

# L'exploitation des nodules

## polymétalliques :

### utopie ou réalité ?

Les grands fonds océaniques recèlent dans leurs profondeurs des concrétions rocheuses se présentant sous forme de boules : ce sont les nodules polymétalliques (*Figure 1*). Découverts à la fin des années 1960, ils se sont révélés être constitués d'éléments métalliques divers tels que le manganèse, le nickel ou le cobalt, en proportions variables. Ces nouveaux minerais sous-marins avaient provoqué dès les années 1970-1980 un grand engouement auprès de nombreux pays, en tant que ressource d'intérêt majeur, car sources de matériaux non renouvelables [1].

Une exploitation de ces gisements sous-marins avait alors été envisagée, et son principe de faisabilité fut démontré. Ces nodules ont été en partie à la base du traité international sur le droit de la mer signé en 1982 et de l'instauration, en 1994, de l'Autorité internationale des fonds marins (*ou ISA, voir l'encart « L'ISA et le droit international de la mer »*). Toutefois, les coûts élevés, associés notamment aux risques technologiques à prendre en compte, ainsi que les cours des matières premières relativement bas

à la fin du siècle dernier, ont entraîné une mise en sommeil des projets d'exploitation depuis les années 1990.

Il a fallu attendre juillet 2000 pour que l'ONU adopte un code minier qui prévoit en particulier des contrats d'exploration entre l'ISA et les Investisseurs Pionniers. C'est ainsi qu'en 2001, l'Ifremer<sup>1</sup>, agissant en tant que garant des intérêts de l'État français, signe avec l'ISA un contrat d'une durée de quinze ans pour explorer et répertorier les zones riches en nodules polymétalliques. Ce contrat prévoit en outre une étude de la biodiversité

1. Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.



Figure 1

Les nodules polymétalliques forment des boules de quelques centimètres de diamètre.

## L'ISA ET LE DROIT INTERNATIONAL DE LA MER

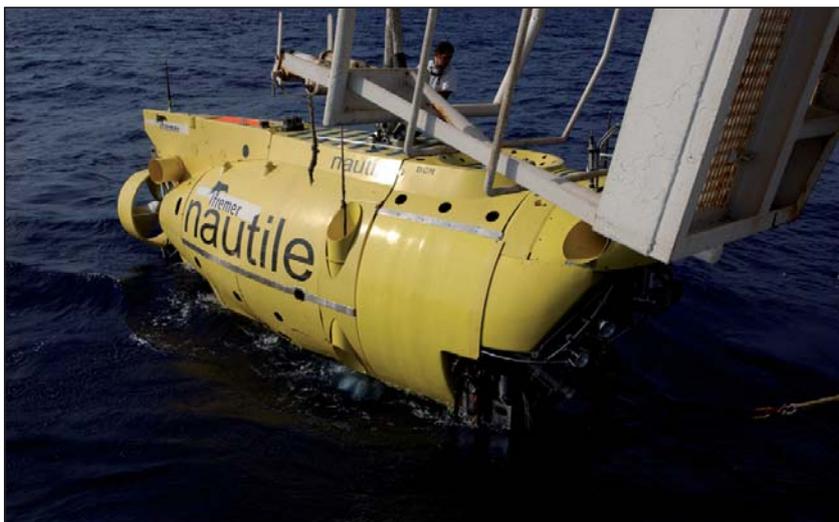
Au milieu des années 1950, les océans étaient régis par le principe de la liberté des mers, qui limitait les droits d'un État sur les océans à une zone maritime étroite, large de 200 milles, le long de son littoral. La France, par exemple, a bénéficié d'une Zone économique exclusive (ZEE), dans laquelle elle est propriétaire des ressources du fond de mer.

En 1970, après des années d'efforts intenses, l'assemblée générale des Nations unies a déclaré à l'unanimité que les fonds marins et leurs sous-sols, au-delà des limites de la juridiction nationale, étaient le patrimoine commun de l'humanité et a convoqué en 1973 une conférence qui a conduit à la création en 1994 de l'Autorité internationale des fonds marins, ou International Seabed Authority (ISA). Cette organisation autonome a pour rôle de réglementer, organiser et contrôler l'exploitation des ressources minières dans la zone internationale, en s'assurant que l'environnement marin est protégé de tous effets nuisibles des activités sous-marines.

C'est ainsi que l'ISA établit des règlements relatifs à la prospection et à l'exploitation des nodules polymétalliques dans la zone de Clarion-Clipperton, dans le Pacifique (2000), et réglemente actuellement l'exploration des encroûtements cobaltifères et des sulfures polymétalliques.

Figure 2

*Le Nautille. Lancé en 1984, ce submersible sous-marin peut intervenir jusqu'à 6 000 mètres de profondeur, et explorer ainsi plus de 97 % de la superficie des fonds marins. Il est doté de bras télémanipulateurs, d'un panier de récolte et de nombreux équipements d'éclairage et d'imagerie. Trois personnes (un scientifique accompagné de deux pilotes) peuvent prendre place à bord. À une vitesse d'environ 1,5 nœuds sur le fond, il a une autonomie de travail d'environ cinq heures.*



et donc l'établissement d'un état de référence de l'écosystème **benthique**, base de toute étude d'impact environnemental en prévision d'une éventuelle exploitation des nodules. Dans ce cadre, une campagne scientifique a été menée en 2004 dans le Pacifique, avec le submersible *Nautille* (Figure 2).

### 1 Les nodules polymétalliques, une ressource minérale réelle

Les nodules, ces intrigantes boules rocheuses de quelques centimètres de diamètre, qui tapissent des régions entières du lit océanique, semblent parfois relever de l'imagination ! Elles suscitent d'autant plus notre curiosité qu'il faut souvent aller les chercher à des profondeurs abyssales, pouvant atteindre les 6 000 mètres. Premières explorations, retour à vingt ans plus tôt...

Entre 1975 et 1985, l'Ifremer a mené une trentaine de campagnes, au cours desquelles des zones riches en nodules ont été identifiées dans le Pacifique Nord (Figure 3), à savoir entre les fractures de Clarion et Clipperton, au large du Mexique (Figure 4).

La mise en évidence d'importantes teneurs en métaux renfermés dans ces gisements a conduit à bâtir des scénarios d'exploitation, qui ont nécessité des études préliminaires sur les technologies d'exploitation et sur leurs impacts environnementaux. Cet important dossier a servi à étayer les longues négociations avec les autres consortiums pionniers et enfin avec

l'ISA, pour aboutir à l'enregistrement d'une zone d'activités minières. Au terme de ce long processus, un permis international a reconnu des droits miniers importants à l'Association française d'exploitation des nodules (AFERNOD), représentée par l'Ifremer (*Figure 5*).

Citons quelques données de ce « permis » accordé à la France :

- Superficie : 75 000 km<sup>2</sup> (7 % de la superficie de la France) dont 30 000 km<sup>2</sup> de zone très riche en nodules, le cœur du gisement. Le permis comprend **deux sites**, le principal par 130°, l'autre par 150° de longitude Ouest.
- Tonnage de nodules sur cette zone riche : environ 400 millions de tonnes (humides).
- Concentration des nodules sur cette zone : environ 14 kg/m<sup>2</sup>.
- Tonnage exploitable par un système de ramassage : environ 120 millions de tonnes soit 1,5 millions de tonnes de nodules (secs) par an pendant cinquante ans livrés à l'usine de traitement.
- Production annuelle de métaux sur 1,5 millions de tonnes de nodules : *Figure 6*.

Évidemment ce ne sont que des estimations, basées sur des cartographies, des prélèvements et des analyses préliminaires. Elles donnent cependant des ordres de grandeur crédibles et conditionnent toute prospection approfondie et toute mise en exploitation de nodules sur la zone du permis français.

## 2 Partir pour une exploitation des nodules : quelles technologies ? Quels coûts ?

Après les campagnes de prospection et les études technico-économiques préliminaires menées dans les années 1970, un Groupement d'intérêt public (GIP) dénommé Gemonod<sup>2</sup> a été créé et a réuni entre 1984 et 1988 des ingénieurs de l'Ifremer, du CEA<sup>3</sup> et de la société Technicatome, pour étudier de manière approfondie la faisabilité de l'exploitation des nodules. Bien que cette étude ait déjà vingt ans,

2. Gemonod : Groupement pour la mise au point des MOyens nécessaires à l'exploitation des NODules polymétalliques : ce groupement d'intérêt public a publié en octobre 1988 l'ensemble des études « Évaluation et étude des moyens nécessaires à l'exploitation des nodules polymétalliques », en 7 tomes !

3. CEA : Commissariat à l'énergie atomique.

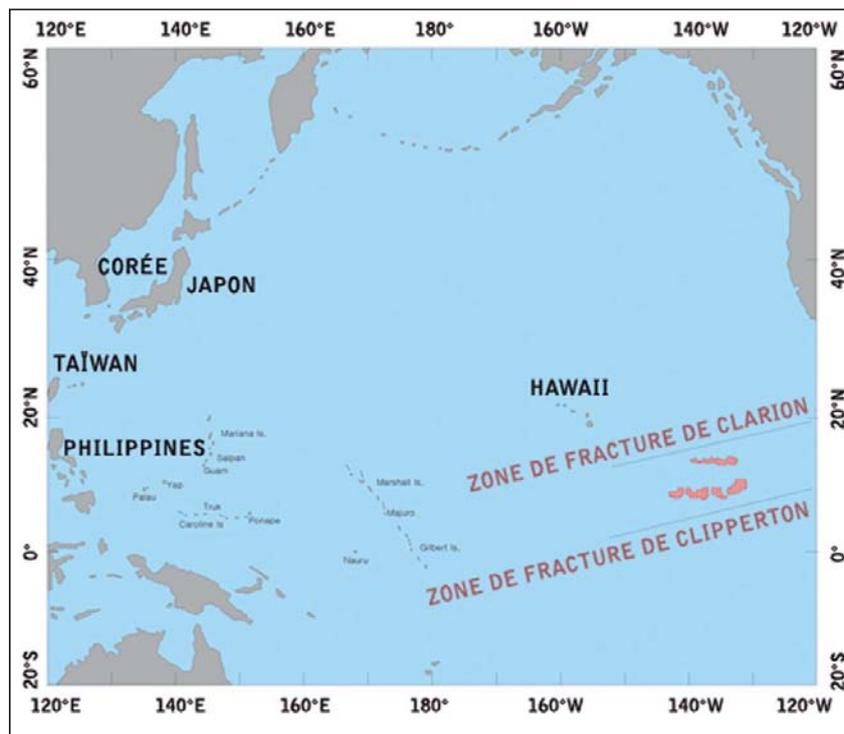


Figure 3

Un champ de nodules dans le Pacifique.

Figure 4

Les fractures de Clarion et Clipperton.



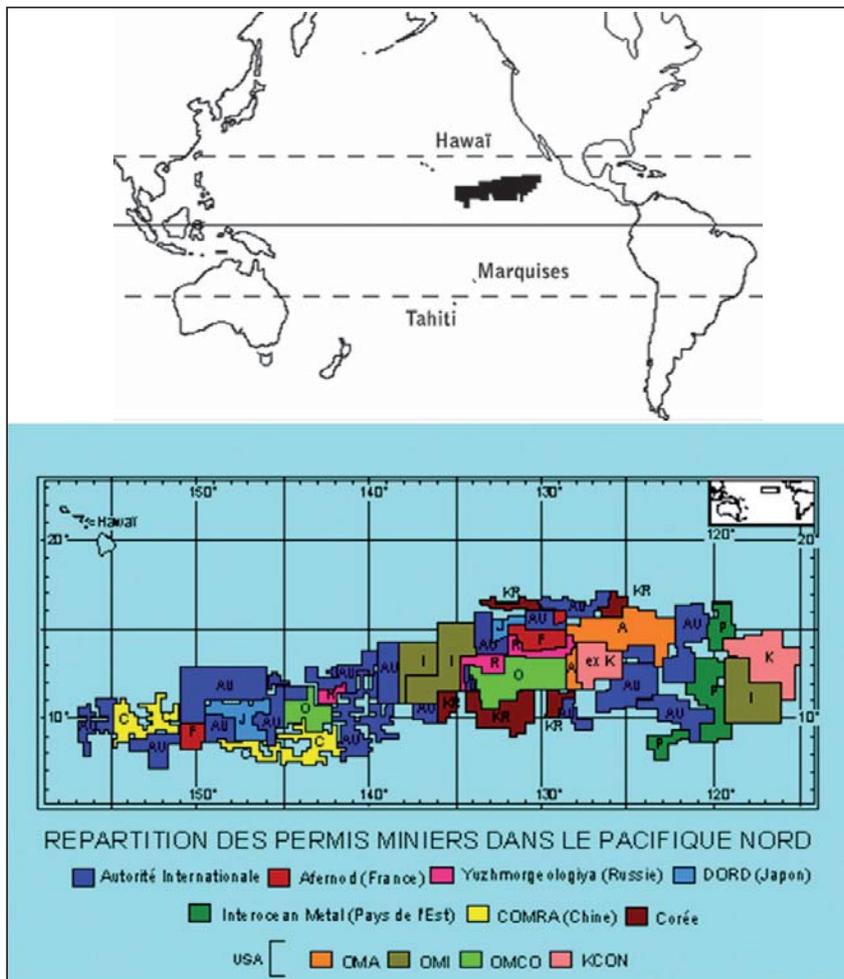


Figure 5

Situation des permis miniers sur les zones à nodules du Pacifique Nord.

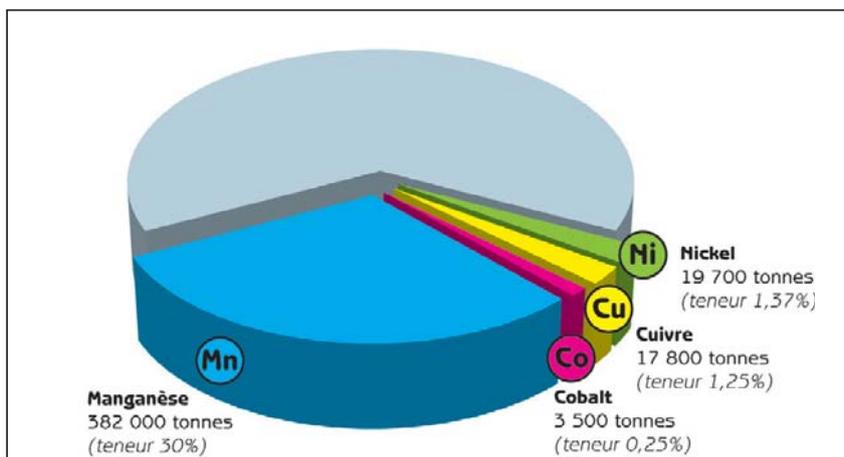
elle reste d'actualité et servira de référence. Elle prend en considération les technologies d'exploitation, consacrées au **ramassage** des nodules puis à leur **traitement métallurgique**, et les **aspects économiques** associés.

### 2.1. Les technologies d'exploitation

Aller chercher les nodules au fond de la mer est loin d'être une simple affaire ! Ne serait-ce que pour étudier le **système de ramassage**, le

Figure 6

Production annuelle de métaux sur 1,5 millions de tonnes de nodules.



GIP Gemonod a dû associer de nombreux laboratoires de recherche et sociétés des domaines de l'offshore, de la mine, du génie des procédés et des technologies sous-marines. Des organismes publics, en particulier l'IFP<sup>4</sup>, ont également été consultés. De même, des coopérations ont été menées avec des équipes allemandes et japonaises, qui ont apporté leurs connaissances, acquises lors d'essais en mer de systèmes de ramassage expérimentaux. Enfin, suite à de nombreux essais sur maquettes réalisés en mer, un système de ramassage, décrit dans *l'encart « Le ramassage des nodules polymétalliques »*, a été conçu.

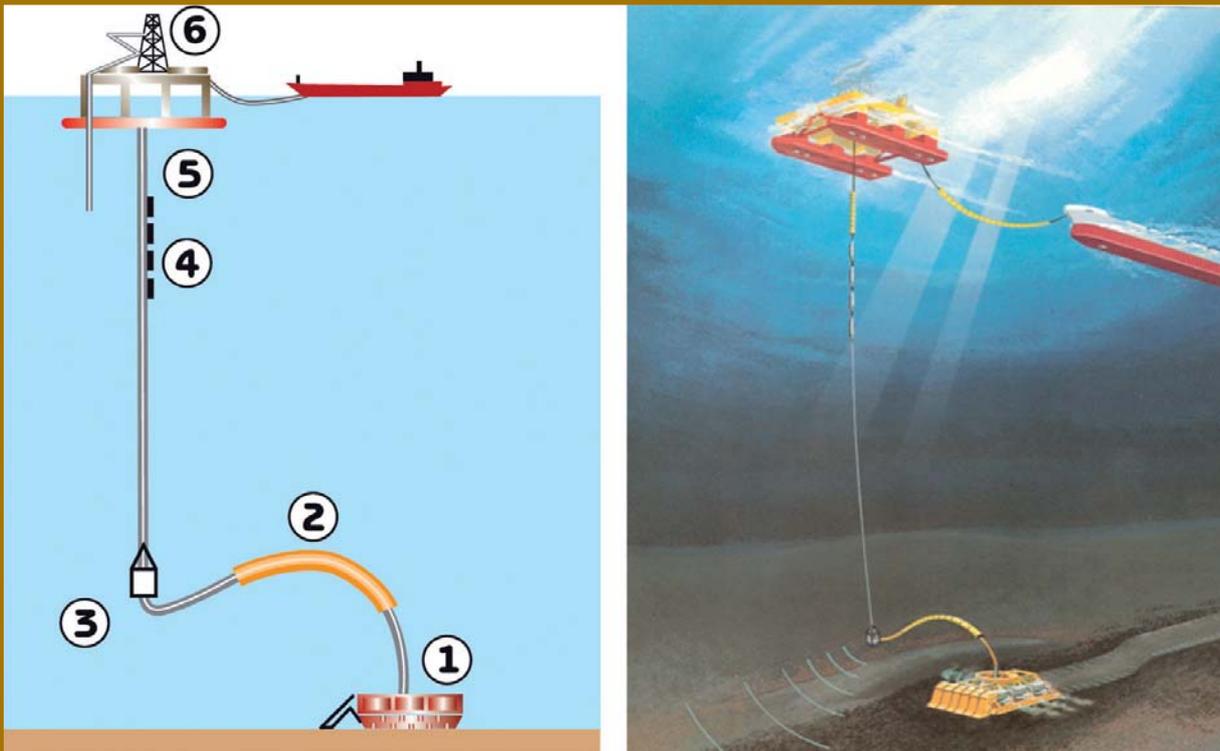
L'extraction des métaux renfermés dans les nodules, étape lourde et coûteuse, doit ensuite être réalisée (*voiraussi l'encart « Des tests de pré-industrialisation »*). Pour cela, les nodules ramassés dans le Pacifique seraient chargés dans des minéraliers adaptés, navires de 60 000 tonnes, qui les transporteraient vers un port en France métropolitaine, *via* le canal de Panama.

Pour l'extraction des métaux, des procédés de **traitement métallurgique**, spécifiques de ces minerais marins, ont été étudiés il y a plus d'une vingtaine d'années. Les deux principaux procédés retenus sont l'**hydrométallurgie**, mise au point par le CEA, et la **pyrométallurgie**, développée par les sociétés Krebs puis Minemet (groupe IMETAL). *L'encart « Le traitement métallurgique*

4. IFP : Institut français du pétrole.

## LE RAMASSAGE DES NODULES POLYMÉTALLIQUES

Le système de ramassage des nodules métalliques est décrit dans la *Figure 7*.



*Figure 7*

Le système de ramassage : engin de dragage (1), tuyau flexible (2), tampon (3), pompes (4), conduite rigide (5), plateforme de surface (6).

Ce système comprend les éléments suivants :

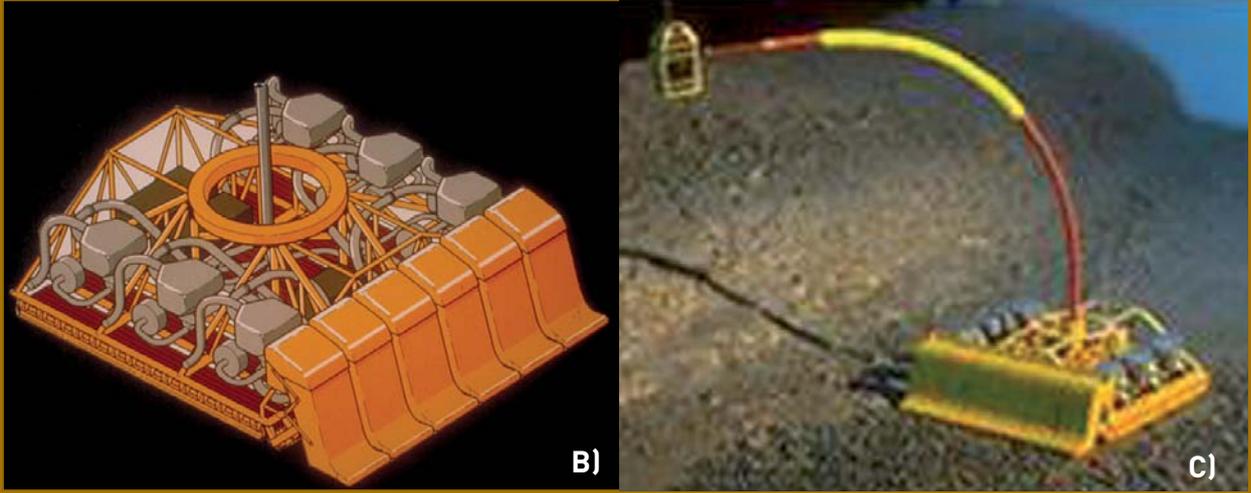
- Un **engin de dragage** (*Figure 8*) de 15 × 15 × 5 mètres, de 300 tonnes, se déplaçant à un peu plus de 2 km/h (un peu plus d'1 nœud). Cet engin sur chenilles pousse un collecteur qui décolle les nodules du sédiment par des jets d'eau. Ces nodules sont acheminés par des bandes transporteuses jusqu'à un concasseur pour réduire la granulométrie puis, après séparation des fines et du sédiment, ils sont pompés dans un tuyau flexible (2) jusqu'au bas de la conduite principale.
- Une **conduite métallique** (en acier haute résistance) de 4800 mètres de longueur et de diamètre intérieur 400 mm. Cette conduite est du type des « risers » pétroliers, elle se compose de tronçons de 27 mètres assemblés sur le support en surface par des connecteurs.



*Figure 8*

A) et B) Prototype d'engin de dragage à échelle environ 1/3 ;  
C) tuyau flexible.

A)



– Quatre **pompes hélico-centrifuges** situées à 1 000 mètres sous la surface (Figure 9).

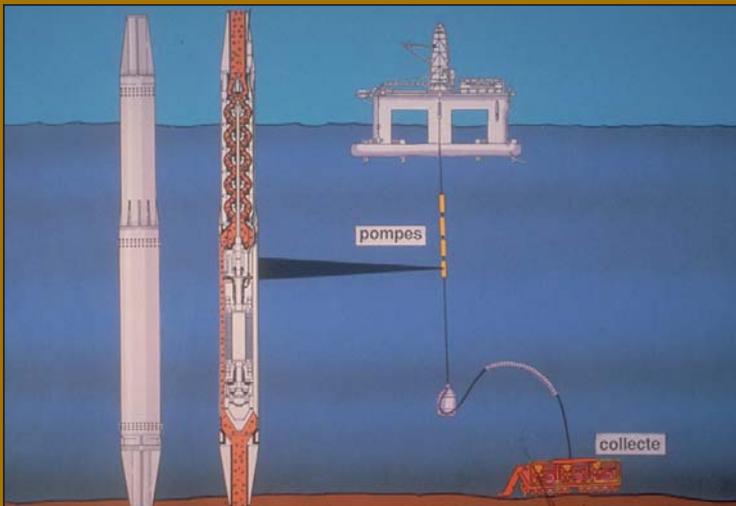


Figure 9

Les pompes pour remonter les nodules.



Figure 10

Plateforme semi-submersible.

6. Une *plateforme semi-submersible*, du type grosse plateforme de forage, de 40 000 tonnes (Figure 10). Cette plateforme est munie des équipements suivants : générateurs de puissance, derrick pour la manutention des tubes, manutention des équipements sous-marins, commande du chantier, habitation, stockage des nodules et système de transfert vers les minéraliers sous forme de pulpe.

L'ensemble du système se déplace et suit l'engin de dragage qui a une certaine latitude grâce au flexible. Le principe est de draguer les nodules sur les plages minières en évitant les pentes et les obstacles.

Ce système a été étudié assez précisément : certains équipements (notamment les pompes) ont été testés, de nombreux essais sur modèles réduits (de collecteurs, d'engin de dragage) ont été réalisés et de nombreuses simulations numériques ont été effectuées.

## LE TRAITEMENT MÉTALLURGIQUE DES NODULES POLYMÉTALLIQUES

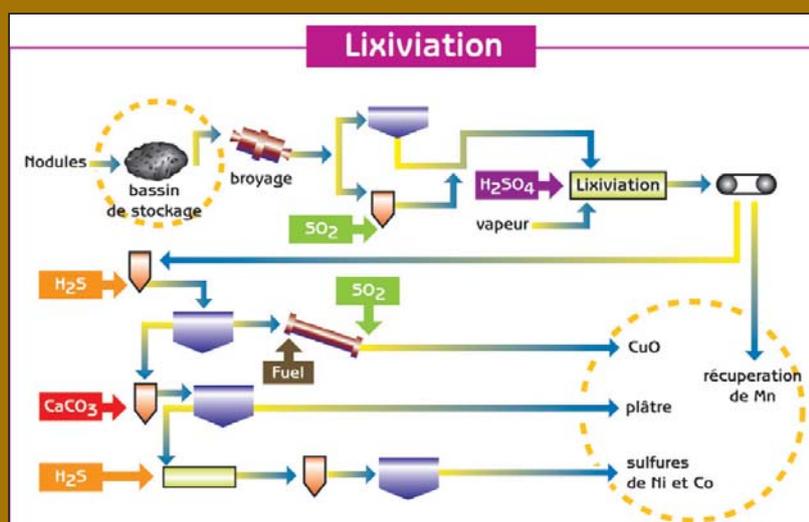
Le traitement des nodules peut être envisagé selon deux voies principales : l'hydroméallurgie et la pyroméallurgie. Ces voies sont décrites en détail sur le site <http://www.ifremer.fr>.

### L'hydroméallurgie

Un procédé original en phase liquide a été mis au point par le CEA (Figure 11). Il est basé sur différents traitements en milieux acides ou basiques, qui permettent de séparer successivement le manganèse (sous forme de sulfate), le cuivre (sous forme d'oxyde CuO), ainsi que le nickel et le cobalt (sous forme de sulfures).

Figure 11

Le traitement hydroméallurgique.



### La pyroméallurgie

Les nodules peuvent être également traités selon un procédé de fusion (Figure 12), dans un four électrique en présence de charbon à 1 400 °C.

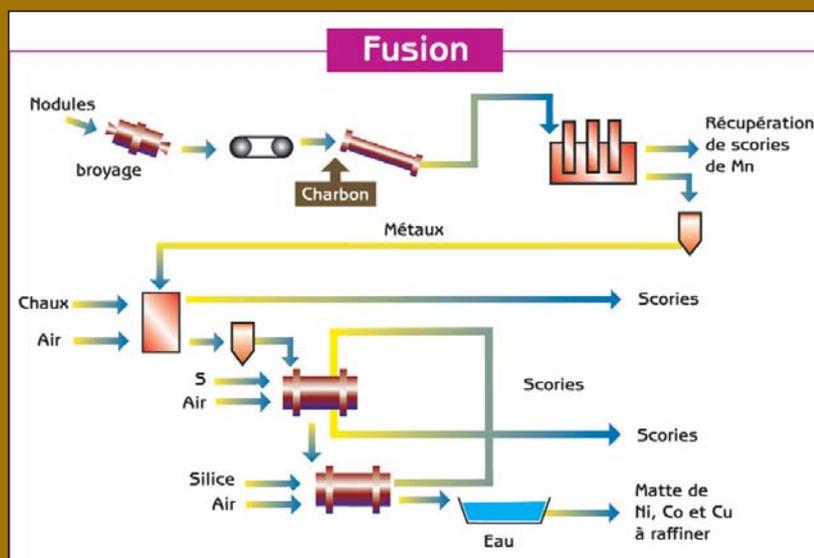


Figure 12

Le traitement pyroméallurgique.



## DES TESTS DE PRÉINDUSTRIALISATION

En amont de tout développement industriel, il est nécessaire de réaliser des essais sur des pilotes de tailles variées. Suite à ces essais, il est alors possible de valider les technologies choisies puis de les adapter à des tonnages de minerais importants.

Cela est particulièrement vrai dans le cas des **techniques de ramassage**, où subsistent des incertitudes sur le dragage des nodules et sur la fiabilité du pompage. Un test préindustriel a donc été envisagé sur un pilote de ramassage d'une capacité du 1/10<sup>e</sup>, soit environ 50 t/h, qui coûterait la lourde somme de 90 millions d'euros.

Concernant les **technologies métallurgiques**, la réalisation d'un test sur pilote n'a pas encore été possible, faute de disposer d'une quantité suffisante de nodules (plusieurs centaines de tonnes).

*des nodules polymétalliques* » décrit brièvement ces deux voies.

### 2.2. Actualisation et aspects économiques

Des études économiques relativement approfondies (coûts en investissement, en fonctionnement et rentabilité) avaient été réalisées vingt ans plus tôt. Pour donner une idée de son ampleur, environ 11 millions d'euros (actualisés) ont été consacrés aux études d'ingénierie.

En revanche, aucun chiffrage récent sur l'exploitation des nodules n'a été établi. Or, si l'on veut en actualiser les scénarios, un travail pluridisciplinaire important doit être réalisé : il doit non seulement intégrer les évolutions technologiques et économiques, mais également prendre en compte les impacts sur l'environnement.

D'un point de vue technico-économique, alors que les techniques offshore ne cessent de s'améliorer – grâce notamment aux groupes parapétroliers – les technologies métallurgiques sont moins sujettes à variations.

Il n'empêche que les prises de décision dépendent fortement d'une combinaison de facteurs complexes, tels que les coûts énergétiques liés aux traitements métallurgiques (facteur généralement limitatif) et les coûts des matières premières, qui vont déterminer la rentabilité de l'exploitation. Il y a quelques années, une actualisation avait été tentée en collaboration avec la Corée, investisseur pionnier également, mais ne s'est pas concrétisée, faute de perspective d'exploitation à court terme.

Il nous est néanmoins possible d'analyser les points qui ont sensiblement évolué. Pour les éléments économiques, nous raisonnerons en dollars car les estimations « Gemonod » ont été faites dans cette devise<sup>5</sup>. Les cours actuels des métaux seront analysés et sommairement comparés aux estimations prospectives d'il y a vingt ans et les coûts seront actualisés en utilisant l'indice de production américain (voir paragraphe 2.2.3).

#### 2.2.1. Les technologies du système de ramassage

L'expérience acquise par l'IFP et par les sociétés d'ingénierie parapétrolière, au cours du programme prospectif « mer profonde » mené dans les années 1980, avait beaucoup servi aux études sur les technologies du système en mer.

5. Les cours des métaux sont donnés en général en \$. Les coûts de l'offshore et les investissements miniers sont souvent donnés en \$ également. Raisonner dans cette devise évite aussi de faire une prospective sur la parité \$/€...

Ces études avaient porté en particulier sur les conduites profondes (les « risers »), les tuyaux flexibles et les plateformes semi-submersibles, mais elles avaient été mises en veilleuse pendant près de dix ans jusqu'au démarrage de l'exploitation des champs profonds vers 1995.

Il restait encore des points de blocage, spécifiques de ces minerais sous-marins, concernant la locomotion d'engins lourds sur des fonds très meubles, le traitement physique et l'utilisation délicate des pompes sous-marines.

Mais des progrès ont été réalisés depuis vingt ans et ont permis de lever un certain nombre d'incertitudes, notamment sur les conduites sous-marines de grande longueur, sur l'alimentation électrique en mer et sur la manœuvrabilité des supports de surface. De plus, les innovations importantes réalisées récemment dans l'exploitation des hydrocarbures en mer profonde permettent désormais de disposer, en grande partie, de technologies adaptées à la collecte des nodules. Enfin, il est aujourd'hui envisageable d'utiliser des systèmes sous-marins robotisés munis de capteurs géophysiques, disponibles sur le marché, et qui simplifieraient beaucoup la stratégie de dragage.

Les réalisations récentes ont enfin confirmé la faisabilité de systèmes, qui, vingt ans plus tôt, étaient encore du domaine de l'imaginaire. Par exemple, des séparateurs et des pompes multiphasiques ont été testés avec succès sur le fond par près de 2 000 mètres. De même, de très intéressantes

avancées ont été apportées sur le transport sous-marin d'énergie électrique (câbles, connecteurs) et sur l'emploi généralisé des flexibles pour les liaisons fond-surface.

Notons que le système de ramassage pourrait être conçu selon une autre technologie. Par exemple, peut-être remplacerait-on la conduite verticale par des flexibles, chacun de ces flexibles étant relié à une drague sur le fond (la **Figure 13** montre le système d'exploitation Dalia de la société Total par 1 500 mètres de profondeur) ; on aurait alors un système plus souple. Mais la production et les coûts associés ne devraient pas être sensiblement différents.

L'étude des technologies en mer ne peut être effectuée sans une évaluation de leur **impact sur l'environnement**. Déjà soulevée il y a vingt ans, cette question est devenue particulièrement sensible aujourd'hui et interpelle particulièrement l'ISA, qui s'est dotée de pouvoirs étendus

**Figure 13**

*Système d'exploitation offshore Dalia de Total utilise des flexibles pour acheminer le pétrole vers la surface.*

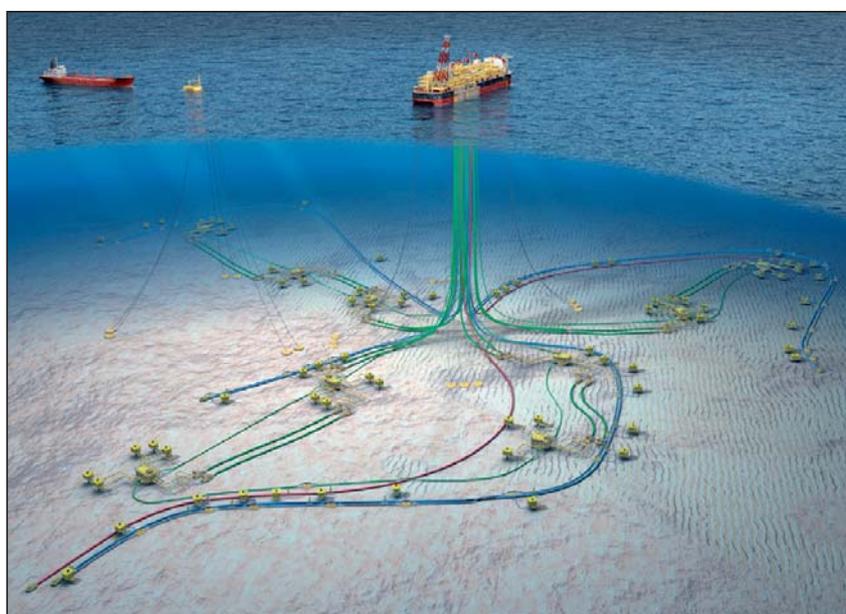


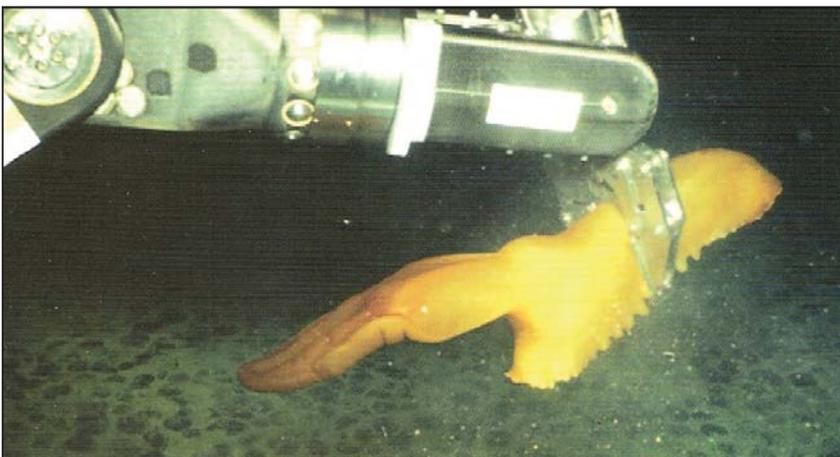


Figure 14

Le seul fait de sillonner à travers les champs de nodules à bord d'un engin de ramassage est une manœuvre délicate pour l'environnement.

Figure 15

Le Nautilo vient délicatement prélever une holothurie.



pour évaluer les impacts écologiques pouvant être désastreux. De fait, lorsque l'on explore des gisements sous-marins, toutes les couches océaniques peuvent être perturbées, notamment :

- *Le fond* : les engins de ramassage, progressant sur les fonds marins pour collecter les nodules laissent derrière eux une trace dans les sédi-

ments (Figure 14). En même temps, au fur et à mesure qu'ils progressent, ils produisent un nuage de sédiments en suspension. Ce nuage se dépose plus ou moins loin de l'engin et recouvre toutes les formes de vie sur le fond. Ces deux phénomènes contribuent à une perturbation des écosystèmes benthiques.

- *La colonne d'eau* : les engins de ramassage collectent les nodules sur les fonds marins, les concassent et les remontent en surface sous la forme d'un mélange composé de nodules, de sédiments et d'eau. L'excès d'eau riche en particules est rejeté à la mer à environ 1000 mètres sous la surface. Les particules ainsi rejetées forment un nuage qui a comme conséquence la perturbation du plancton et du necton, ainsi que l'atténuation de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, ce qui produit notamment un déséquilibre de l'activité photosynthétique et de la production de nutriments autour de la zone exploitée.

Pour établir un état de référence, l'ISA a demandé une évaluation de la biodiversité, de la distribution des espèces et du flux génique dans la province à nodules du Pacifique [2]. C'est ainsi que le Nautilo a été envoyé en 2004 par l'Ifremer, pour une campagne d'évaluation de l'impact environnemental [3] (Figures 15, 16 et 17).

Les traces de dragage, datant de 1978, sont encore visibles, mais une recolonisation est à l'œuvre. Ces résultats, bien que préliminaires, permettent déjà de formuler quelques recommandations dans la perspective d'une éventuelle

exploitation des nodules dans ces zones profondes (*voir l'encart «La surveillance en mer»*). Ces recommandations portent sur la nécessité de créer des zones protégées (sans exploitation de nodules), en nombre suffisant, réparties sur toute la zone de fracture de Clarion-Clipperton (d'est en ouest). Elles auront la surface requise pour abriter l'ensemble des composantes d'un écosystème benthique dans cette région (différentes morphologies du fond, différents faciès nodulaires par exemple), et pour éviter les effets directs et indirects de la récolte des nodules sur le fond. Ces zones devront être séparées de façon à favoriser la recolonisation des zones impactées par la faune des zones protégées.

Après leur ramassage, les nodules pourraient être transportés par des minéraliers adaptés pour leur futur traitement métallurgique sur des sites spécifiques. Cependant, comme on le verra plus loin, il est possible que le minerai soit traité localement, dans un site du Pacifique, ce qui réduirait les coûts de transport.

### 2.2.2. Le traitement métallurgique

Le traitement métallurgique est un élément majeur par son poids économique dans l'exploitation des nodules. Afin de départager les deux voies – hydrométallurgie et pyrométallurgie – deux principaux facteurs doivent être considérés :

**1) Le coût de l'énergie.** L'énergie basée sur l'électricité électronucléaire est particulièrement avantageuse



Figure 16

*Une anémone au milieu d'un champ de nodules.*

en France métropolitaine. Au niveau mondial, il reste cependant que le prix de l'énergie ira croissant, malgré l'utilisation de sources diversifiées, comme l'énergie hydroélectrique ou d'autres sources renouvelables.

**2) La production de manganèse.** Cette production a été orientée dans les études Gemonod vers du ferrosilicomanganèse à plus forte valeur ajoutée que le ferromanganèse carburé. Cette anticipation a été largement confirmée puisque actuellement, on produit 60 % de ferrosilicomanganèse. Cependant, les prévisions sur le cours de ce composé restent aléatoires.

Par ailleurs, le choix du type de traitement métallurgique

Figure 17

*Cette holothurie a été découverte dans le cadre du Census of Diversity of Marine Life program.*



## LA SURVEILLANCE EN MER

Dans une exploitation des nodules polymétalliques, comme dans une exploitation pétrolière, l'infrastructure mise en place doit être accompagnée de tout un système de surveillance. L'usage de capteurs, de systèmes de détection et de régulation doit permettre de contrôler et d'assurer le bon fonctionnement des engins, des conduites, des pompes... De fait, il est indispensable de prévenir tout risque industriel pouvant avoir des conséquences dramatiques (accidents du personnel, catastrophe écologique à court ou à long terme). Les dépenses substantielles liées à un tel système de surveillance pèseront donc de manière notable dans le chiffrage d'une exploitation des nodules.

est conditionné par des résultats d'essais sur un pilote de traitement – qu'il reste encore à réaliser.

### 2.2.3. Étude économique [4]

#### *Financer les exploitations dans un contexte mondial*

Les études Gemonod se sont déroulées dans un contexte où l'intervention de l'État français dans les domaines hautement stratégiques était habituelle. C'est ainsi que les coûts de développement, incluant la construction onéreuse du pilote, étaient pris en charge par celui-ci. Si l'investissement important de l'État a permis de fonder des politiques à long terme dans certaines filières telles que le nucléaire ou l'aéronautique, il est maintenant inimaginable qu'un tel soutien intervienne pour un investissement minier. D'ailleurs, les conditions de la concurrence au niveau européen ne le permettraient sans doute pas. En conséquence, d'une part cet investissement pèsera sur la rentabilité ; d'autre part, et surtout, le risque sera entièrement assumé par des investisseurs privés, ce qui implique que la marge bénéficiaire déglagée

devra être sensiblement plus substantielle afin de justifier l'exploitation.

De plus, ces études de coûts avaient été effectuées dans le contexte économique des grandes puissances de l'époque, à savoir l'Europe, les États-Unis et le Japon. Par exemple, en France, il était prévu de transporter les nodules par minéraliers jusqu'en métropole, car on considérait au moment de l'étude que l'énergie nucléaire apporterait un avantage financier pour l'économie du procédé. Mais, dès le début des années 1980, les premiers éléments de la montée en puissance de pays émergents tels que la Chine, l'Inde et le Brésil étaient perceptibles, et à l'heure actuelle, il est vraisemblable que l'exploitation soit assurée, totalement ou partiellement, par ces pays très consommateurs de métaux et qui suivent des politiques énergétiques différentes (charbon, hydraulique...).

#### *Estimations des coûts d'exploitation : investissement et fonctionnement*

La justesse des hypothèses faites il y a vingt ans est incontestée. Aujourd'hui, la difficulté est de les actualiser sans étude technologique nouvelle, et en tenant compte de nouveaux facteurs tels que l'impact environnemental. Pour simplifier le problème, on peut obtenir une évaluation crédible en se basant sur un indice global. L'indice choisi est le *Producer Price Index* des États-Unis, et particulièrement le *Total Manufacturing Industries*, lequel a progressé d'environ 50 % entre 1988 et 2007,

mais de manière hétérogène : ainsi les métaux primaires ont augmenté de 70 % mais les équipements électriques de 18 % seulement. On retiendra une **augmentation de 50 %** qui apparaît assez conservatoire (*Figure 18*)<sup>6</sup>.

*L'exploitation des nodules est-elle rentable ? Analyse sur les matières premières*

Les nodules sont-ils une source de métaux rentable ? Rappelons la production annuelle de métaux sur 1,5 millions de tonnes de nodules ramassés : manganèse (382 000 tonnes), nickel (19 700 tonnes), cuivre (17 800 tonnes) et cobalt (3 500 tonnes).

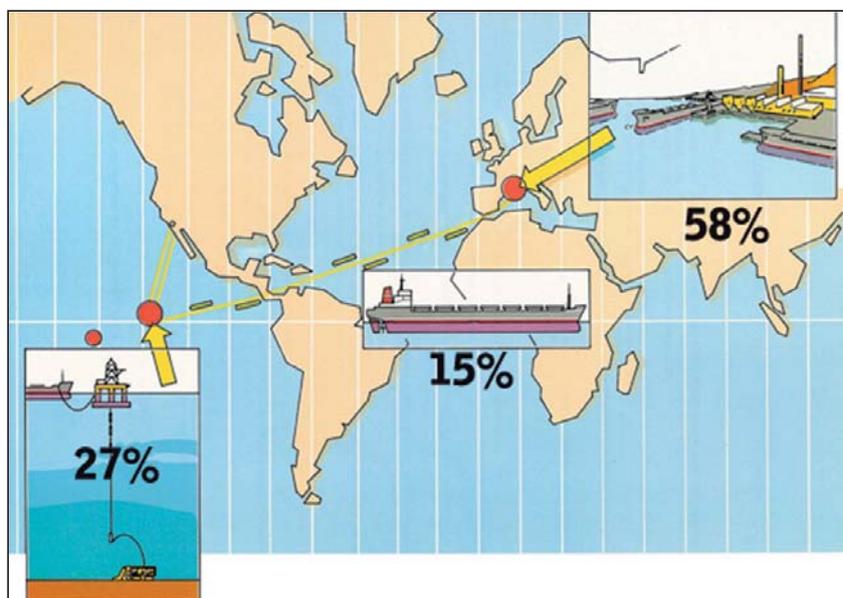
L'étude Gemonod avait établi des projections à quinze ans sur le cours des métaux (*Figure 20*), projections qui semblent être relativement en accord avec la situation constatée actuellement. Ceci est en grande partie dû à une prise en compte de la forte croissance des grands pays émergents : la Chine, l'Inde et le Brésil. Analyse pour chaque métal...



### Le manganèse

Le manganèse est le métal le plus abondamment extrait des nodules polymétalliques.

6. Évidemment certains coûts peuvent augmenter beaucoup plus pour des raisons conjoncturelles : ainsi le coût journalier des plateformes de forage a énormément augmenté ces dernières années puisqu'il atteint actuellement 500 000 \$/jour, soit cinq fois plus qu'il y a quelques années !



	Ramassage	Transport	Traitement	Total
Investissement (M\$)	450 + 90 <sup>7</sup>	300	654	1 404 + 90
Charge <sup>8</sup> (M\$/an)	48	26	53	127
Coûts opératoires (M\$/an)	81	48	233	362
Coût total M\$/an (%)	129 (27 %)	74 (15 %)	286 (58 %)	489
Par tonne de nodule (\$/t)				326

La production mondiale de ce métal, en 2005, avait atteint 11,8 millions de tonnes<sup>9</sup> (dont 40 % par la Chine) – chiffre proposé par les études Gemonod – et, de manière intéressante, 60 % de ce manganèse correspond à du ferrosilicomanganèse, forme qui serait issue des nodules. Son cours moyen sur 2005-2006, qui s'élève à **0,85 \$ kg**, est même supérieur aux estimations de Gemonod, qui étaient à 0,65 \$/kg.

Figure 18

Coûts d'exploitation : ramassage-transport-traitement.

7. Coût du pilote.

8. Les hypothèses du financement sont 50 % sur fonds propres, 50 % sur emprunts à 7,5 %.

9. Source : Institut international du manganèse. Cette production correspond à 34 millions de tonnes de minerai.

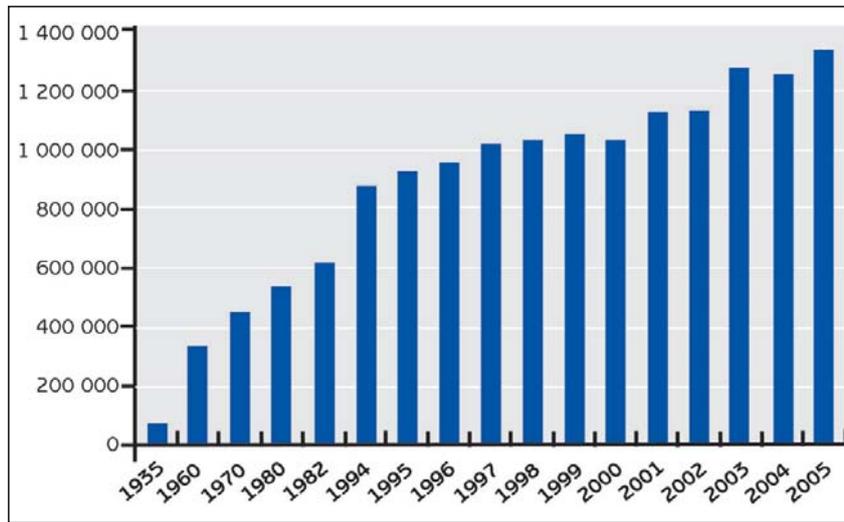


Figure 19

La production mondiale de nickel entre 1935 et 2005 (en tonnes).



### Le nickel<sup>10</sup>

Moins abondant dans les nodules que le manganèse, le nickel est toutefois commercialement plus avantageux. Le cours retenu par Gemonod à long terme était de **7,2 \$/kg**. Suite à une prise en compte de possibilités d'exploitation de gisements de latérites nickélifères, abondants en Nouvelle-Calédonie, l'analyse des experts a conduit à **11 \$/kg**. Bien sûr les cours ont atteint ces dernières années des valeurs beaucoup plus élevées – jusqu'à 40 \$/kg – mais l'on ne peut pas fonder une exploitation et sa rentabilité sur des valeurs extrêmes !

La consommation mondiale en nickel est de 1,5 millions de tonnes (dont 260 000 tonnes sont consommées par la Chine), comme projetée par Gemonod à l'époque (Figure 19). Or, la part de nickel issu des nodules dépasse à peine 1 % de cette consommation.



### Le cobalt

Le cobalt est un co-produit de la production de cuivre (au Zaïre et en Zambie, pour 55 % de la production mondiale) et un co-produit de la production de nickel (en Russie). La production de cobalt par l'exploitation des nodules atteindrait 3 500 tonnes par an, à comparer avec la production mondiale d'environ 55 000 tonnes, correspondant exactement à la projection qui avait été faite par Gemonod. Notons que la Chine produit 20 % du total à partir de minerai africain.

Le prix du cobalt a varié entre 30 et 50 \$/kg. La Fédération de l'Industrie Minérale estime que le seuil de rentabilité pour des projets au Congo se situe à 24 \$/kg, à comparer au cours retenu dans l'étude soit de 13,6 \$/kg qui apparaît conservatoire. Il est proposé de retenir **30 \$/kg**.



### Le cuivre

Le cours retenu, soit à 1,9 \$/kg, ne semble pas devoir être remis en cause. De plus, le poids économique du cuivre est relativement faible.

*Analyse sommaire de la rentabilité et du lancement d'une exploitation industrielle*

Il serait présomptueux de faire une analyse de la rentabilité d'une exploitation de nodules sans études nouvelles approfondies. On se contentera donc de quelques remarques :

10. Référence : Société Chimique de France.

• Les études Gemonod conduisaient à un **taux de rentabilité interne compris entre 10 et 14 %** pour une exploitation sur vingt ans (*Figure 21*), avec le projet que nous avons décrit. Cependant, ce taux prenait en compte la subvention du pilote de ramassage par l'État et ne semblait pas suffisant pour inciter des investisseurs privés à lancer une exploitation de nodules. Il faut rappeler que les règles internationales établies plus tard par l'ISA étaient encore inexistantes il y a vingt ans.

• La **comparaison avec les minerais terrestres** est complexe à cause du caractère polymétallique des nodules. Le principe est de séparer la part du nickel dans un mélange nickel-cuivre-cobalt et de la comparer au nickel des mines riches de latérites, par exemple celles de Koniambo en Nouvelle-Calédonie. Il faut raisonner en nickel équivalent en tenant compte de la valorisation relative des trois métaux. Cela conduit à 2,37 % de nickel équivalent pour les nodules et 2,35 % pour le projet de Koniambo<sup>11</sup>. La comparaison des investissements, rapportés aux quantités de métal produites, est aussi du même ordre : 1,4 milliards de dollars pour les nodules, 3 milliards de dollars pour Koniambo. Quant au manganèse, il faut le comparer à celui des exploitations terrestres, en Afrique notamment.

11. Le projet Koniambo (teneur nickel : 2,12 %) est de l'ordre de 3 milliards de dollars pour une production de 60 000 tonnes par an de nickel. Cet investissement inclut une centrale de 400 MW.

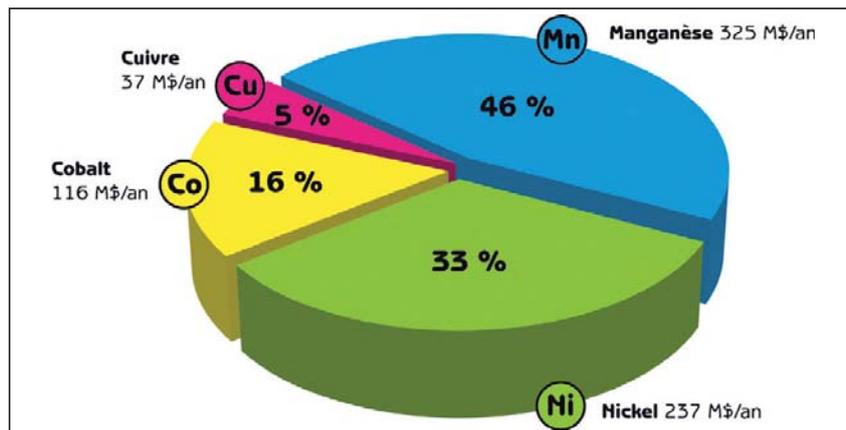


Figure 20

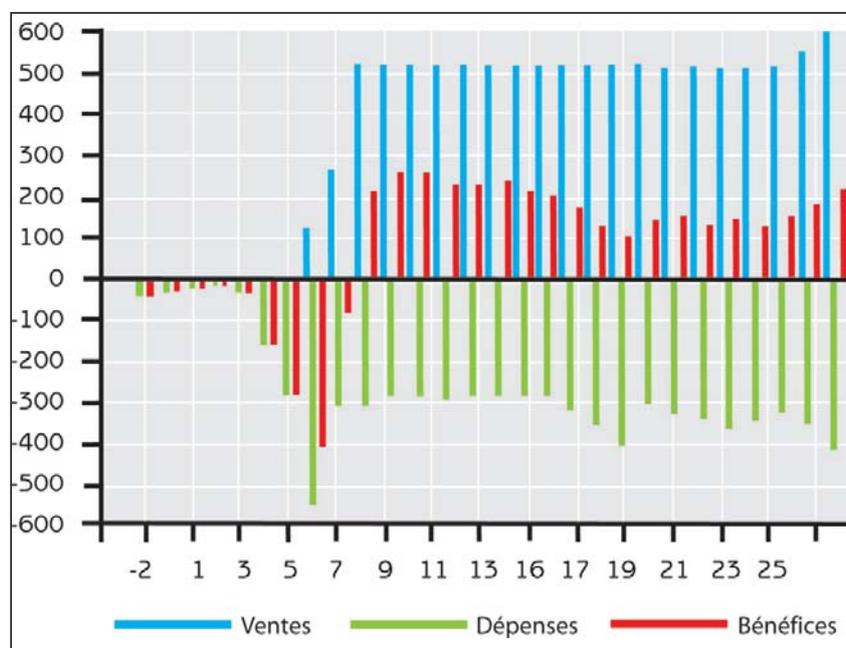
*Projection des recettes d'exploitation des nodules polymétalliques. Les taux de récupération par traitement hydrométallurgique sont de : 96 % (Ni), 94 % (Co), 95 % (Cu), 85 % (Mn).*

Les nodules sont un minerai moins riche en manganèse (30 %) que certains minerais terrestres (35 % à 48 %). L'exploitation du manganèse des nodules pourrait à elle seule payer le transport de l'ensemble ainsi que le coût de son traitement. Ce dernier est élevé mais il est largement compensé par la haute valeur ajoutée du silicomanganèse produit. Au total, la comparaison est plutôt favorable aux nodules, si l'on ne prend pas en compte bien sûr les risques inhérents au ramassage.

• Les **cours des métaux** fluctuent beaucoup. S'ils sont relativement élevés, du fait de la croissance économique

Figure 21

*Analyse de la rentabilité : en ordonnées M\$ ; en abscisse : le calendrier des opérations (les montants sont ceux de Gemonod sans actualisation).*



mondiale tirée principalement par les grands pays émergents, les sociétés minières ne décident une exploitation qu'en s'assurant que celle-ci aura un « point mort » au niveau de cours relativement bas. Ainsi, pour Koniambo, le cours prévisionnel sur lequel semble être basée une exploitation serait de 3,3 \$/kg.

- La **marge brute de l'exploitation, calculée à 353 millions de dollars par an**, est supérieure à celle d'il y a vingt ans. Toutefois elle est la même en valeur relative par rapport à l'investissement initial, soit 23 %, à cause des charges supplémentaires dues au pilote de ramassage.

- La **demande en matières premières** est très forte et encourage la réalisation de nombreux projets miniers.

Pour le nickel, l'étude Gemonod prévoyait qu'il y aurait, dans un délai de vingt à quarante ans, le choix entre des projets miniers de latérites nickélifères abondantes mais à plus faible teneur que les garniérites,<sup>12</sup> et l'exploitation des nodules. Cependant, pour démarrer l'exploitation des nodules, il eût fallu disposer de la preuve de la faisabilité du ramassage par des essais sur pilote. Ce dernier n'ayant pas été réalisé à cause des investissements à risques élevés, il est normal que le choix se soit porté sur les mines terrestres, qui seront amorties sur près de cinquante ans.

12. Les garniérites sont des phyllosilicates, minéraux de la famille des silicates, composés de nickel et de manganèse.

## Perspectives

Où en sommes-nous avec les nodules de la mer ? Notre histoire avec ces boules métalliques remonte bien aux années 1970-1980, où leur intérêt économique était apparu. Ces décennies ont été marquées d'une part par deux chocs pétroliers et d'autre part par des risques sur les exportations des minerais de l'URSS et de pays d'Afrique du Sud. L'occident a alors craint des difficultés majeures d'approvisionnement, notamment en minerais de manganèse et cobalt. Plusieurs pays ont alors entrepris de prospecter les minerais sous-marins et de développer des systèmes expérimentaux pour les exploiter. La baisse des cours dans les années 1980 et la fin de ces craintes géopolitiques ont entraîné la mise en veilleuse de ces programmes dans les pays occidentaux. Parallèlement, d'autres pays tels que la Chine, la Corée du sud ou encore le

Brésil ont manifesté leur intérêt sans toutefois investir dans l'exploitation de ces minerais.

La situation géopolitique a évidemment fondamentalement changé depuis ces années. La mondialisation a accru les échanges commerciaux et supprimé les situations de monopole. Des contrats entre des investisseurs pionniers et l'ISA ont été mis en place depuis le début des années 2000 : cela concrétise une avancée juridique internationale. Toutefois, les règles internationales sont plus complexes que celles des permis nationaux, incitant peu les investisseurs.

Ces dernières années, les cours ont été soutenus du fait des besoins des pays émergents. Après l'inflexion due à la crise économique, la croissance de la demande de ces pays reprendra de telle sorte que ces besoins entraineront la reprise des investissements dans les mines terrestres. Mais l'on commence aussi sérieusement à se tourner vers les minerais sous-marins. Nous l'avons vu, la situation des nodules dans les grandes profondeurs rend leur ramassage à lui seul complexe et coûteux. Peut-être exploitera-t-on d'abord les d'autres minerais sous-marins tels que les encroûtements cobaltifères et sulfures hydrothermaux (Chapitre de Y. Fouquet), moins profonds que les champs de nodules et situés, pour certains, dans des zones économiques exclusives (ZEE). Toutefois, ces minerais sont plus difficiles à extraire que les nodules. En effet, les nodules sont posés sur les sédiments alors que les autres étant liés au substrat des quantités importantes de stériles sont remontées avec le minerai.

Alors exploitera-t-on un jour les nodules polymétalliques ? Peut-être les pays fortement consommateurs de métaux seront-ils disposés à lancer une exploitation de nodules : le terme apparaît lointain, 30-50 ans ?

**Liens utiles :**

L'Autorité internationale des fonds marins (ISA) :

[www.isa.org.jm](http://www.isa.org.jm)

L'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer :

[www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr)

**Bibliographie**

[1] Lenoble J.P. (1992). Édition sciences et technique. Réf : M2389, parution 07/1992.

[2] Tilot V. (2006). Biodiversité et distribution de la mégafaune. Écosystème de nodules polymétalliques de l'océan Pacifique Est Équatorial. *Technical Series* – Commission Océanographique Intergouvernementale, Unesco, **69** : 0074-1175.

[3] Galeron J. (2004). Fiche de campagne Nodinaut 2004, Ifremer.

[4] Herrouin G., Lenoble J.-P., Charles C., Mauviel F., Bernard J., Taine B. (1989). French « Study indicates profit potential for industrial manganese nodule venture », 21st Annual Offshore Technology Conference, Houston, May 1-4, 1989. *Transactions*, vol. 288 Society for mining, metallurgy and exploration, Inc.

# Crédits photographiques

- Fig. 1 : Ifremer.
- Fig. 2 : Ifremer/Stéphane Lesbats.
- Fig. 3 : Ifremer – Campagne NIXONAUT.
- Fig. 5 : Ifremer. Schéma non à jour.
- Fig. 8 : Ifremer/Genonod.
- Fig. 9 : Ifremer/Gemonod.
- Fig. 10 : Ifremer/Gemonod.
- Fig. 12 : Photothèque CRT-groupe Eramet.
- Fig. 13 : Total.
- Fig. 14 : Ifremer – Campagne NIXONAUT.
- Fig. 15 : Ifremer – Campagne NIXONAUT.
- Fig. 16 : Ifremer – Campagne NODINAUT.
- Fig. 17 : Ifremer – Campagne NODINAUT.
- Fig. 19 : Secrétariat de la CNUCED d'après les statistiques de l'industrie et du Groupe d'étude international sur le nickel.