

Variété des environnements géologiques et relations avec les dépôts ferromanganésifères de l'Océan Pacifique

Nodule polymétallique
Encroûtements cobaltifère
Sédimentologie
Morphologie
Océan pacifique

Polymetallic nodule
Cobalt-rich crust
Sedimentology
Morphology
Pacific Ocean

Raymond LE SUAVÉ^a, Michel HOFFERT^b, Guy PAUTOT^a

^a IFREMER – Département Géosciences Marines, B.P. 70, 29280 Plouzané

^b Laboratoire de Géodynamique Sédimentaire, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex

Reçu le 03/11/89, révisé le 31/05/90, accepté le 07/05/90.

RÉSUMÉ

Durant le Tour du Monde du N/O Jean Charcot, deux types de dépôts polymétalliques ont été étudiés : les dépôts riches en cobalt de l'archipel des Tuamotou (Polynésie Française), et les nodules de manganèse de la zone de fractures Clarion-Clipperton.

L'utilisation de moyens d'investigations performants comme le SAR (sonar latéral plus un sondeur 3,5 kHz à haute résolution) complété par une série d'observations *in situ* et d'échantillonnage à partir du submersible Nautile ont amené à une vision nouvelle de l'environnement géologique des dépôts ferromanganésifères.

Dans le Pacifique Sud, un modèle génétique de site à croûtes polymétalliques cobaltifères a été identifié, à savoir un atoll fossile subsident actuellement à 1 000 m de profondeur, construit sur un substratum volcanique, et sur lequel se sont déposées les concrétions polymétalliques. La situation actuelle d'un tel site est conditionnée par une topographie résultant d'une histoire géologique qui a débuté à l'Eocène et de processus de dynamique sédimentaire passés et actuels; ces facteurs déterminent la possibilité de formation des croûtes et leur maintien à l'affleurement.

Dans le Pacifique Nord, une campagne d'une durée de deux mois a été réalisée sur la base de données seabeam, photographies du fond, prélèvements de nodules et sédiments. L'utilisation du SAR a permis la caractérisation de trois types distincts d'environnements géologiques : un plateau sédimentaire, un secteur particulièrement représentatif de la province des collines abyssales et un environnement de «seamounts». Les données recueillies au cours de cette campagne ont été de première importance pour la définition des objectifs des plongées Nautile qui ont eu lieu en novembre et en décembre 1988.

Dans les zones étudiées, des réajustements tectoniques récents ont été identifiées, la plupart en relation avec les anciens accidents de socle, mais peut-être aussi avec les modifications cinématiques.

La dynamique sédimentaire joue un rôle essentiel dans la répartition des sédiments d'âge Plio-Pléistocène et dans la morphologie du fond. Les phénomènes de resédimentation et la formation de hiatus sont communs; des mouvements gravitaires ont été observés, ainsi que des paysages de type karstique résultant des effets d'une érosion récente ou actuelle.

Une modèle de relation entre la distribution des nodules et les sédiments Plio-Pléistocène est proposé et de nouvelles idées concernant la formation des nodules avancées.

De façon générale, on constate une évidente relation entre les dépôts polymétalliques et les caractéristiques de leur environnement géologique.

Oceanologica Acta, 1990. Volume spécial **10**, Actes du Colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, Paris. 269-279.

ABSTRACT

Diversity of geological environments and relation with Fe, Mn deposits from Pacific ocean.

During the world tour of R/V *Jean Charcot*, two types of polymetallic deposits have been investigated: the cobalt-rich crusts in the Tuamotu archipelago (French Polynesia) and the manganese nodules in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. The use of new performing tools of investigations like SAR (high resolution subbottom profiler working with a side looking sonar) completed by a series of in-situ observations and sampling carried out with the *Nautile*, have brought to a new sight of the geological environment of the ferromanganese deposits.

In the South Pacific Ocean, a genetic model of site bearing cobalt-rich crusts has been identified: the polymetallic deposits are located at a 1 000 m water depth on a subsident fossil atoll built on a volcanic substrate. The present location of the sites bearing crusts is conditioned by a general topography resulting of a geological history which started at Eocene and by a past and present sedimentary dynamics; these factors determine the possibility of crusts formation and their keeping at the outcrop.

In the North Pacific Ocean, a two months cruise has been conducted on the basis of pre-existing data (seabeam, bottom photographs, nodules and sediment sampling). The use of SAR, formerly built for the mapping of obstacles to mining systems, has brought to the characterization of three types of geological environment: a sedimentary plateau, an area particularly representative of the abyssal hills province and an area characterized by seamounts. The data collected during this cruise have been of first importance for the definition of the objectives of the *Nautile* dives which took place in november-december 1988.

In the surveyed areas, recent tectonic reajustements have been identified, almost related to old basement faults, but also possibly to kinematic changes.

The sedimentary dynamics is of first importance in the distribution of Plio-Pleistocene sediments and in the distribution of bottom morphology. Phenomena of resedimentation and formation of hiatuses are common; gravity mass-movements have been observed as well as karstic-type landscapes due to the effects of recent or present erosion.

A model of relationship between the nodules distribution and Plio-Pleistocene sediments is proposed and new ideas concerning the formation of nodules are exposed.

From a general point of view, there is a strong evident of existing relationship between polymetallic deposits and the characteristics of the geological environment.

Oceanologica Acta, 1990. Volume Spécial **10**, Actes du Colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, Paris. 269-279.

INTRODUCTION

Dans le cadre des campagnes «Tour du Monde du Jean Charcot», deux séries de chantiers, aux objectifs bien distincts, ont été consacrées à l'étude des dépôts polymétalliques (fig. 1).

Dans le *Pacifique Nord-oriental*, les missions Nixo 46 et 47 avaient, entre autres, pour objectif de préciser la localisation et le mode de genèse des nodules de manganèse en fonction de leur environnement géologique. Ces missions prolongeaient les campagnes préalables de reconnaissance, de prospection et de répartition des nodules

polymétalliques entre les zones de fractures de Clarion et de Clipperton; elles étaient destinées également à la préparation de la mission de plongées en submersible, *Nixonaut*, qui a eu lieu en novembre et décembre 1988.

Dans le *Pacifique Sud*, les missions Nodco 1 et 2 avaient pour but la caractérisation géologique des sites à encroûtements cobaltifères de l'archipel des Tuamotu en Polynésie Française. C'est ce deuxième chantier qui sera présenté d'abord. Après avoir établi la signification géologique ainsi que les caractères communs entre les modules et les encroûtements, on tentera de préciser l'apport de ce type de recherche à la connaissance de la géologie des grands fonds océaniques.

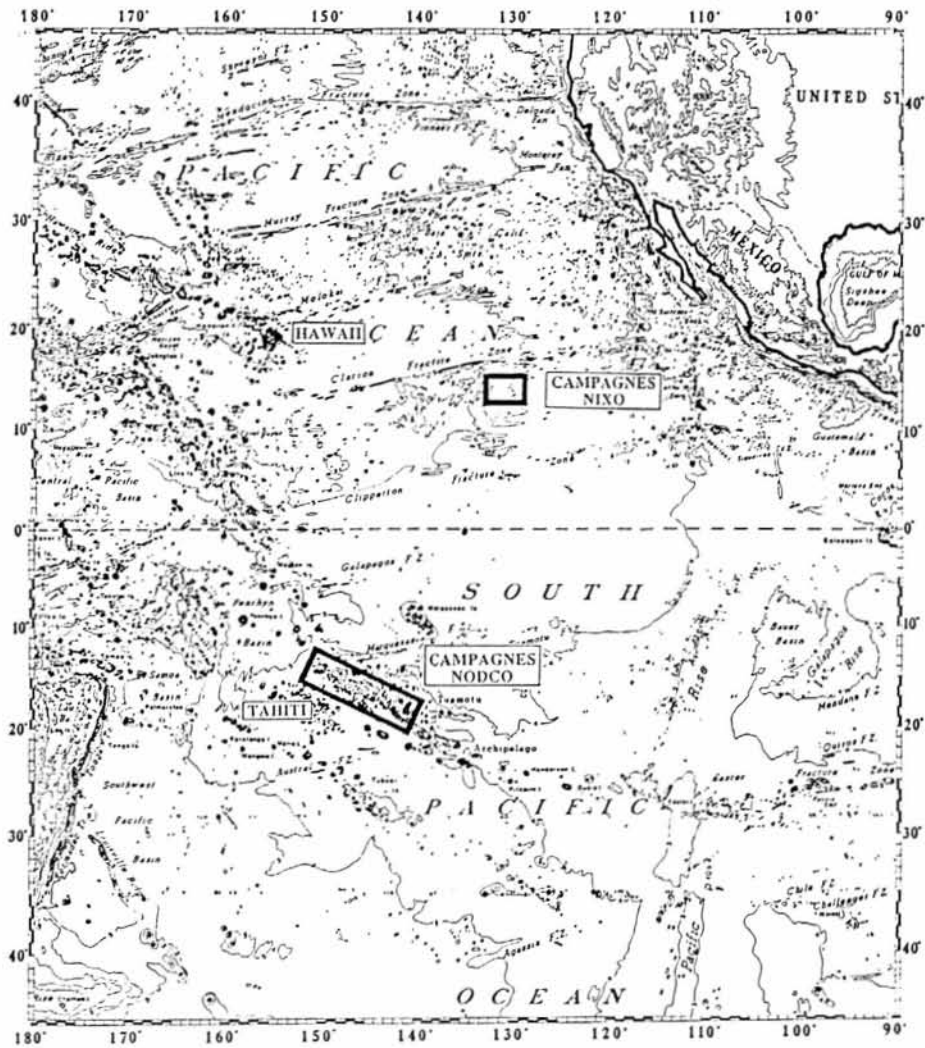


Figure 1

Les deux chantiers d'étude des dépôts polymétalliques dans l'océan pacifique : le domaine intraplaque profond du Pacifique Nord (campagnes Nixo) et l'archipel des Tuamotou (campagnes Nodco).
 The two studied areas of polymetallic deposits in the Pacific ocean : Deep intra-plate domain in the North Pacific (Nixo cruises) and the Tuamotou archipelago (Nodco cruises).

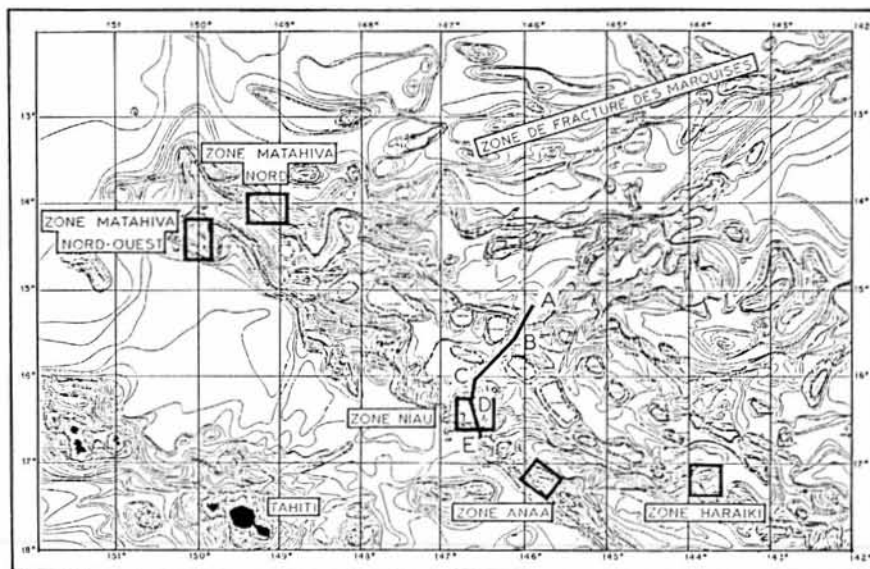


Figure 2

Les dépôts cobaltifères de l'archipel des Tuamotou : localisation des zones d'étude et de la coupe sismique de la Fig. 6 (isobathes tous les 100 m).
 The cobalt-rich deposits of the Tuamotou archipelago : location of the studied areas and of the seismic profile of Fig. 6 (100-m isobaths).

LES ENCROÛTEMENTS COBALTIFÈRES EN POLYNÉSIE FRANÇAISE

Depuis 1980, un type particulier de minéralisation océanique a connu un regain d'intérêt économique et scientifique. Il s'agit des encroûtements cobaltifères ainsi nommés à cause de leur concentration en Co pouvant atteindre une teneur de 1 %. Des équipes de recherches allemandes et américaines étudient ces encroûtements dans le Pacifique Nord et plus particulièrement dans les ensembles Hawaii – Iles de la Ligne. A partir des données disponibles (cf. synthèse dans Pichocki C., 1987), une tentative de répartition mondiale des dépôts cobaltifères a pu être proposée et quelques grands traits sur leur localisation et leur mode de genèse, dégagés. Les encroûtements cobaltifères sont associés aux élévations sous-marines intraplaque, «seamounts» isolés ou alignements volcaniques; ils caractérisent des zones dépourvues d'apports sédimentaires durant des périodes pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de M.a.; les encroûtements les plus riches semblent situés dans un intervalle bathymétrique situé approximativement entre 800 et 1 600 m.

En Polynésie Française la présence de nodules riches en Co est connue dès 1965 par quelques prélèvements effectués par Mero; d'après des indications ponctuelles, la mission du CNEXO, Nixo 01 en 1970, permet l'échantillonnage des premiers encroûtements cobaltifères dans cette partie du Pacifique. A partir des concrétions ainsi obtenues, des travaux concernant la minéralogie, la composition chimique ainsi que la vitesse de croissance ont été effectués (Ranchin, 1972; Lalou et Brichet, 1971, 1972; Lalou *et al.*, 1973; Janin, 1981, 1985, 1986; Pichocki, 1984; Pichocki et Hoffert, 1987). Cependant les cadres bathymétriques, structuraux, sédimentologiques, hydrologiques étaient très mal connus et ne permettaient pas de replacer les connaissances acquises sur les échantillons en fonction de leur environnement géologique. Les connaissances bathymétriques sont synthétisées par la carte au 1/1 000 000 de Monti et Pautot (1974) et les reconnaissances géologiques de détail se limitent à quelques sites étudiés durant les missions Transpac I et II en 1972 (Pautot et Hoffert, 1974; Hoffert, 1980), les missions Copano I et II en 1979 (Andrews *et al.*, 1984; Pautot et Hoffert, 1974) ainsi que par quelques forages du Glomar Challenger (Leg XXXIII).

Le but des missions Nodco a été successivement d'établir le cadre géologique d'un site en précisant son environnement bathymétrique, morphologique, structural et sédimentaire; puis, en utilisant les données ainsi acquises, de les tester en fonction des connaissances topographiques générales de l'archipel des Tuamotou.

La **mission Nodco 1 (1986)**, relativement courte, puisqu'elle a consisté en une dizaine de jours sur zone, a été consacrée à l'étude du site de Niau (fig. 2) déjà échantillonné durant la mission Nixo 01. La cartographie de détail est établie à l'aide du sondeur multifaisceaux Seabeam; le cadre structural et sédimentaire est défini à l'aide des

profils de sondeur à sédiment (3,5 kHz); l'image acoustique du fond fournie par le sonar latéral (SAR) précise la micro-topographie; enfin, un trait photographique fait à l'aide de l'engin libre Epaulard et des dragages permettent d'observer la répartition des différentes phases sédimentaires, la dynamique sédimentaire actuelle et de prélever des échantillons parfaitement situés dans le contexte géologique.

La **mission Nodco 2 (1987)**, d'une durée d'une vingtaine de jours sur zone, a consisté à étendre les résultats obtenus sur le site de Niau et ce, en se focalisant sur les élévations topographiques dégagées de tout apport sédimentaire. A priori, le choix des sites a été fait selon des environnements géologiques caractéristiques :

- *L'environnement de type «seamount» intraplaque*, proche des modèles étudiés par les chercheurs américains et allemands dans les zones Hawaii et Iles de la Ligne. La terminaison Nord-Ouest de l'archipel des Tuamotou correspond bien à ce type d'environnement, d'autant plus que l'absence d'atolls émergés préserve, à priori, ces zones des apports sédimentaires biogéniques détritiques. Les zones de Matahiva Nord et de Matahiva Nord-Ouest (fig. 2) ont été étudiées dans cette optique.

- *L'environnement de type «plateaux»* et plus précisément leur bordure, correspond au site de Niau. Pour tester l'extension vers le Sud-Est des sites de type Niau, les zones d'Anaa et Haraiki (fig. 2) ont fait l'objet d'investigations. Durant la campagne Nodco 2, un levé sismique réflexion a été réalisé afin de préciser la structure de l'archipel des Tuamotou. Pour pouvoir corréler les données de stratigraphie sismique ainsi établies avec les données préexistantes issues des forages du Glomar Challenger, ce levé sismique a été fait de manière à passer sur l'emplacement du site 318 du DSDP Ce travail de corrélation est en voie d'achèvement.

Les données issues des deux campagnes Nodco sont encore partiellement à l'étude. Les résultats déjà acquis ont fait l'objet de publications. Il s'agit en particulier de Le Suavé *et al.*, (1986, 1989); de Pichocki (1987); de Kosakevitch (1988); Amossé et Le Suavé (ce volume). Il est donc possible, dès à présent, de dégager quelques résultats majeurs.

Les caractéristiques du site de Niau

La zone Niau correspond à un cadre morphologique singulier. Il s'agit d'un atoll fossile d'âge Eocène moyen sur substrat volcanique, situé actuellement à une profondeur d'environ 1 000 m. Cet atoll est localisé en bordure d'une limite tectonique importante marquant le flanc Sud de l'archipel des Tuamotou et caractérisé par une subsidence importante.

Le site de Niau forme une structure en demi-cercle de 20 km de diamètre, sur la bordure Sud de l'archipel. L'allure générale du plateau évoque un complexe de barrière récifale délimitant un lagon (atoll). Cette hypothèse a été vérifiée grâce aux fragments de corail dragués sur le bourrelet topographique, et les encroûtements ferromanganésifères

prélevés en bordure du plateau ont un cœur calcaire biogénique caractéristique d'un milieu peu profond.

Les encroûtements cobaltifères sont situés dans une zone précise de la topographie de ce paléootoll. Le faciès d'encroûtement à surface dite en «lobes arrondis» est caractéristique de la partie interne de l'anneau corallien, alors que les plaques et les nodules polymétalliques sont localisés dans l'ancien lagon. Cela a été montré par les photographies prises à l'aide de l'engin libre Epaulard, puis étendu à l'ensemble de l'atoll grâce à la sismique 3,5 kHz qui a permis d'établir une cartographie du substratum réverbérant des encroûtements (fig. 3). Grâce à l'image acoustique du fond, obtenue à l'aide du SAR, l'extension horizontale des différents faciès a pu être précisée; de plus, l'importance de la dynamique sédimentaire actuelle, en particulier le rôle de la circulation des masses d'eaux profondes, est établie par la mise en évidence de rides et de placages sédimentaires qui enregistrent le transit sédimentaire actuel sur le platier.

Les études pétrologiques et géochimiques ont montré que les encroûtements ferromanganésifères constituent des séries sédimentaires condensées qui enregistrent simultanément les événements climatiques et géodynamiques d'échelle régionale et globale (Pichocki, 1987). Les études pétrologiques et texturales du noyau sédimentaire et du cortex Fe-Mn des encroûtements de la zone de Niau (fig. 4) retracent l'histoire géologique de l'atoll fossile (fig. 5). Le revêtement Fe-Mn présente une zonation chimique et minéralogique discontinue du centre vers la périphérie. Les plus fortes concentrations en Co se trouvent dans les couches externes. L'enrichissement en Co est inversement lié à la vitesse de dépôt des sédiments de la zone de formation des encroûtements. La concentration en Co, issu de l'eau de mer, reflète donc les conditions régionales particulières parmi lesquelles la profondeur d'eau (qui doit se situer entre 800 et 1 600 m, c'est-à-dire la tranche bathymétrique correspondant à la couche à minimum d'oxygène dissous) et les courants océaniques profonds qui jouent un rôle primordial.

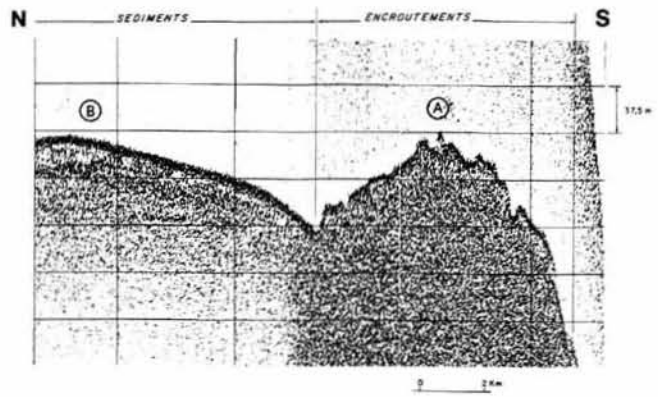


Figure 3

Profil réalisé avec un sondeur de sédiments 3,5 kHz sur le haut fond de Niau (segment D-E de la fig. 2). Les deux faciès acoustiques A et B correspondent respectivement à des encroûtements et des sédiments. Profiles recorded with a 3.5 kHz penetrator on the Niau plateau (segments D-E of Fig. 2). The two acoustic facies correspond respectively to crusts and sediments.

Si l'origine des dépôts polymétalliques des Tuamotou est en quasi-totalité hydrogénétiq ue, les indices d'une influence hydrothermale locale ne doivent pas être écartés (Kosakevitch, 1988). De plus, la géochimie de ces concentrations est caractérisée par des enrichissements en platinoïdes qui montrent l'influence possible d'apports externes comme les micro-météorites dont le profil géochimique, riche en platinoïdes, laisse entrevoir la possibilité de recyclage, dans un milieu chloruré comme l'eau de mer, de leurs constituants chimiques élémentaires (Amossé, 1988; Amossé et Le Suavé, cf. infra).

Structure de l'archipel des Tuamotou

La réalisation de coupes sismiques Nord-Sud recoupant l'ensemble de l'archipel des Tuamotou fournit des données nouvelles sur le mode de genèse et l'évolution de

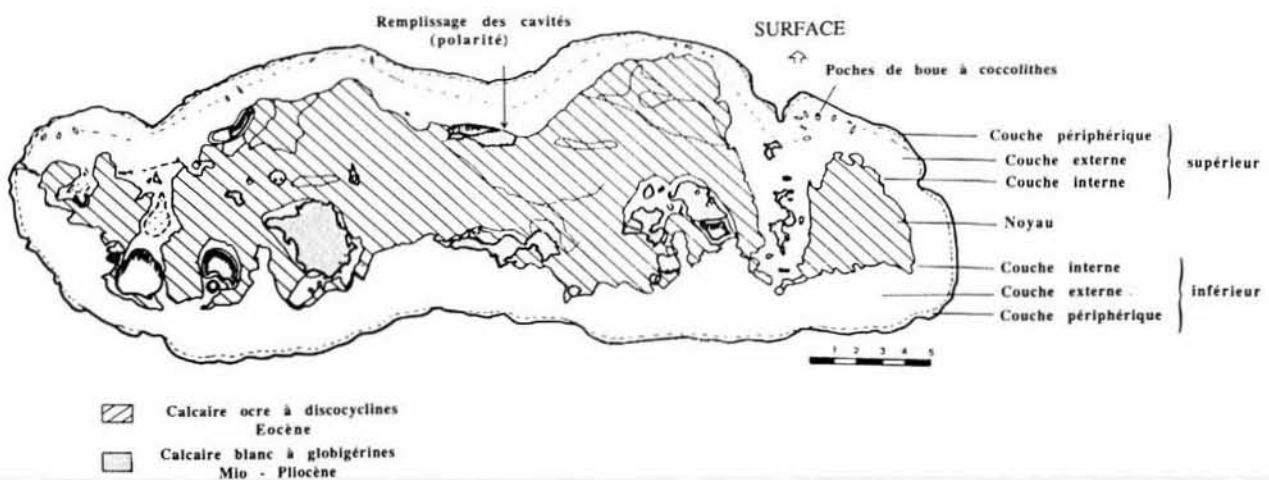


Figure 4

Coupe transversale schématique de l'échantillon DR 3-1 (zone de Niau). D'après Pichocki (1987).

Transversal schematic section of DR 3-1 sample (Niau zone) from Pichocki (1987).

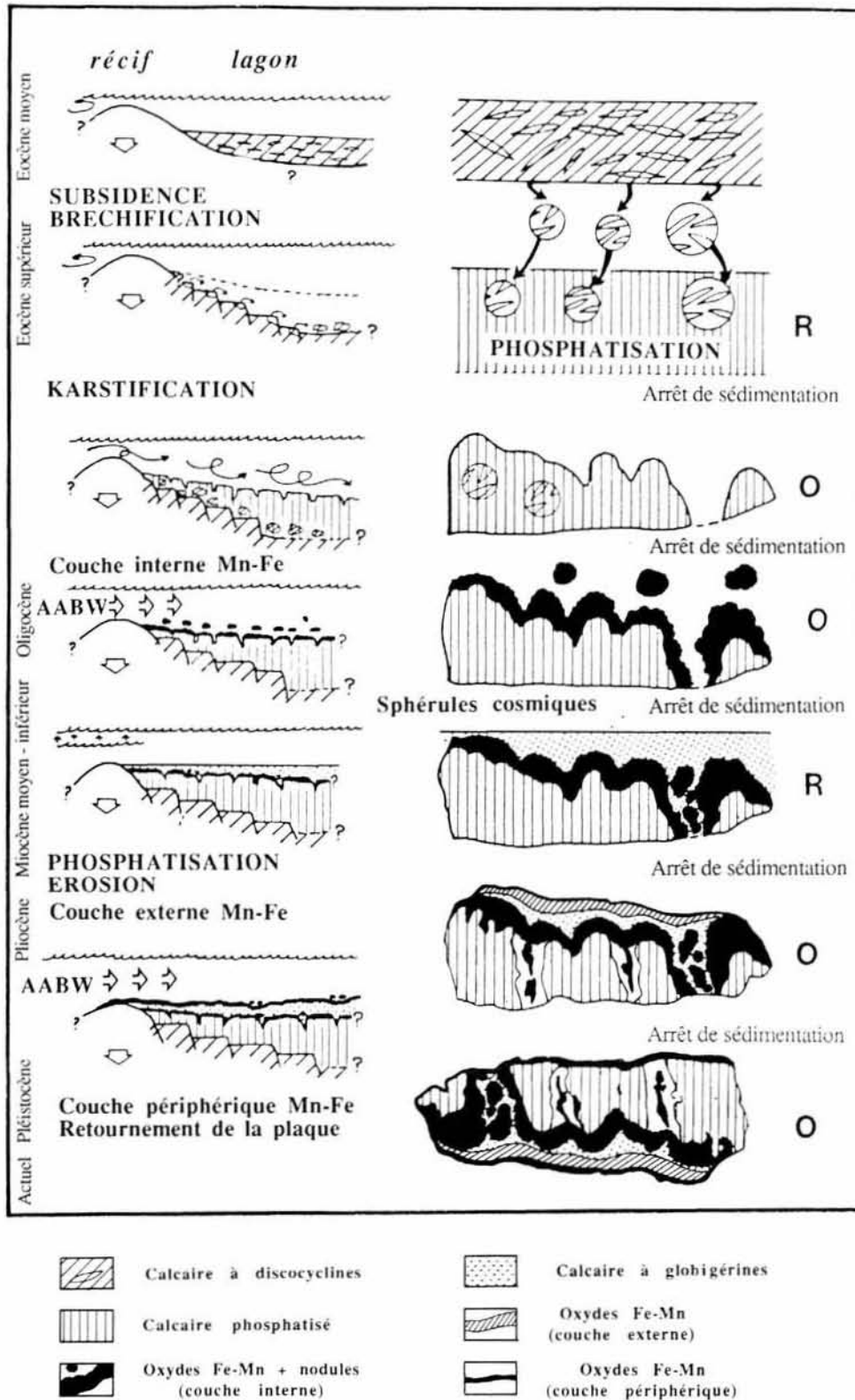


Figure 5

Histoire géologique des encroûtements cobaltifères de l'archipel des Tuamotou : évolution du milieu avec changements des conditions d'oxydo-réduction. "O" : milieu oxydant; "R" : milieu réducteur; AABW : Antarctic Bottom Water. D'après Pichocki (1987), modifié

Geological history of the cobalt-rich crusts of the Tuamotou archipelago : evolution of the milieu with changes of oxido-reduction conditions
 O : oxidizing milieu
 R : reducing milieu
 AABW : Antarctic Bottom Water
 from Pichocki (1987), modified.

cette structure océanique particulière. Une coupe sismique faite dans la partie centrale de l'archipel, au niveau du site à encroûtements cobaltifères de Niau, est présentée à titre d'exemple (fig. 2 et 6) et permet de dégager quelques points.

La structure transversale de l'archipel est dissymétrique. Un grand abrupt tectonique séparant un domaine haut (1 000 m) de la plaine abyssale adjacente marque la limite Sud-Ouest. A l'opposé, la limite Nord-Est correspond à une pente beaucoup moins accentuée par suite de la succession de nombreux petits gradins dont le rejeu est enregistré par d'abondants mouvements gravitaires dans les séries sédimentaires. La partie centrale de l'archipel est caractérisée par l'existence de plusieurs bassins dont le remplissage peu dépasser 600 m et dont la géométrie traduit une histoire complexe. Ces bassins sont séparés par des axes volcaniques. La corrélation de ces données sismiques avec les données biostratigraphiques et lithostratigraphiques des forages DSDP permettra de mieux établir une chronologie de ces phénomènes sédimentaires et volcaniques ainsi que des phénomènes de basculements de blocs déjà établis durant les missions Transpac (Pautot et Hoffert, 1974). Dès à présent, l'identification de deux discordances majeures à l'Oligocène moyen et au Miocène moyen, retrouvées dans la plupart des bassins sédimentaires reconnus durant la campagne, pose avec un éclairage nouveau, le problème de l'origine de l'archipel («hot-spot» ou dorsale avortée), et de la chronologie comparée des dépôts de l'époque d'édification du substratum volcanique.

La terminaison Nord-Ouest de l'archipel des Tuamotou, sans atolls émergés, a été étudiée sur les sites de Matahiva Nord et de Matahiva Nord-Ouest; elle correspond à un ensemble de hauts topographiques constitués par des massifs volcaniques préservés des apports sédimentaires d'origine périrécifale. Ces deux sites se placent à la jonction entre l'archipel des Tuamotou et la zone de fractures des Marquises. Sur la base des données du seabeam et de la

sismique réflexion, une carte bathymétrique et structurale, interprétative, vient d'être proposée (Le Suavé et Pautot, 1988). La mise en place des massifs volcaniques s'est opérée sous le contrôle de deux directions principales : N80°E et N150°E. Dans l'hypothèse de la formation de l'archipel à partir d'un ou plusieurs hot-spots, la direction N150°E serait celle selon laquelle le magmatisme initial se serait manifesté.

A l'extrémité Sud de l'archipel des Tuamotou, le site de Haraiki, qui correspond à un haut relatif, a été étudié afin de pouvoir prolonger les données acquises précédemment sur le flanc Sud du site de Niau.

Conclusion

La localisation des encroûtements ferromanganésifères riches en Co est conditionnée par plusieurs facteurs d'échelle régionale ou globale. L'histoire géodynamique et l'évolution structurale déterminent les sites morphologiques propices à la formation des encroûtements à la fois par le contrôle bathymétrique, l'intensité et la modification des circulations des masses d'eaux océaniques. Ce contrôle s'opère au niveau d'une véritable province géochimique cobaltifère englobant l'archipel des Tuamotou.

L'existence, pendant une durée géologiquement longue, d'un substrat induré situé dans une tranche bathymétrique proche de 1 000 m de profondeur, combinée à l'absence de sédimentation, résultant de l'action de courants océaniques, permet le développement des encroûtements ferromanganésifères riches en Co dont les variations de composition au cours du temps correspondent aux variations locales et globales.

Les encroûtements sont donc des séries géochimiques qui enregistrent une histoire géologique, un cadre géodynamique et les variations de ce milieu. Ils constituent de véritables mémoires géodynamiques de leur lieu de formation.

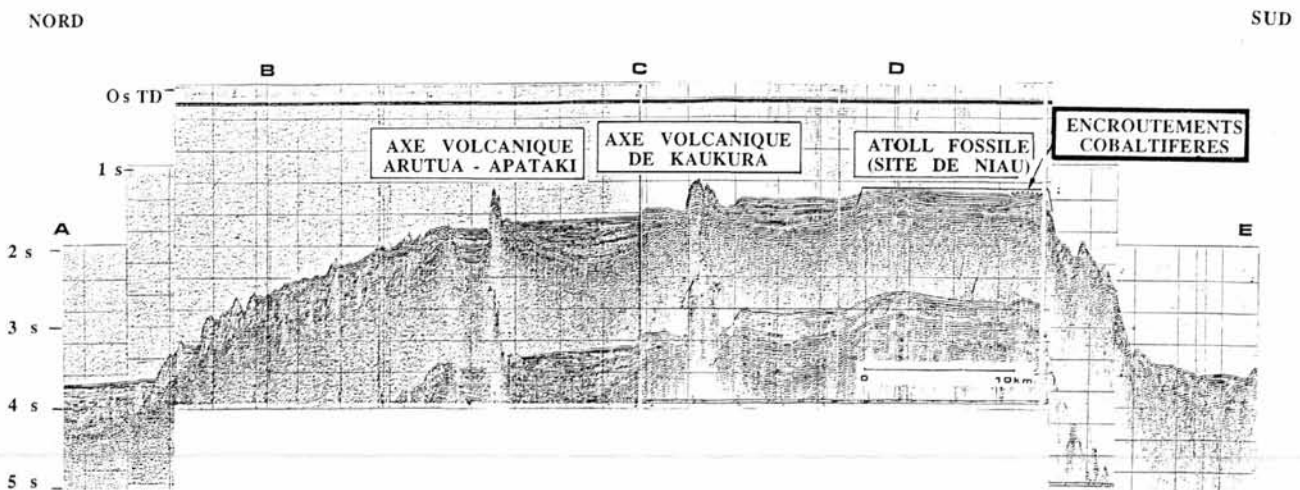


Figure 6

Archipel des Tuamotou : partie centrale; coupe sismique transversale.
Tuamotou archipelago : central part; transversal seismic profile.

Le mode de formation précis des encroûtements est encore mal identifié. Si la précipitation lente des éléments à partir de l'eau de mer est le mécanisme de formation majeur, l'origine de certains éléments et surtout leur comportement géochimique (cobalt et platinoïdes) reste mal connu. De même, le mode de genèse de nombreux nodules cobaltifères, associés aux encroûtements reste à expliquer.

Les missions Nodco ont permis, par l'étude détaillée de sites, de faire progresser les connaissances sur les encroûtements cobaltifères en intégrant plusieurs paramètres de l'environnement des concrétions.

L'investigation d'autres sites du domaine intraplaque doit permettre, sur la base d'études comparatives, d'aborder le problème plus général de la variation de la composition chimique des dépôts polymétalliques, non seulement sous l'angle d'une zonéographie latitudinale, mais également verticale, et toucher ainsi au problème des relations pouvant exister entre les dépôts cobaltifères des rides volcaniques et les nodules des bassins profonds adjacents.

LES NODULES POLYMÉTALLIQUES DANS LE PACIFIQUE NORD (ZONE CLARION-CLIPERTON)

Le domaine océanique profond situé entre les zones de fractures de Clarion et de Clipperton a fait l'objet d'études intensives en vue de l'exploration des zones à nodules polymétalliques et d'une meilleure connaissance de leur mode de genèse. De nombreuses études récentes (Bischoff et Piper, 1979; von Stackelberg et Beiersdorf, 1987; Halbach, 1987; Halbach *et al.*, 1988) ont montré la nécessité d'une analyse de détail dans des zones d'échelle kilométrique afin de mieux cerner les relations entre les nodules et leur environnement géologique. C'est à la suite de la campagne Nixco 45 que, sur la base de données obtenues à partir de moyens classiques (seabeam, sondeur de sédiments basse fréquence, carottages, photographies du fond) l'on a abouti à l'élaboration d'une «carte géologique à 1/20.000^{ème}» (Du Castel, 1985) et la reconnaissance de l'importance du contrôle morphologique de détail sur la distribution des masses sédimentaires et des nodules polymétalliques.

En 1986, la campagne Nixco 46-47 voit la mise en œuvre du SAR, système acoustique remorqué construit au départ pour la cartographie des obstacles au ramassage des nodules; utilisé depuis par la communauté scientifique, ce nouvel équipement comportant un ensemble haute résolution (sonar latéral et sondeur de sédiment basse fréquence) s'est révélé un remarquable outil de cartographie géologique. Sur la base des données seabeam collectées en 1980, trois chantiers principaux couvrant chacun approximativement 200 km² ont été mis en place de façon à caractériser trois types d'environnement morphostructural différents: un domaine de plateau sédimentaire (correspondant à la zone déjà reconnue de façon préliminaire durant la campagne Nixco 45), un domaine considéré

comme représentatif des collines abyssales, ainsi qu'une zone comportant plusieurs «seamounts», choisie afin de tester l'influence de l'environnement volcanique sur la distribution des nodules et leur genèse.

Ces trois types d'environnement morphostructuraux sont présentés (fig. 7) au moyen de coupes sondeur de sédiment obtenues à partir du SAR.

Caractéristiques morphologiques majeures

Elles sont, pour l'ensemble du secteur considéré, issues de l'interaction d'une morphologie de socle acquise à l'axe d'accrétion (âge de la croûte océanique, environ 35 M.a.), et d'une couverture dont le dépôt est contrôlée par les sources d'apport et la dynamique sédimentaire.

La morphologie de socle. La topographie sous-marine est relativement bien connue depuis les campagnes de reconnaissance bathymétrique menées avec le seabeam au début des années 80: il s'agit d'un relief constitué d'une succession de collines allongées en Nord-Sud parallèles les unes aux autres, le plus souvent sur plusieurs dizaines de kilomètres; la longueur d'onde moyenne est d'ordre kilométrique avec une amplitude de l'ordre de la centaine de mètres (Morel et Le Suavé, 1986). A cette organisation de premier ordre de grandeur, se surimpose une organisation de même orientation, en blocs inclinés vers l'Ouest et limités à l'Est par des failles normales; c'est à la limite de ces blocs, dont l'extension en est-ouest peut atteindre la dizaine de kilomètres, que les manifestations de réajustements tectoniques tardifs sont visibles (Le Suavé, en prép.).

L'importance des phénomènes tectoniques récents, voir actuels en domaine intraplaque reste toutefois à préciser et à intégrer dans le modèle de subsidence thermique actuellement en vigueur.

A cette morphologie de socle se surimposent les effets combinés de la sédimentation, laquelle a débuté à l'Oligocène, et d'une dynamique sédimentaire dont on sait aujourd'hui qu'elle joue un rôle important dans le modelé de détail des bassins profonds. Ainsi, si la stratigraphie sismique du secteur intraplaque considéré est identifiée dans ses grands traits depuis une dizaine d'années (Piper *et al.*, 1979), ce n'est que grâce à l'utilisation de moyens d'investigation de haute résolution du type SAR que la complexité dans le mode de dépôt a pu être révélée.

A la suite des travaux de Van Andel *et al.* (1975) ainsi que Cook (1975) et Le Suavé *et al.* (1987), on distingue trois unités acoustiques (fig. 7):

- L'unité 1 (supérieure), encore appelée «série transparente» en raison de son faciès particulier, est constituée d'argiles pélagiques et comporte une fraction résiduelle d'organismes siliceux; son épaisseur peut atteindre 60 m. La base de cette série est datée du Miocène inférieur au Miocène moyen.
- L'unité 2 (ou «série cyclique», est caractérisée par de nombreux réflecteurs internes, interprétée comme corres-

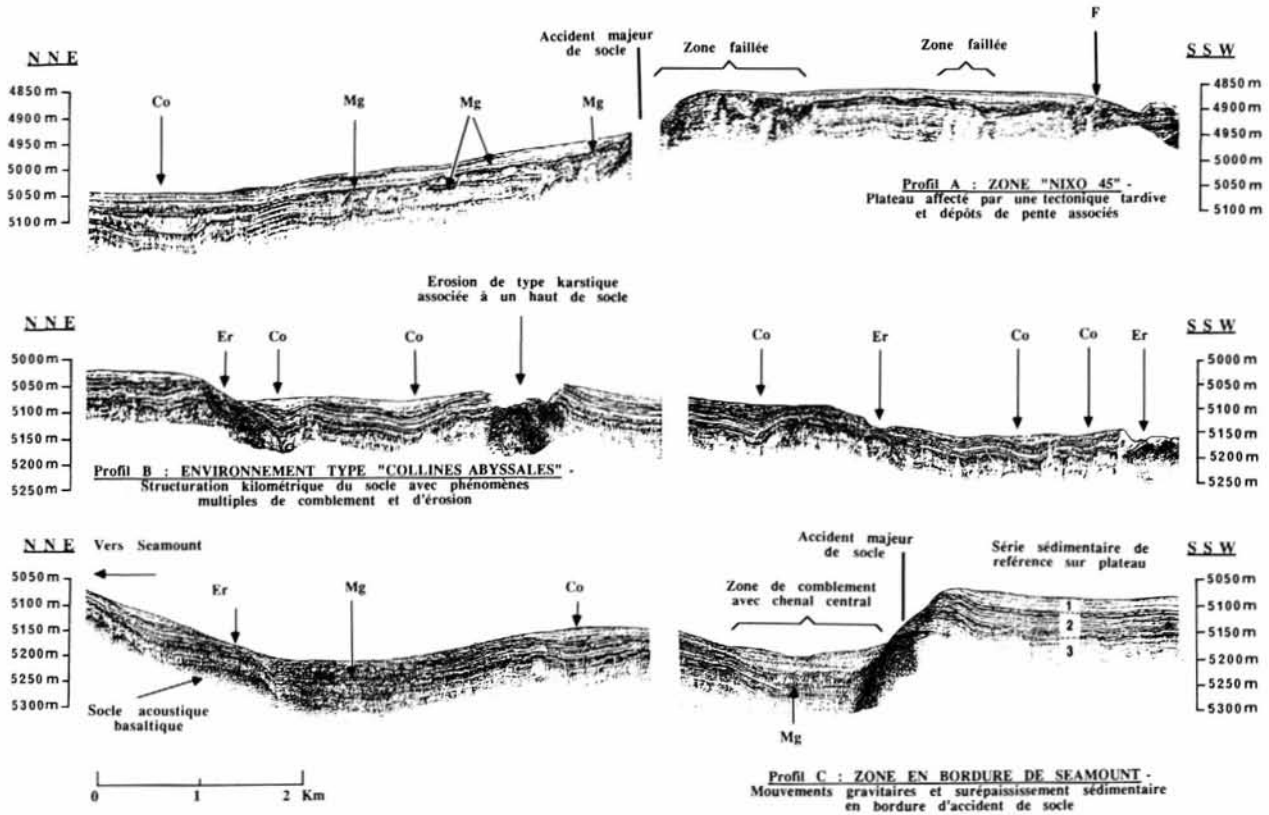


Figure 7

Profils 3,5 kHz obtenus à partir du SAR sur la zone à nodules du NE Pacifique.

Exagération verticale : 5 fois – "ER" : Erosion; "Co" : Comblement;

"Mg" : Mouvements gravitaires; 1, 2, 3 : unités acoustiques.

3.5 kHz profiles obtained from SAR in the nodule area in the N.E. Pacific Vertical exaggeration : 5 times

Er : Erosion

Co : Filling up

Mg : gravity mass movements

1, 2, 3 : acoustic units

pondant à une alternance de niveaux biogènes carbonatés et siliceux résultant des variations de l'équilibre entre production primaire et dissolution des dépôts carbonatés; l'épaisseur de l'unité varie de 30 à 50 m. Sa base est datée de la fin de l'Oligocène au début du Miocène.

- L'unité 3 (ou «série des Marquises»), correspond à un faciès acoustique relativement homogène; elle est constituée de dépôts carbonatés dont la base, datée de l'Oligocène, repose sur le socle basaltique.

Deux modes de sédimentation principaux caractérisent cette couverture sédimentaire : – jusqu'au sommet de l'unité 2, il s'agit d'un drapage sur le socle résultant essentiellement d'une sédimentation verticale; le toit de ce premier ensemble a été affecté par une importante érosion, résultant de la circulation des eaux antarctiques. C'est sur cette surface de discontinuité ou hiatus que s'est déposée la série transparente. – Cette dernière unité est marquée par d'importantes variations d'épaisseur, depuis la simple lacune jusqu'à la soixantaine de mètres. Les argiles pélagiques à organismes siliceux sont en fait déposés dans pratiquement toutes les dépressions du paléorelief et agissent donc comme agent de comblement («ponding sediments») (fig. 7). Ce type de dépôt est essentiellement

contrôlé par les apports latéraux en liaison avec les courants de fond. localement, le comblement peut être important; particulièrement en contrebas des principaux accidents (fig. 7, profil C) et être marqué par un phénomène chenalissant (Le Suavé et al., 1987).

La dynamique sédimentaire joue un rôle important : – Ce sont d'abord des mouvements gravitaires interstratifiés dans l'unité 2; ils sont caractérisés par une quasi-transparence acoustique résultant de la désorganisation des strates; leur importance est variable en fonction du contexte topographique local (axes bas, pentes); ils peuvent parfois être corrélés latéralement à une possible cause de déclenchement que constitue la tectonique tardive : une telle relation est envisagée entre la zone faillée du profil A (fig. 7) et les mouvements gravitaires identifiés en contrebas. – Ce sont également les effets de l'érosion qui opère le long des falaises, lesquelles sont en relation avec les discontinuités majeures du socle et qui amène à l'écroulement de pans entiers de falaise; le faciès 3,5 kHz qui en découle est également caractéristique.

Les observations réalisées au cours de la campagne Nixo 46-47 ont servi de base à la définition des objectifs

de la campagne de plongées Nixonaut menée en novembre 1988 avec le Nautil; cette campagne de «géologie de terrain» dans les grands fonds a permis de confronter les techniques d'observation indirecte, comme le sonar et le sondeur 3,5 kHz, avec la vision directe des champs de nodules et de leur environnement géologique, de valider un certain nombre d'hypothèses et d'apporter des réponses quant à l'origine de certaines formes particulières de morphologie et de faciès acoustiques problématiques décelés par le sonar latéral.

Les idées actuelles

L'importance des phénomènes d'érosion et de resédimentation est capitale. L'érosion de tous les termes carbonatés de la série sédimentaire, facilitée par la nature même des eaux de fond, peut aboutir localement à un paysage de type karstique; en dehors des écoulements gravitaires, s'inscrit un phénomène d'altération des carbonates et de libération d'argiles résiduelles dont l'importance dans un bilan géochimique de l'environnement des nodules doit être considérée.

Le hiatus précédant le dépôt de la série transparente correspond à un niveau d'argiles indurées ayant subi une imprégnation ferromanganésifère (Cochonat *et al.*, 1989). Il est interprété comme le niveau stratigraphique à partir duquel le processus de formation des nodules de manganèse a été initié; notons, par ailleurs, que l'observation directe des falaises ne montre aucun niveau à nodules interstratifiés avant cette épisode érosif. Par ailleurs, la distribution des champs de nodules confrontée avec les profils 3,5 kHz a permis de dégager une relation directe entre la série transparente Plio-Quaternaire et l'abondance des concrétions; il est donc évident dès à présent que la genèse des nodules est liée à l'histoire de ce dernier environnement sédimentaire. Il s'agit d'en préciser les mécanismes de détail (diagenèse, pédogenèse) et les vitesses; des travaux en cours comme ceux de J.L. Reyss sur les vitesses d'ac-

cumulation des sédiments et celles de la croissance des nodules ou ceux de E. Lallier-Vergès (1983) sur le rôle de la matière organique permettront, intégrées aux données de la géologie de terrain, une meilleure connaissance de ces mécanismes.

CONCLUSION

Les travaux sur les concrétions polymétalliques, encroûtements cobaltifères et nodules de manganèse doivent être basés sur une cartographie haute résolution, possible grâce au seabeam et à des techniques nouvelles telles que le sonar latéral et la sismique haute résolution. Ce n'est que grâce à des données qu'il est possible d'appréhender les phénomènes de micro-topographie ainsi que les phénomènes sédimentaires qui déterminent le mode de genèse et la localisation actuelle des concrétions.

Seuls des travaux pluridisciplinaires associant des disciplines comme la géologie structurale, la sédimentologie, la géomorphologie, la stratigraphie haute résolution, la géochimie, l'analyse texturale, les propriétés mécaniques, ou encore la biologie abyssale, auxquelles il faut rajouter la «géologie de terrain», c'est-à-dire l'indispensable observation en submersible, permettent de progresser dans la compréhension de détail des mécanismes de formation de ces séries condensées que sont les encroûtement polymétalliques. Dès lors, il n'est pas possible de dissocier recherche appliquée et recherche fondamentale qui, toutes deux, ont pour but de comprendre un phénomène et d'élaborer des modèles quantitatifs.

A partir des données acquises durant les missions effectuées dans le cadre du Tour du Monde du «Jean Charcot» il se dégage la certitude de relation génétique entre la complexité de composition et de structure des concrétions polymétalliques d'une part et l'histoire géologique de leur environnement d'autre part.

RÉFÉRENCES

Amossé J. (1968). Étude de la répartition des platinoïdes dans les nodules et encroûtements cobaltifères du plateau des Tuamotu (Campagne NODCO 2). Rapport du contrat IFREMER 87/2/248, non publié.
 Amossé J., R. Le Suavé (1990). Geochemical investigation of Pb, Rh, Ru and Au in cobalt rich deposits from the Tuamotu plateau (French Polynesia). *Oceanologica Acta*, ce vol., 261-288.
 Andrews J., G. Friedrich, J.P. Pautot, W. Pluger, V. Renard, M. Melgren, D. Cronan, J. Craig, M. Hoffert, P. Stoffers, S. Shearme, T. Thussen, G. Glasby, N. Le Notre, P. Saget (1983). The Hawaii - Tahiti transect : the oceanographic environment of manganese modules deposits in the Central Pacific. *Mar. Geol.*, **54**, 109-130.
 Bischoff J.L., D.Z. Piper (1979). Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province. *Mar. Sci.* (Plenum Press-New York), **9**, p. 842.
 Cochonot P., C. Charles, B. Greger, M. Hoffert, J.Y. Landuré, E. Le Drezen, T. Lemoign, J.P. Lenoble, R. Le Suavé, J. Meunier, G. Pautot, J.P. Regnault (1989). Nautil submersible dives on deep sea pelagic deposits in North East Central Pacific nodule rich area. 10th I.A.S. regional meeting on sedimentology (Budapest), March 1987.
 Cochonot P., R. Le Suavé, C. Charles, B. Greger, M. Hoffert, J.P. Lenoble, J. Meunier, G. Pautot (1989). Premières observations et me-

sures *in-situ* réalisées sur les dépôts pélagiques du Pacifique Nord-Est Central. A.S.F., Paris, novembre 1989.
 Cochonot P., R. Le Suavé, C. Charles, B. Greger, M. Hoffert, J.P. Lenoble, J. Meunier, G. Pautot (1989). The first Nautil submersible dives in French nodule mining area. CCOP/SOPAC workshop (Cambera), *Miscellaneous report* **79**, p. 18, September 24th-October 1, 1989.
 Cooke H.E. (1975). North american stratigraphy principles as applied to deep sea sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **59**, 817-837.
 Du Castel V. (1985). Etablissement d'une carte géologique au 1.20.000 d'un domaine océanique profond dans une zone riche en nodules polymétalliques du Pacifique Nord (zone Clarion-Clipperton). *Thèse 3^e cycle (université de Bretagne Occidentale-Brest)*, 259 pp., 7 novembre 1985.
 Halbach P. (1988). In "Manganese nodule belt of the Pacific ocean", ed. Halbach P., G. Friedrich, U.V. Stackelberg, Ferdinand Enke Verlag (Stuttgart), 254 pp., 1988.
 Hoffert M. (1980). «Les argiles rouges des grands fonds» dans le Pacifique Central Est : authigenèse, transport et diagenèse. Thèse de doctorat (université de Strasbourg), *Sci. Géol.*, **61**, 231 pp.
 Janin M.C. (1986). Micropaléontologie des concrétions polymétalliques du Pacifique Central : zone Clarion-Clipperton, chaîne Centre Pacifique,

- Ile de la Ligne et archipel des Tuamotou (Eocène à actuel). *Thèse de Doctorat (Université de Paris VI)*, 367 pp.
- Janin M.C.** (1985). Biostratigraphie des concrétions polymétalliques de l'archipel des Tuamotou fondée sur les nanfossiles calcaires. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **8**, **1**, 79-87.
- Janin M.C.** (1981). Étude micropaléontologique de quelques concrétions polymétalliques. *Thèse 3^e cycle* (université de Paris.VI), *Mém. Sc. Terre (Université P. M. Curie - Paris)*, 81-22, 150 pp.
- Kosakevitch A.** (1987). Présence de sphérules cosmiques ferro-nickelifères à platinoïdes dans un encroûtement polymétallique sous-marin de Tuamotou (Polynésie française). *C. R. Acad. Sc. Paris*, **305**, **II**, 105-108.
- Lallier-Vergès E.** (1986). Micronodules de manganèse et sédiments pélagiques dans l'océan Pacifique : caractérisation, formation, digénèse. Thèse de Doctorat (Université de Paris-Sud), *Doc. BRGM*, **119**, 478 pp.
- Lalou C., E. Bricchet** (1972). Signification des mesures radiochimiques dans l'évaluation de la vitesse de croissance des nodules de manganèse. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **275**, 815-818.
- Lalou C., E. Bricchet** (1971). Étude des déséquilibres radioactifs dans la sédimentation abyssale. Rapport final sur le contrat 73-697, CNRS - Centre des Faibles Radioactivités (Gif-sur-Yvette), 97 pp. non publié.
- Le Suavé R., G. Pautot, M. Hoffert** (1989). French exploration of cobalt rich crusts in Tuamotu archipelago - French Polynesia. CCOP/SO-PAC Workshop (Cambera), *Miscellaneous report* **79**, p. 82, September 1989.
- Le Suavé R., C. Pichocki, G. Pautot, M. Hoffert, Y. Morel, M. Voisset, S. Monti, J. Amossé, A. Kosakevitch** (1989). Geological and mineralogical study of Co rich ferromanganese crust located on a submerged atoll in the Tuamotu archipelago (French Polynesia). *Mar. Geol.*, **87**, 227-247.
- Le Suavé R., G. Pautot** (1988). La terminaison Nord-Ouest de l'archipel des Tuamotou. R. S. T. (Lille), avril 1988.
- Le Suavé R., M. Voisset, J.F. Bourillet, P. Cochonot, J. Guillaume, E. Le Drezen, Y. Morel, G. Ollier, S. Rey, S. Ricou, P. Saget** (1987). Mise en évidence de phénomènes tectoniques et érosifs récents en domaine intraplaque profond à l'aide du S.A.R. (Système Acoustique Remorqué). Exemple du Pacifique nord équatorial. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **305**, **II**, 1211-1216.
- Le Suavé R., G. Pautot, M. Hoffert, S. Monti, Y. Morel, C. Pichocki** (1986). Cadre géologique de concrétions polymétalliques cobaltifères sous-marines dans l'archipel des Tuamotou (Polynésie Française). *C. R. Acad. Sc. Paris*, **303**; **II**, **11**, 1013-1018.
- Monti S., G. Pautot** (1974). Cartes bathymétriques au 1/1.000.000 de la Polynésie française (Tahiti, Raroha, Marquises, Hao, Mururoa). CNEXO.
- Morel Y., R. Le Suavé** (1986). Variabilité de l'environnement morphologique et sédimentaire dans un secteur intraplaque du Pacifique Nord (zone Clarion-Clipperton). *Bull. Soc. Géol. France*, **8^e série**, **II**, **3**, 361-372.
- Pautot G., M. Hoffert** (1984). Les nodules du Pacifique central dans leur environnement géologique, campagne COPANO. Publication du CNEXO, Résultats des campagnes à la mer, **26**, 202 pp.
- Pautot G., M. Hoffert** (1974). Pacifique Sud-Est : cadre structural, morphologique et sédimentaire : relations avec les nodules polymétalliques. *II^e colloque Int. sur l'exploitation des océans* (Bordeaux), **4**, Bx 202, 8 p.
- Pichocki C.** (1987). Les encroûtements ferromangamésifères enrichis en cobalt du Pacifique Sud : caractéristiques, genèse et signification géodynamique. *Thèse de doctorat (Université de Bretagne Occidentale, Brest)*.
- Pichocki C., M. Hoffert** (1987). Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crusts sampled in French Polynesia. *Mar. Geol.*, **77**, 109-119.
- Pichocki C.** (1984). Les nodules et encroûtements cobaltifères de la Polynésie Française (mission NIXO 01). *Rapport de DEA (Université de Bretagne Occidentale, Brest)*, 60 pp.
- Piper D.Z., H.E. Cook, J.V. Gardner** (1979). Lithic and acoustic stratigraphy of the equatorial North Pacific : Domes sites A, B, C. In "marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule province", *Mar. Sci.* (Plenum Press-New York), 309-348.
- Rangin G.** (1972). Contribution à la connaissance minéralogique et chimique des modules polymétalliques dragués par le navire "La Coquille" dans l'archipel des Tuamotou. Etude 71-010/2020, 20 p., non publié.
- Stackelberg U.v., H. Beiersdorf** (1987). Manganese nodules and sediments in the Equatorial North Pacific ocean, Sonne cruise (SO 25) 1982. *Geol. Jahrb., série D*, **87**, 403 pp.

