

Les Encroûtements Cobaltifères De Polynésie Française

Henri Bougault, ex Directeur du Département Géosciences Marines de l'Ifremer,
henri.bougault@wanadoo.fr

Philippe Saget, Département Géosciences Marines de l'Ifremer,
philippe.saget@ifremer.fr

Amas sulfurés hydrothermaux, nodules et encroûtements ferromanganésifères constituent en l'état des connaissances les trois ressources minérales potentielles des « grands fonds » marins. L'évolution du contexte international pour l'accès aux matières premières depuis quelques années conduit naturellement à porter une attention à ces ressources potentielles sous-marines. Bien que les encroûtements ferromanganésifères puissent présenter la plus grande valeur en métal contenu [Ifremer, 2011], principalement en raison de leur concentration en cobalt, l'étude de ces encroûtements et de leur contexte n'ont pas fait l'objet, en France, d'autant d'investigations que les nodules de manganèse ou les amas sulfurés hydrothermaux. On se propose de résumer les connaissances acquises, en particulier dans la Zone Economique Exclusive de Polynésie française, et de suggérer une conduite à tenir dans le cadre de ce nouveau contexte international.

Les études des Encroûtements Cobaltifères : historique

Nodules et encroûtements ferromanganésifères¹ furent échantillonnés pour la première fois lors des expéditions du H.M.S. Challenger au cours des années 1870 [Murray and Renard, 1891]. Fin des années 1950, John Mero attira l'attention sur l'intérêt potentiel économique² de ce qu'il appelle « Concretions of manganese and iron oxides » [Mero, 1962] ; en réalité son propos ne concerne presque exclusivement que les nodules de manganèse. Dès lors, tous les pays qui portent un intérêt aux grands fonds marins auront un programme plus ou moins important dédié à l'étude et à la prospection des nodules de manganèse. A partir des années 1970, la France par son consortium « AFERNOD »³ y consacra plus de quarante campagnes à la mer qui conduisirent à l'attribution d'un permis minier en 1987 par l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM, une émanation de l'ONU, en anglais ISA, International Seabed Authority).

L'effort dédié en France à l'étude des encroûtements cobaltifères a été beaucoup plus modeste. En 1971, peu après la création du CNEXO, Centre National pour l'Exploitation des Océans, et avant la constitution d'une équipe dédiée à l'étude des nodules de manganèse, le Groupe Scientifique du CNEXO fut dûment mandaté pour échantillonner des nodules de manganèse. Cette opération fut conduite par Jean Marie Auzende (géologue) et Pierre Chardy (biologiste) à bord d'un navire de la Marine Nationale, la Coquille, à partir de Tahiti : campagne NIXO 01. En raison d'une avarie de câble, le dragage par 4000 ou 5000 mètres de profondeur étant impossible, ils décidèrent

¹ L'expression « concrétion ferromanganésifère » désigne deux types de concrétions très communes du fond des océans : les nodules, concrétions sphériques ou ellipsoïdales de quelques centimètres, et les encroûtements, concrétions d'épaisseur millimétrique à 10 ou 15 centimètres. Ces deux types de matériaux peuvent couvrir des surfaces considérables.

² L'intérêt économique potentiel des nodules tient à leurs concentrations, par ordre d'importance décroissante, en nickel, cuivre et cobalt : celui des encroûtements cobaltifères, à leurs concentrations en cobalt, platine et nickel. Les nouvelles technologies permettent également d'identifier un intérêt potentiel pour certains éléments tels que titane, terres rares, zirconium ou niobium.

³ AFERNOD : Association Française pour l'Etude et la Recherche des NODules Polymétalliques. La liste des participants a évolué depuis sa création en 1974. Ont été partenaires : CNEXO, CEA, BRGM, Le Nickel SLN, Les Chantiers France Dunkerque, NORMED, Ifremer, METALEUROP SA.

d'échantillonner le plateau des Tuamotu par 1000 m de profondeur, situé à 160 milles au Nord – Est de Tahiti. C'est ainsi que les premiers échantillons de concrétions ferromanganésifères obtenus par une équipe française furent des « encroûtements cobaltifères ». La concentration en cobalt de ces encroûtements était supérieure à 1 %, plusieurs échantillons analysés titrant 1.4 %. Sur un objectif d'échantillonnage de nodules de manganèse, une mauvaise fortune de mer (l'avarie de câble) avait ainsi conduit à l'échantillonnage d'encroûtements cobaltifères à haute teneur en cobalt et qui plus est sur un site présentant des caractéristiques intéressantes : les encroûtements avaient été facilement détachés de leur substrat carbonaté (paléo-récifs corallien, voir plus loin).

Il faut attendre plus de quinze ans, en 1986 et 1987, pour voir se réaliser la seule campagne française dédiée à l'étude des ces encroûtements cobaltifères et à leurs environnements. Il s'agit du programme NODCO, pour « NODules CObaltifères » dont le but était d'étudier les environnements géologiques des nodules et des encroûtements au cours du « Tour du Monde du Jean Charcot ». En dépit de l'acronyme NODCO dédié à ce programme, la partie « cobaltifère » du programme concerne bien les « encroûtements » et leurs contextes, même si des nodules peuvent coexister avec des encroûtements. Ce programme a notamment permis d'établir les contextes géologiques structuraux du plateau des Tuamotu (Polynésie française) et les contextes particuliers aux « encroûtements cobaltifères ».

Fin des années 1990, l'objectif du programme ZEPOLYF, Zone Economique de POLYnésie Française, fut d'acquérir des données de base, la bathymétrie en premier lieu, devant servir de support au développement économique du territoire [Bonneville and Sichoix, 1998]. L'échantillonnage à grande maille effectué par dragages au cours de ce programme a permis d'apporter un complément à échelle régionale sur ces encroûtements ferromanganésifères [Bonneville, 2002].

Au plan international, plusieurs pays ont conduit des programmes pour l'étude de ces encroûtements, Japon, Etats Unis, Russie, Allemagne, Corée, Royaume Uni, Chine.

Alors que la réglementation internationale sur la valorisation minière des grands fonds océaniques ne concernait jusqu'à un passé récent que les nodules de manganèse, l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM) a récemment voté un texte relatif aux amas sulfurés hydrothermaux et aux encroûtements cobaltifères.

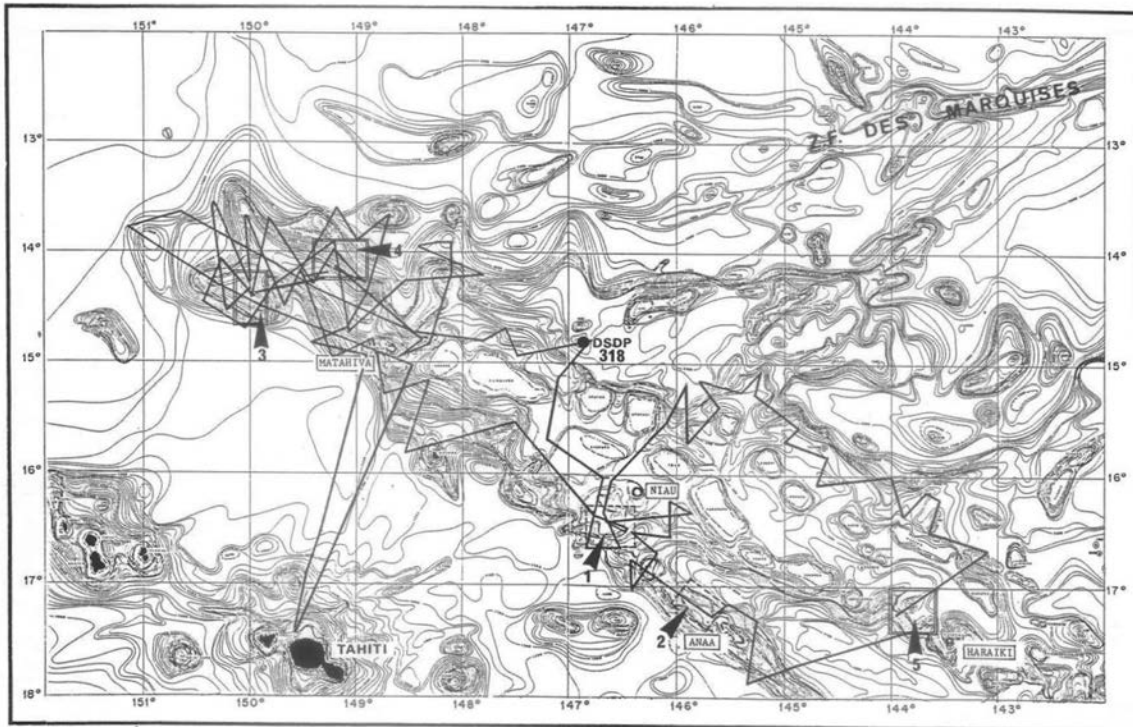
Les encroûtements cobaltifères : composition

La formation de dépôts d'oxy-hydroxydes ferromanganésifères est un phénomène commun. Alors que certains de ces dépôts se forment très rapidement, par exemple dans un environnement hydrothermal, la caractéristique des dépôts « grands fonds », nodules ou encroûtements, est une très faible vitesse de croissance, estimée à quelques millimètres par million d'années. La genèse de dépôts à d'aussi faibles vitesses de croissance a pour corollaire un taux de sédimentation quasi nul et / ou des courants forts comme sur le sommet des guyots.

Les rapports de concentrations entre éléments les majeurs, fer et manganèse, peuvent présenter des différences entre nodules et encroûtements. Néanmoins, la différence entre nodules et encroûtements tient essentiellement à leurs concentrations en éléments mineurs : cobalt, nickel et cuivre. Concernant la genèse, les processus et les sources des métaux qui composent les nodules et les encroûtements, toutes les hypothèses vraisemblables ont été formulées : il n'existe pas néanmoins de théorie satisfaisante pouvant rendre compte, par exemple, des différences de concentrations en cobalt, nickel et cuivre entre les nodules présents dans les plaines abyssales et les encroûtements présents sur les monts sous-marins et guyots. A titre indicatif, le tableau suivant présente la composition d'un nodule type de la zone située entre les zones de fracture Clarion et Clipperton et celle d'un encroûtement type du plateau des Tuamotu (ex : site Niau).

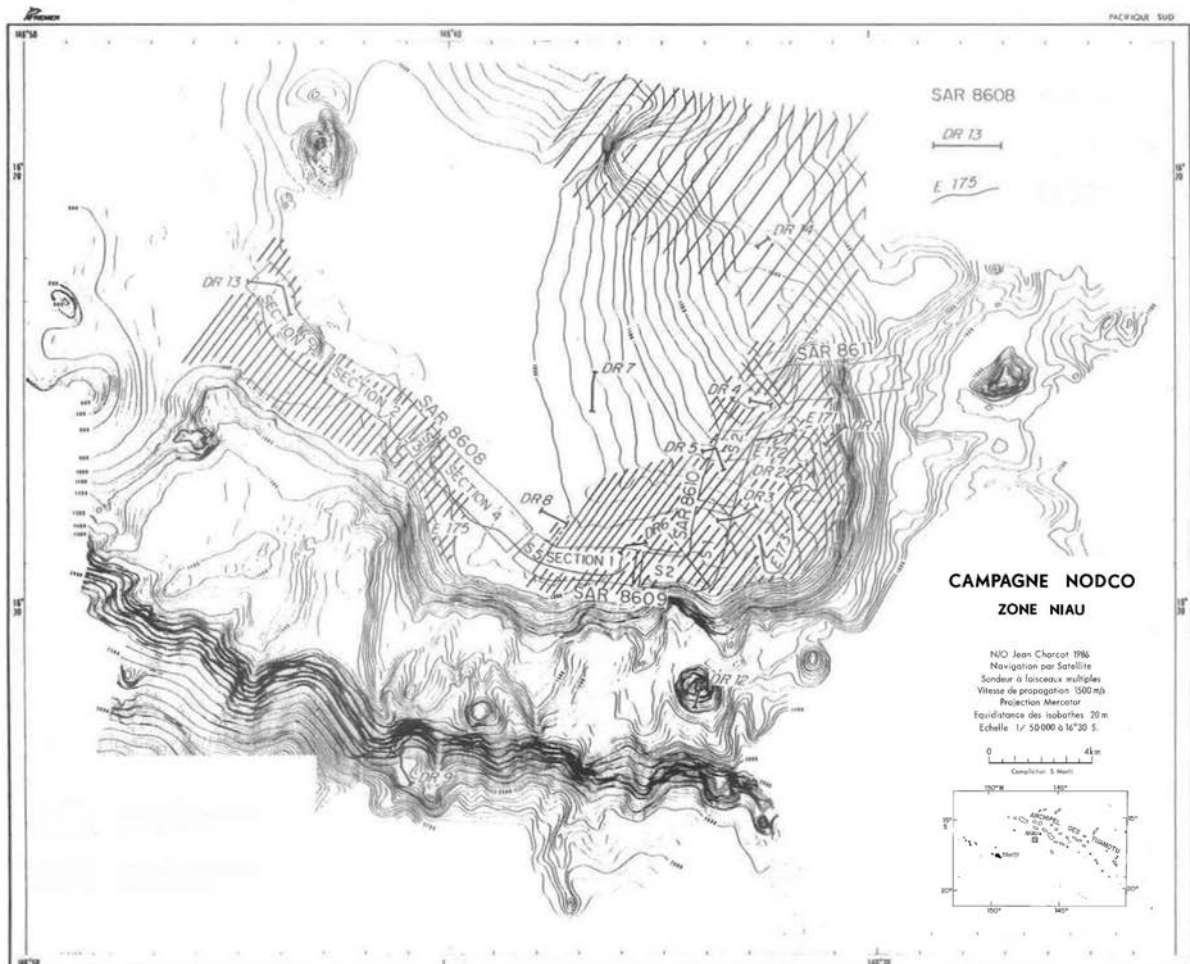
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Pt
	%	%	%	%	%	ppm
Nodule (Clarion – Clipperton)	29	6	0.25	1.4	1.2	
Encroûtement (Tuamotu)	28	15	1.1	0.6	0.1	0.7

Figure 1. Archipel des Tuamotu suivant une compilation de données réalisée par Monti et Pautot [Monti and Pautot, 1974]. La ligne brisée représente la route suivie par le Jean Charcot pendant la campagne NODCO (1987) suivant laquelle les données de bathymétrie multifaisceaux et du sondeur 3.5 kHz ont été acquises. Les cinq sites choisis pour une étude de détail sont désignées de 1 à 5, dont le site Niau : la synthèse des données acquises sur ce site sont présentées figure 2.



L'intérêt porté aux encroûtements ferromanganésifères est dû à leurs concentrations en cobalt. C'est le paramètre qui fixe au premier ordre la valeur en métal contenu : d'où le nom donné à ces dépôts : encroûtements cobaltifères. Le platine [Kosakevitch, 1987] et le nickel sont des éléments valorisants. On note également la présence d'éléments tels que titane, terres rares, niobium ou zirconium. Les échantillons obtenus au cours de la campagne NODCO sur le plateau des Tuamotu présentent des concentrations en cobalt variant de 0.5 % à 1.8 % : une grande part des valeurs est située entre 1 % et 1.3 %. On distingue le plus souvent une couche interne qui se serait formée avant 8 millions d'années et une couche externe postérieure : la concentration en cobalt de la couche interne est en général plus faible (0.5 %), tandis qu'elle est comprise entre 1 et 1.5 % pour la couche externe : elle peut atteindre 2 % dans les derniers millimètres externes. Les encroûtements de l'archipel des Tuamotu ont fait l'objet d'une thèse : [Pichocki, 1987].

Figure 2. Site Niau, exemple de sommet de plateau volcanique arasé : le sommet est presque plat, les flancs très abrupts. Les différentes opérations pour étudier ce site ont été reportées sur cette carte. Un trait de Sondeur Acoustique Remorqué et de sondeur 3.5 kHz est indiqué par « SAR, suivi d'un numéro ». Un trait d'Epaulard, équipement destiné à prendre des photos au voisinage du fond est indiqué par « E suivi d'un numéro ». Un trait de drague est indiqué par « DR suivi d'un numéro ». Les opérations de carottier pyrotechnique ne sont pas reportées. L'ensemble des données a conduit à proposer la zone « hachuré serré » comme zone probable d'encroûtements et la zone « hachurée large » comme zone de présence possible. Les zones à encroûtements sont localisées sur la bordure périphérique du sommet.



Les encroûtements cobaltifères : Environnements géologiques et substrats

Ainsi que déjà mentionné, la formation de dépôts ferromanganésifères est un processus commun : ces dépôts peuvent se former à des vitesses très différentes (on connaît des dépôts sur des bouteilles de Coca Cola) et se rencontrent dans des environnements géologiques divers. Les nodules de manganèse sont présents par grande profondeur dans les plaines abyssales.

Les encroûtements ferromanganésifères sont présents dans deux grands types d'environnements :

- Sur le flan des édifices volcaniques, par des profondeurs variables. Le substrat est basaltique, pillow lavas, morceaux de pillows, tubes de lave ou autres manifestations d'extrusion et d'écoulement de laves sous-marines. Ce type de dépôts a été bien documenté en Polynésie française, à grande maille, par le programme ZEPOLYF [Bonneville, 2002].

- Sur les plateaux et édifices volcaniques dont les sommets ont été réduits à une plateforme par l'érosion au cours de leur histoire (subsidence de structure volcaniques initialement émergées). Le substrat peut être constitué d'un carbonate (paléo-récifs coralliens) ou d'un sol de cendres volcaniques palagonitisées. Ce contexte et ces types de dépôts ont été très bien documentés au cours du programme NODCO en 1987 [*Le Suavé*, 1986; *Le Suavé et al.*, 1986; *Le Suavé*, 1987 ; *Le Suavé et al.*, 1990].

S'agissant d'apprécier au premier ordre l'intérêt de ces encroûtements cobaltifères en tant que ressource minérale, il convient de rappeler ci-après la stratégie, les moyens utilisés et les résultats principaux obtenus au cours du programme NODCO, à bord du Navire Océanographique Jean Charcot.

A partir des résultats très préliminaires obtenus au cours de la campagne NIXO 01 rappelés plus haut, la stratégie du programme NODCO prévoyait l'étude de cinq sites, cinq boîtes, de l'Archipel des Tuamotu, portés sur la figure 1. La carte de l'Archipel des Tuamotu (Fig. 1) est une compilation des données antérieures au projet [*Monti and Pautot*, 1974]. L'archipel des Tuamotu s'étend sur 1500 km suivant une direction WNW – ESE. Les trajets de site à site précisés figure 1 ont naturellement été valorisés par l'acquisition de données bathymétriques⁴. Les **données bathymétriques multifaisceaux** sur chaque site constituent le premier élément de base absolument essentiel à la localisation des zones à encroûtements sur ce plateau volcanique. La figure 2 (le site Niau) présente un exemple de sommet de plateau arasé, et de son flanc très abrupt.

La nature du fond, avec dépôt sédimentaire ou non, autre élément essentiel, a été appréciée par l'imagerie d'un **sondeur 3.5 kHz** : l'absence de réflecteur dans l'épaisseur superficielle du fond et une forte réverbération du signal traduisent l'absence de sédiment. Le SAR, **Sondeur Acoustique Remorqué**, permet d'obtenir une imagerie du fond sur 1500 mètres de part et d'autre du trajet de l'engin tracté à une centaine de mètres au dessus du fond. Le SAR enregistre les échos d'objets ou de linéaments réflecteurs. Le facies de l'imagerie contribue également à apprécier la présence ou l'absence de sédiment.

Bathymétrie, sondeur 3.5 kHz et SAR permettent ainsi de distinguer sur un sommet de guyot l'existence de zones sédimentées (à priori sans présence d'encroûtements) et de zones non sédimentées (zones de présence probable d'encroûtements).

Des **photographies du fond** en continu ont été réalisées à l'aide de l'engin autonome **Epaulard** : l'engin est maintenu par un guide – rope à hauteur constante au dessus du fond. Des photographies ont également été prises par des **caméras ponctuelles** installées sur des mini-carottiers.

Enfin, l'échantillonnage a été pratiqué par **dragages** et par l'utilisation de **mini-carottiers** pyrotechniques spécialement conçus pour échantillonner ces encroûtements.

L'ensemble de ces données, bathymétrie, réflectivité – imagerie du fond, photographies du fond et échantillonnage a permis de proposer sur chaque site, tel que celui de Niau (Fig. 2), une aire d'encroûtements probables (hachuré serré) et une aire d'encroûtements possibles (hachuré large), la différence d'appréciation « probable / possible » tenant à la disponibilité et à la complémentarité des données acquises au cours du temps imparti à la campagne. Ainsi, pour le site Niau estime-t-on à 200 km² la surface de présence d'encroûtements « probables + possibles ».

L'échantillonnage a par ailleurs permis d'identifier les substrats sur lesquels reposent ces encroûtements sur les sommets de ces guyots : paléo-récifs coralliens (ex : site Niau) ou cendres volcaniques palagonitisées (ex : site Haraïki). La cohésion encroûtement / substrat est à l'évidence un paramètre clé : elle est estimée « moyenne » sur un substrat carbonaté, faible sur des cendres volcaniques, tandis qu'elle est très aléatoire sur les sites à substrat basaltique. En corollaire de la capacité d'un outil, ne serait-ce qu'une drague, à détacher un encroûtement, il y a également lieu de considérer la quantité de matériel stérile échantillonné en même temps que l'encroûtement lui-même : de ce point de vue, il y convient de différencier les encroûtements sur substrat basaltique d'une part et les encroûtements sur substrat carbonaté ou de cendres volcaniques d'autre part. Le contenu d'un dragage sur un substrat basaltique (ex : le flanc d'un mont sous-marin) contient des blocs de basaltes recouverts d'encroûtements d'épaisseur variable : le rapport pondéral d'encroûtement par rapport à la masse de basalte est faible. Le contenu d'un dragage effectué sur un champ d'encroûtements situé sur le sommet d'un guyot à substrat carbonaté ou de cendres volcaniques ne contient que des

⁴ Le Navire Océanographique Jean Charcot fut le premier navire océanographique doté d'un système d'acquisition de données bathymétrique multifaisceaux.

encroûtements. La figure 3 montre un encroûtement sur un support basaltique. La figure 4 montre la surface d'un champ d'encroûtements (photo Epaulard) et un échantillon d'encroûtement sur le site Niau.

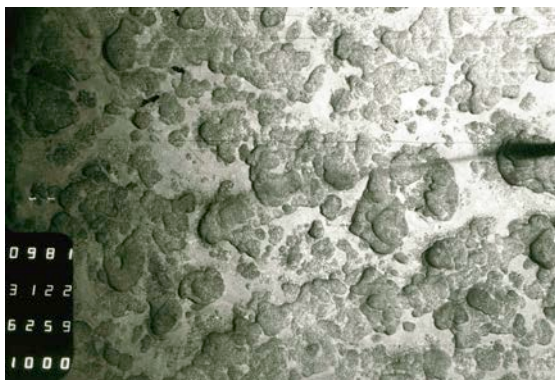
Figure 3. La microtopographie d'un fond basaltique est le reflet des différentes manifestations d'extrusions et d'écoulements de laves : elle est nécessairement irrégulière. Un dragage récolte des échantillons basaltiques de volume très variable couverts d'encroûtements d'épaisseur elle-même variable, de submillimétrique à 10 – 15 centimètres. L'encroûtement présenté sur cette photo s'est développé sur un petit fragment de basalte altéré.



Figure 4 A & B :

Figure 4 A : Photographie prise par l'Epaulard d'un fond couvert d'encroûtements (site Niau). L'Epaulard est un engin autonome dont la hauteur au dessus du fond pour la prise de photo est maintenue constante par un « guide-rope » dont on voit l'ombre portée. Le sommet d'un guyot et de certains plateaux volcaniques sont pratiquement plats : les photos « en continu » prises par l'Epaulard montrent que les encroûtements couvrent des surfaces d'une manière continue.

Fig. 4 B : Photographie d'un échantillon d'encroûtement prélevé sur le sommet du plateau des Tuamotu (Site Niau).



Ainsi, en l'état actuel des connaissances et bien avant de parler de réserves, le qualificatif « ressources potentielles » n'est-il applicable qu'aux champs d'encroûtements localisés sur les sommets de plateaux ou de guyots tels que ceux décrits au cours de la campagne NODCO.

Encroûtements cobaltifères : quelle perspective ?

L'évolution du contexte international sur les matières premières et la nécessité d'en sécuriser l'accès conduisent naturellement un certain nombre de pays à porter un intérêt sur les ressources minérales sous-marines. Dans ce cadre, il est légitime de s'intéresser aux encroûtements cobaltifères, et de les comparer aux deux autres ressources minérales potentielles « grands fonds », les nodules et les amas sulfurés.

La connaissance acquise sur l'hydrothermalisme océanique et les amas sulfurés résulte de programmes scientifiques conduits en partenariat scientifique au plan international, dont des programmes européens⁵. Les amas sulfurés sous-marins sont aujourd'hui connus du milieu géosciences et d'une partie du grand public : des permis miniers ont été attribués dans les ZEE de certains pays et une première prospection à caractère industriel est conduite par la société Nautilus, Nautilus Minerals Inc. [*Nautilus*], dans le sud de la Papouasie Nouvelle Guinée.

Les nodules de manganèse sont connus de tous. En France, un programme important de prospection leur a été dédié au cours des années 1970 – 80 : la France s'est vue attribuer en 1987 un permis minier par l'Autorité Internationale des Fonds Marins, l'AIFM.

Les encroûtements cobaltifères sont inconnus du grand public. Considérant les ressources potentielles grands-fonds, la presse limite en général son propos aux nodules et aux amas sulfurés. Curieusement, alors que les encroûtements cobaltifères ont bénéficié et bénéficie aujourd'hui de l'intérêt de plusieurs pays, la France ne leur a accordé qu'une seule campagne, à la fois à caractère scientifique et d'évaluation. La raison tient-elle au contexte géologique plus complexe des zones à encroûtements que celui des zones à nodules ? On connaît aujourd'hui le contexte géologique de ces encroûtements et on dispose des moyens d'études appropriés : rien n'empêche de conduire un programme en partenariat Recherche / Industrie au même titre qu'un programme sur les amas sulfurés ou sur les nodules. On se propose d'examiner les atouts des encroûtements cobaltifères et une orientation possible de programme.

Les trois atouts principaux des Encroûtements Cobaltifères sont les suivants :

- La valeur en métal contenu [*Ifremer*, 2011] pourrait être la plus élevée des trois ressources minérales grands-fonds (Nodules, Amas sulfurés et Encroûtements Cobaltifères).
- A l'échelle océanique, la zone où les teneurs en cobalt sont maximales est la Zone Economique Exclusive (ZEE) de Polynésie française.
- Les gisements potentiels d'encroûtements sont des gisements « 2D », des dépôts couvrant une surface. Ce point, partagé avec les nodules, est important : la prospection, l'évaluation et l'exploitation d'un gisement « 2D » sont conceptuellement plus simples que celles qui prévalent pour un gisement « 3D ».

Une orientation de programme :

On n'entrera pas ici dans le détail de l'estimation de la surface minimum exploitable d'un champ d'encroûtements. Un comité de pilotage devrait précisément reprendre les données existantes et préciser ce paramètre. Si nécessaire, il devrait proposer l'acquisition de données pertinentes pour affiner cette estimation. Néanmoins, une surface de 100 km², en deçà des surfaces estimées à partir des résultats du programme NODCO, paraît raisonnable. Il convient d'ajouter, pour les encroûtements comme pour les nodules ou les amas sulfurés, que le potentiel minimum (tonnage) d'un site est beaucoup moins critique pour une ressource sous-marine que pour un gisement terrestre : l'ensemble du dispositif d'exploitation en mer est déplaçable.

⁵ InterRidge : programme international pour l'Etude des Dorsales Médio-océanique, instance de communication et de coordination entre les différents laboratoires. MARFLUX 1993-1996, puis AMORES 1996-1999 sont deux programmes européens initiés et conduits par l'Ifremer (étude de l'hydrothermalisme sur la dorsale médio-atlantique au sud-ouest des Açores).

Pour une Zone Economique Exclusive, la ZEE de Polynésie française, un programme peut proposer d'améliorer la connaissance de la répartition des encroûtements à l'échelle de la ZEE. Il existe des centaines de structures comparables à celles des sites étudiés au cours du programme NODCO : certaines d'entre elles peuvent présenter des caractéristiques plus favorables que d'autres, tant sur les plans morphologiques, des substrats que sur les concentrations en éléments valorisables. Il semble néanmoins préférable d'améliorer notre connaissance sur les caractéristiques physiques des dépôts, de leurs substrats, et de leur environnement immédiat à l'échelle d'un site :

- La microtopographie d'un champ d'encroûtements.
- La continuité des encroûtements.
- La cohésion encroûtement / substrat, qu'il s'agisse de carbonates (paléo-récifs coralliens) ou de cendres volcaniques.
- En fonction de la cohésion des substrats, une réflexion sur un plan technologique devrait imaginer le principe d'un procédé permettant de concasser / détacher ces encroûtements dans leur emplacement naturel et d'optimiser la collecte in situ des encroûtements concassés. On peut imaginer qu'une technique d'exploitation « 2D » dérivée de la technique « Scrawler » développée et utilisée par la De Beers Marine pour l'exploitation du diamant offshore [Corbett, 2002] soit une bonne base de réflexion.

Les quatre points listés ci-dessus sont quasiment sans objet pour les nodules de manganèse. Pourtant, si ces quatre points confirment les résultats préliminaires du programme NODCO pour les encroûtements cobaltifères, les deux types de gisements « 2D », nodules et encroûtements, se situeraient face à une problématique d'exploitation dans une situation sensiblement équivalente. Néanmoins, la valeur en métal contenu, la densité des concrétions sur le fond (masse par unité de surface) et la conception / gestion d'une ligne d'exploitation de 1000 à 1500 mètres de profondeur par rapport à 4000 à 6000 mètres pour les nodules laisseraient un avantage très appréciable pour les encroûtements.

Conclusion

L'histoire de l'exploitation du diamant offshore depuis 1962 par la De Beers Marine [Corbett, 2002], première exploitation d'une ressource minérale profonde⁶, illustre les difficultés et l'évolution considérable des méthodologies d'exploration et d'exploitation d'une ressource sous-marine. Il est ainsi difficile, si ce n'est illusoire, de vouloir classer « à priori » les trois ressources minérales « grands-fonds », Nodules, Encroûtements et Amas Sulfurés, suivant leurs plus ou moins grandes difficultés d'exploration ou d'exploitation. Néanmoins, la connaissance des propriétés de ces dépôts et de leur contexte géologique est un préalable incontournable à toute appréciation. De ce point de vue, la campagne NODCO de 1987, a produit des résultats essentiels à la connaissance des champs d'encroûtements et de leur environnement géologique. La réflexion pour une orientation de programme sur les Encroûtements Cobaltifères devrait largement reposer sur cet acquis.

La Zone Economique Exclusive (ZEE) de Polynésie française détient les encroûtements dont les concentrations en cobalt sont les plus élevées, le platine étant un élément valorisant. Ces dépôts représentent des atouts évidents par la nature physique des dépôts (répartis sur une surface : gisements « 2D »), leur localisation dans une ZEE et leur valeur en métal contenu. Peu ou moins connus que les nodules ou les amas sulfurés, cette ressource potentielle devrait justifier l'intérêt du milieu de la recherche, des compagnies minières, des sociétés de services et des pouvoirs publics. Bien qu'il soit envisageable d'améliorer l'inventaire de ces encroûtements à l'échelle de la Polynésie française (il existe des centaines de monts sous-marins ou de guyots potentiellement porteurs de ces dépôts) la priorité devrait porter sur l'amélioration des connaissances de l'environnement géologique local : microtopographie, continuité des dépôts, cohésion dépôt / substrat. Il s'agit là des paramètres clés pour apprécier cette ressource. Ce programme devrait comporter une composante biologique pour la connaissance des espèces vivant dans ce contexte spécifique des plateaux, monts sous-marins et guyots de la Polynésie française.

⁶ La De Beers Marine exploite le diamant sur le plateau continental namibien jusqu'à une profondeur de 200 mètres.

Références

- Bonneville, A., Dépôts à partir de l'eau de mer: croûtes cobaltifères et platinifères, *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 15, 67 - 73, 2002.
- Bonneville, A., and L. Sichoix, Topographie des fonds océaniques de la Polynésie française: synthèse et analyse, *Géologie de la France*, 3, 1998.
- Corbett, I., A case study in the development of the offshore diamond mining industry in Namibia, *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 15, 83 - 92, 2002.
- Ifremer, Les ressources minérales marines profondes : Synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030, pp. 36, Ifremer, 2011.
- Kosakevitch, A., Présence de sphérules cosmiques ferro-nickélifères à platinoïdes dans un encroûtement polymétallique sous-marin des Tuamotu (Polynésie française), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris (II)*, 305, 105-108, 1987.
- Le Suavé, R., Rapport Préliminaire de la Campagne NODCO 1, pp. 18, Ifremer, 1986.
- Le Suavé, R., G. Pautot, M. Hoffert, S. Monti, Y. Morel, and C. Pichocki, Cadre géologique des concrétions polymétalliques cobaltifères sous-marines dans l'Archipel des Tuamotu (Polynésie française), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris (II)*, 303 (11), 1013 - 1018, 1986.
- Le Suavé, R., Campagne NODCO 2 : N. O. Jean Charcot : 28 février au 24 mars 1987 Résultats préliminaires, pp. 53, Ifremer, 1987.
- Le Suavé, R., M. Hoffert, and G. Pautot, Variété des environnements géologiques et relations avec les dépôts ferromanganésifères de l'Océan Pacifique, *Oceanologica Acta*, 10, 269 - 279, 1990.
- Mero, J.L., Ocean-floor manganese nodules, *Economic Geology*, 57 (5), 747 - 767, 1962.
- Monti, S., and G. Pautot, Cartes bathymétriques au 1/1 000 000 de la Polynésie française (Tahiti, Taroha, Marquises, Hao, Mururoa), 1974.
- Murray, J., and A.F. Renard, Report on the deep sea deposits based on the specimens collected during the voyage of the H.M.S. Challenger in the years 1872 to 1876, pp. 525, London, 1891.
- Nautilus, Seafloor Gold and Copper Exploration, <http://www.nautilusminerals.com>.
- Pichocki, C., Les encroûtements ferromanganésifères enrichis en cobalt du Pacifique Sud: caractéristiques, genèse et signification géodynamique, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 1987.