisé en 2001 par l'Autorité internationale des fonds marins, que son organisation avait déjà testé un prototype, à une profondeur de 410 mètres, et que d'autres essais à 6 000 mètres auraient lieu en 2002. Le véhicule de trois mètres de large, se déplacerait sur des voies en plastique posées sur le fond marin. Un collecteur placé à l'avant du véhicule ramasserait les nodules qui seraient ensuite amenés sur un tapis roulant jusqu'à un concasseur. Le système, conçu pour vibrer, permettrait de séparer les sédiments des nodules avant l'arrivée au concasseur. Les nodules concassés seraient ensuite pompés dans un flexible de 10 centimètres de diamètre, avant d'être aspirés jusqu'à la surface et embarqués à bord d'un navire. Un deuxième conduit ombilical renfermerait les câbles d'alimentation électrique et des transmissions. Bien que relié au navire de surface, le véhicule à chenilles se déplacerait en toute autonomie sur le fond marin. Ses concepteurs estiment que ce système est plus respectueux de l'environnement que les précédents.



Champ de nodules



Scientifiques s'apprêtant à retirer des échantillons de sédiments d'un carottier multitubes (Christina Loarie)



Un nodule polymétallique et sa coupe transversale

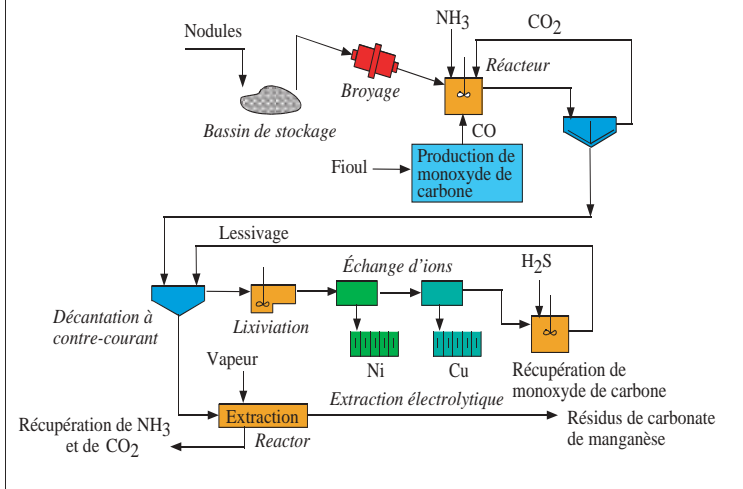
Stackelberg and Beiersdorf, 1982

TECHNIQUES DE TRAITEMENT

De nombreux procédés ont été étudiés pour le traitement des nodules polymétalliques. À l'origine ces procédés visaient la récupération de trois métaux seulement : le nickel, le cuivre et le cobalt. Après 1978, le manganèse a été ajouté à cette liste pour accroître le profit et réduire la quantité de déchets. Les deux types de technologies utilisées sont l'hydrométallurgie qui consiste à séparer les métaux des nodules par lixiviation

au moyen de réactifs acides (acide chlorhydrique ou sulfurique) ou alcalins (ammoniaque), et la fusion qui consiste en une réduction des hydroxydes (par élimination de l'oxygène) suivie d'une séparation des métaux fondus par gravité. Trois exemples sont décrits ci-après.

LE PROCÉDÉ CUPRION



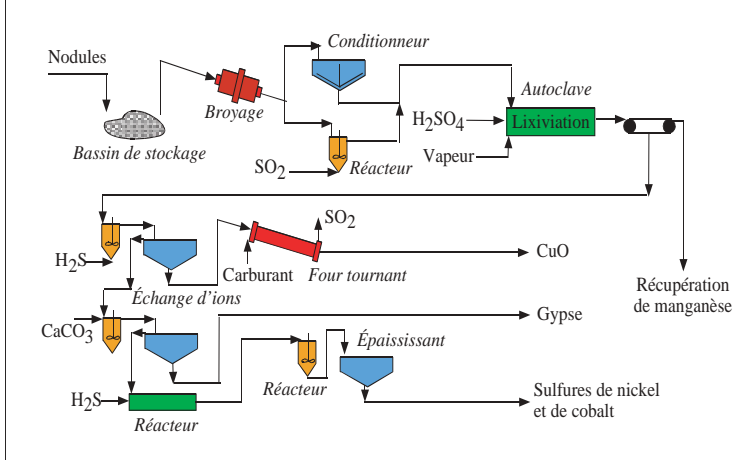
Le procédé Cuprion

Ce procédé a été mis au point par Kennecott. Les nodules sont broyés jusqu'à l'obtention d'une pulpe fine qui est réduite par l'action du monoxyde de carbone dans un réservoir agité à faible température en présence d'ammoniaque. Le cuivre, le nickel et le cobalt sont ensuite solubilisés par décantation à contre-courant dans une série d'épaisseurs. Le nickel et le cuivre de la solution-mère sont extraits par échange d'ions liquide avant extraction électrolytique et le cobalt est précipité sous forme de sulfure. Le résidu ferromagnésique s'est toutefois révélé difficile à traiter pour récupérer le manganèse.

Lixiviation sulfurique

Ce procédé a été proposé par Fuerstenau en 1973 et considérablement amélioré ensuite par les études du Commissariat français à l'énergie atomique. Les métaux contenus dans les nodules concassés sont dissous par l'acide sulfurique à 180 °C sous une pression de 1 200 kPa. Les ions manganèse bivalents, formés par pré-réduction de certains de ces nodules avec l'acide sulfurique gazeux sont introduits dans un autoclave pour améliorer la récupération du cobalt. La solution contenant le cuivre, le nickel et le cobalt est traitée par le sulfure d'hydrogène (H₂S) pour obtenir des précipités de sulfures. Le sulfure de cuivre est grillé et fournit un concentré d'oxyde de cuivre tandis que la solution contenant le nickel et le cobalt reste à l'état de sulfures.

LIXIVIATION SULFURIQUE

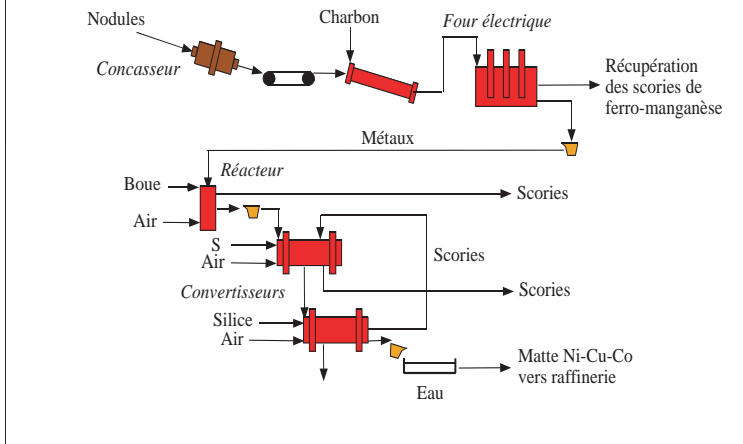


À l'usine de raffinage, le concentré d'oxyde de cuivre est traité par lixiviation avec de l'acide sulfurique et le métal pur est obtenu par électrolyse. Le concentré de sulfure de nickel et de cobalt est fondu par action du chlore et de l'eau. Après élimination du fer et du zinc, les deux métaux sont séparés par des solvants à résine échangeuse d'ions. Le cobalt est obtenu sous forme de chlorure qui fera l'objet d'un raffinage et le nickel est extrait par électrolyse. Le résidu de ferro-manganèse est fondu après dessiccation et calcination dans un four électrique où le phosphore est éliminé avec une partie du fer.

Fusion

Plusieurs sociétés ont étudié l'application des procédés classiques de fusion du nickel et du cuivre au traitement des nodules polymétalliques. Après séchage et calcination dans un four tournant, les nodules sont introduits dans un four à l'arc submergé pour être réduits. On obtient des scories riches en manganèse et un alliage de fer-nickel-cuivre-cobalt. Cet alliage est raffiné dans un convertisseur où l'oxydation transforme la majeure partie du manganèse et du fer restant. Par addition de soufre, on obtient ensuite une matte contenant le nickel, le cuivre et le cobalt.

FUSION



Cette matte peut être traitée par différentes méthodes utilisées dans l'industrie du nickel. Par exemple, elle peut être broyée et dissoute par oxydation ménagée au chlore en présence d'eau. Après élimination du soufre dans la solution de cuivre, le métal est extrait par échange d'ions et électrolyse. Le fer et le zinc de la solution contenant le nickel et le cobalt sont éliminés avant l'extraction par échange d'ions du cobalt et du nickel qui sont soumis à une électrolyse.

La scorie ferro-mangnésifère chaude est transférée directement dans un four électrique où le phosphore et les métaux lourds résiduels (nickel, cuivre, cobalt) sont éliminés ainsi qu'une grande partie du fer en excès, afin d'obtenir un alliage de ferro-silico-manganèse.