

LES MICRONODULES DANS LES NOYAUX DES NODULES POLYMÉTALLIQUES DU BASSIN INDIEN CENTRAL

ELENA-ADRIANA PERSEIL

Laboratoire de Minéralogie, Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, U.A. 286,
61, rue de Buffon, 75005 Paris Cedex, France

SOMMAIRE

Les noyaux des nodules polymétalliques du Bassin Indien Central renferment trois groupes de micronodules. Les micronodules enfermés dans des ponces rhyolitiques sont constitués de todorokite à éléments de transition. L'enrichissement du nodule polymétallique en manganèse et éléments de transition doit être lié à la raréfaction de ces mêmes éléments dans la partie périphérique des micronodules. Les micronodules dans les sédiments hétérogènes ainsi que les micronodules dans les sédiments fins présentent généralement l'évolution classique des oxydes de manganèse dans les nodules polymétalliques: birnessite z-désordonnée → todorokite. L'analyse des deux derniers groupes permet la mise en évidence du remplacement du sédiment des noyaux par les oxydes de manganèse. Ce type de remplacement peut être à l'origine des nodules très riches en manganèse et éléments de transition, où la todorokite est prédominante. La remobilisation du manganèse et des éléments de transition semble, dans les deux derniers groupes de micronodules, et contrairement au premier groupe, être orientée de la périphérie du nodule polymétallique vers le noyau.

Mots-clés: micronodule, éléments de transition, sédiments fins, todorokite, birnessite z-désordonnée, remplacement, enrichissement, Bassin Central, océan Indien.

ABSTRACT

The core zone of polymetallic nodules from the Central Indian Basin contains three types of micronodules. Where enclosed in rhyolitic pumice (group 1), the micronodules consist of todorokite enriched in transition metals. The pattern of enrichment in Mn and transition metals must be linked to the depletion of the same elements at the periphery of the micronodules. Where enclosed in heterogeneous (group 2) or fine-grained sediments (group 3), the micronodules generally follow the established pattern of evolution of the manganese oxides in polymetallic nodules: randomly stacked birnessite → todorokite. An analysis of these two species establishes that the sediments of the core zone undergo replacement by manganese oxides. Such replacement may explain the origin of nodules that are highly enriched in manganese and the transition metals, and in which todorokite predominates. In the case of micronodules of groups 2 and 3, and contrary to group 1, the remobilization of the elements mentioned is directed from the periphery of the polymetallic nodule toward its core.

Keywords: micronodule, transition metals, fine-grained sediments, randomly stacked birnessite, replacement, enrichment, Central Basin, Indian Ocean.

INTRODUCTION

Le rôle des micronodules dans la formation des nodules polymétalliques a déjà été abordé, par Marchig et Gundlach (1979) en ce qui concerne le Pacifique central, et par Stoffers *et al.* (1981, 1984) en ce qui concerne la zone équatoriale et sud-ouest du Pacifique. Le micronodule apparaît lors de sa dissolution comme un trait d'union entre le sédiment et le nodule polymétallique. La dissolution des micronodules semble varier non seulement en fonction de leur environnement, mais aussi en fonction de leurs caractéristiques géochimiques, et donc essentiellement en fonction des rapports manganèse - fer d'une part, et manganèse - somme des éléments de transition d'autre part. La contribution des micronodules à la formation des nodules polymétalliques relève, pour une large part, de ces caractéristiques.

Dans l'océan Indien, les recherches sur la minéralogie des nodules polymétalliques ont abouti à la définition de plusieurs types de nodules (Leclaire et Perseil 1979, Perseil et Jehanno 1981). Aucune recherche spécifique sur les micronodules de l'océan Indien n'a encore été entreprise. À l'occasion de recherches portant sur les nodules (Perseil et Jehanno 1981), nous avons souvent observé la présence de micronodules au sein des sédiments enfermés dans le noyau des nodules polymétalliques. Cette observation nous a incité à aborder le problème des micronodules dans l'océan Indien par le biais de l'étude des micronodules enfermés dans le noyau. La recherche sera étendue dans un deuxième temps aux micronodules des sédiments se trouvant au voisinage des champs de nodules.

Pour Leclaire *et al.* (1977), les champs de nodules polymétalliques dans l'océan Indien sont étroitement associés à des séries lithologiques condensées, lacunaires, dans la genèse desquelles la dissolution des carbonates jouait un rôle important. L'effet de la dissolution des carbonates, la réduction de la vitesse moyenne de sédimentation, et l'agitation des eaux de fond ont constitué, selon Leclaire *et al.* (1977), des facteurs déterminants dans la formation des nodules.

Les échantillons analysés ici proviennent du Bassin Indien Central et ont été récoltés lors de plusieurs campagnes réalisées par le Laboratoire de Géologie du Muséum, avec le soutien logistique des Territoires

des Terres Australes et Antarctiques Françaises (Caulet *et al.* 1984).

MÉTHODES UTILISÉES

Nous avons procédé, grâce à des lames minces polies réalisées à travers les noyaux des nodules, à l'observation en lumière transmise du sédiment et à l'observation en lumière réfléchie des oxydes et autres phases opaques. Cette étude a été complétée par l'analyse ponctuelle à la microsonde, de manière à pouvoir suivre les corrélations entre les phases minéralogiques et leur géochimie (microsonde CAMEBAX du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris). Les conditions analytiques étaient les suivantes: énergie d'activation 15 kV, temps d'intégration 6 s, courant échantillon 10 nA.

L'analyse des formes en microscopie électronique à balayage (JSM - 35C) a été complétée par la microanalyse spectrométrique dispersive à l'aide d'un analyseur ORTEC couplé avec le microscope électronique. Des examens par spectrométrie d'absorption infrarouge ont permis l'analyse du sédiment à prédominance amorphe et des oxydes (spectrophotomètre 577), sur des prélèvements microscopiques. L'analyse thermique différentielle et pondérale des sédiments et des oxydes a été réalisée à l'aide d'un analyseur A.D.A.M.E.L. 67 et d'une thermobalance A.D.A.M.E.L. type B sur des prélèvements microscopiques.

CLASSIFICATION DES MICRONODULES

Compte tenu de la nature pétrologique des noyaux, les micronodules analysés peuvent être classés en trois groupes: 1) micronodules enfermés dans des ponces rhyolitiques, 2) micronodules enfermés dans des sédiments hétérogènes, et 3) micronodules enfermés dans des sédiments clairs et très fins.

Mero (1965) fonde sur divers paramètres, tels que le rapport de manganèse à fer et l'importance relative de la teneur en nickel et cuivre en regard de la teneur en cobalt, les principes d'une classification des nodules polymétalliques dans le Pacifique; les types de nodules qu'il distingue correspondent à de véritables champs métallogéniques. Le rapport de manganèse à fer, qui avoisine 1 dans le premier type décrit par Mero, dit type «A», augmente considéra-

blement dans le type «B» en raison de la brusque diminution des teneurs en fer. Le type «C» se distingue par des teneurs en cuivre et nickel dépassant 1% pour chacun des éléments, et par un rapport Mn/Fe assez stable, se situant aux alentours de 2. Le type «D» correspond à des nodules assez riches en cobalt (entre 1 et 1.2%).

MICRONODULES DANS LES PONCES RHYOLITIQUES

Les échantillons qui nous ont été confiés sont les nodules 77DR02 provenant de la station 28 de la campagne NEMROD (Tableau 1). Une bonne moitié d'entre eux présentent des noyaux en verre rhyolitique (Perseil 1985). Des fragments gris clair de ponce rhyolitique étirée, de 2 à 4 cm de diamètre, présentent en coupe un faciès fibreux très fin. Entourés de quelques millimètres d'oxydes ferromanganésifères, ils constituent de cette manière des nodules polymétalliques.

À l'oeil nu, en coupe, le noyau semble imprégné d'oxydes. L'observation des lames minces (dans le noyau), ainsi que des cassures au microscope électronique à balayage (Fig. 1), nous permet de découvrir, dans la structure vacuolaire de la ponce, de nombreux micronodules (entre 10 et 150 μm de diamètre). Des fragments de silicates et oxydes combient parfois aussi la structure vacuolaire de la ponce, mais ils ne sont généralement pas entourés par d'autres oxydes ferromanganésifères. On peut citer, parmi les fragments de silicates, des feldspaths, de composition chimique assez variable, ainsi que des plages d'olivine (où la forstérite varie de 30 à 49%, et dont la teneur en MnO se situe à 2 - 3%). Parmi les oxydes, on notera de fines baguettes d'ilménite ne dépassant pas 10 μm de longueur. D'autres plages, aux dimensions plus importantes, constituées de magnétite titanifère, sont corrodées et relativement riches en inclusions de carbonate (calcite à 1 - 2% FeO). Les fragments de silicates et d'oxydes ont été identifiés exclusivement en lumière transmise et réfléchie, et analysés à la microsonde, ce qui nous a permis de connaître l'étendue de l'hétérogénéité du substrat. Nous avons pu en outre analyser les micronodules plus volumineux par diffraction X et par spectroscopie d'absorption infrarouge, et en cassure au microscope électronique.

Les clichés aux rayons X font apparaître trois raies (9.8 Å forte, 4.85 Å moyenne, et 2.44 Å moyenne). On ne décelé pratiquement aucune différence entre les clichés des micronodules et ceux qui correspondent aux couches d'oxydes qui entourent le noyau (le nodule polymétallique proprement dit). Les clichés sont caractéristiques de la todorokite; on doit préciser que la raie 2.44 Å appartient aussi à une phase faiblement cristallisée que les auteurs russes nomment «vernadite» (Chukhrov *et al.* 1979), les auteurs anglo-saxons « $\delta\text{-MnO}_2$ » (Burns et Burns

TABLEAU 1. LOCALISATION DES ÉCHANTILLONS, BASSIN INDIEN CENTRAL

Campagne	N° de prélèvement	Latitude	Longitude	Profondeur m
NEMROD	77 DR02	13°33S	76°53E	5.360
NEMROD	77 DR03	13°33S	76°57E	5.200-5.330
SAFARI II	81 CP23	11°51S	78°40E	5.055
SAFARI II	81 CP27	12°49S	77°48E	5.340
SAFARI II	81 CP31	13°45S	76°56E	5.300

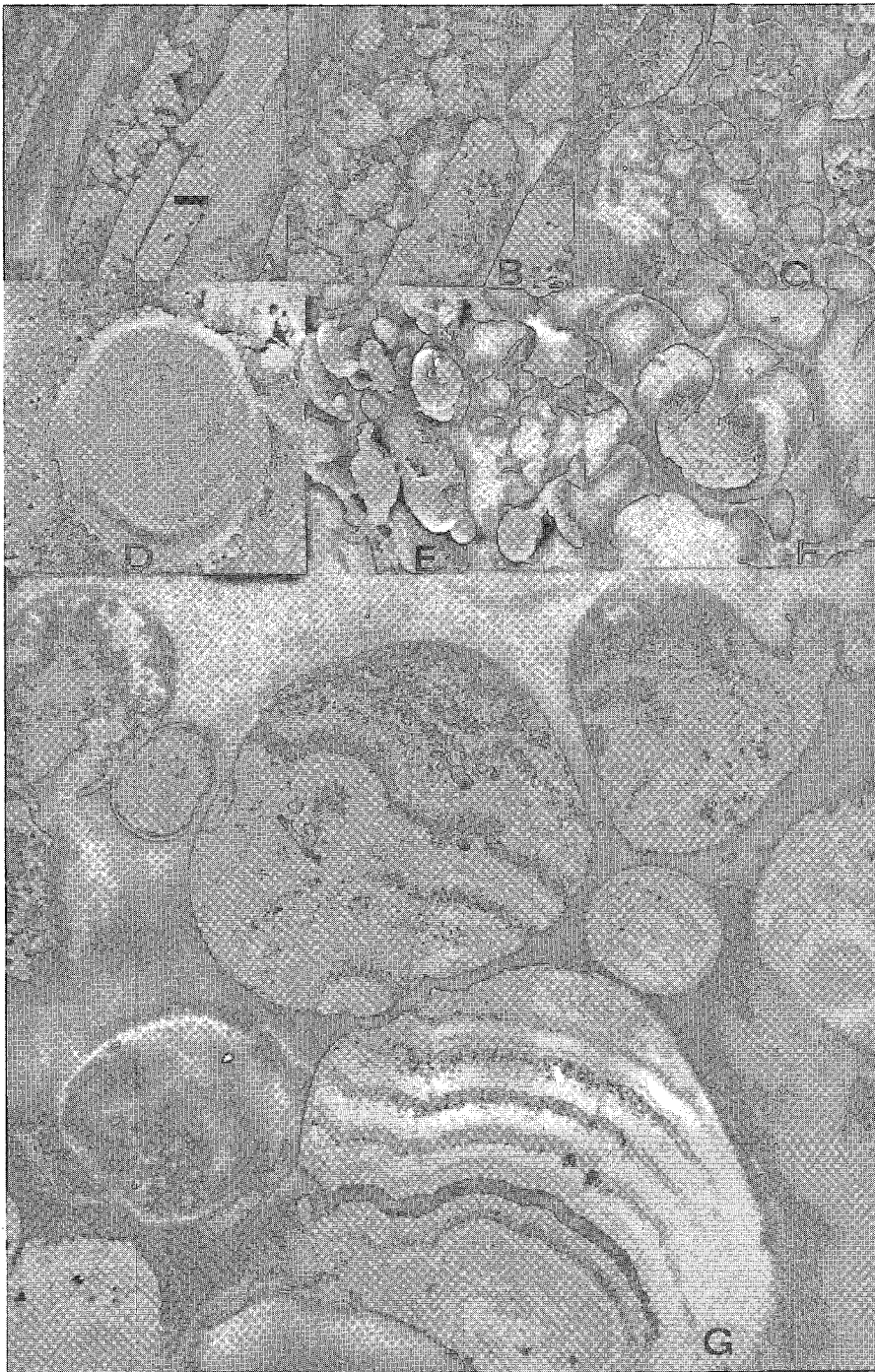


FIG. 1. A, B, C, D, E et F. Micronodules dans les ponces rhyolitiques. Photos au microscope électronique à balayage. La dissolution des micronodules est bien visible en C et F. G. Micronodules dans les sédiments hétérogènes; lumière naturelle réfléchie. Échelle: A $6 \mu\text{m}$, B $3 \mu\text{m}$, C $3 \mu\text{m}$, D $10 \mu\text{m}$, E $10 \mu\text{m}$, F $1.5 \mu\text{m}$, G $6 \mu\text{m}$.

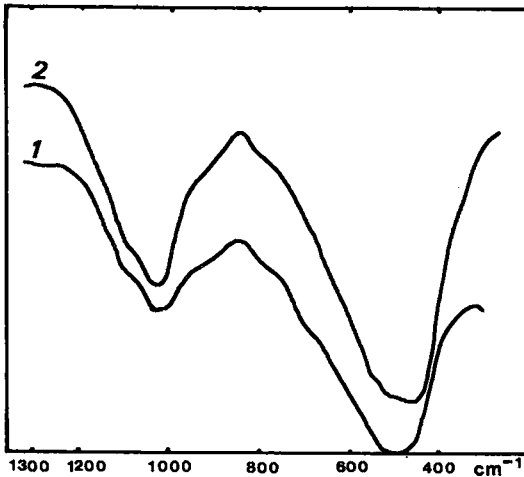


FIG. 2. Spectres d'absorption infrarouge des micronodules enfermés dans les ponces rhyolitiques (prélèvements sur lame mince polie). 1. Partie centrale des micronodules; 2. Partie périphérique des micronodules. Poudres naturelles.

1978a, b) et l'école suisse «birnessite z-désordonnée» (Giovanoli 1980). La seule approche qui permette d'apprécier l'importance de chacune de ces deux phases étroitement associées dans la constitution du micronodule, réside dans l'observation microscopique, appuyée par l'examen ponctuel à la microsonde. Ce type d'observation dans ce cas précis (Fig. 1) révèle la prédominance de la todorokite. De très fines alternances sombres pratiquement isotropes entre nicols croisés doivent être attribuées à la birnessite z-désordonnée.

Les spectres d'absorption infrarouge (Fig. 2) des micronodules prélevés au microscope sont identiques à ceux des nodules (Perseil et Jehanno 1981). Nous avons exploré la même région que Potter et Rossman (1979). L'élargissement des bandes, qui correspond tant à l'association intime des deux constituants (la todorokite et la birnessite z-désordonnée) qu'au désordre structural présent au moins à l'échelle d'un des constituants, interdit toute interprétation structurale, comme toute appréciation des proportions de ces deux constituants dans les micronodules.

Dans le nodule, la partie centrale des microconcrétions, au voisinage du noyau, est essentiellement con-

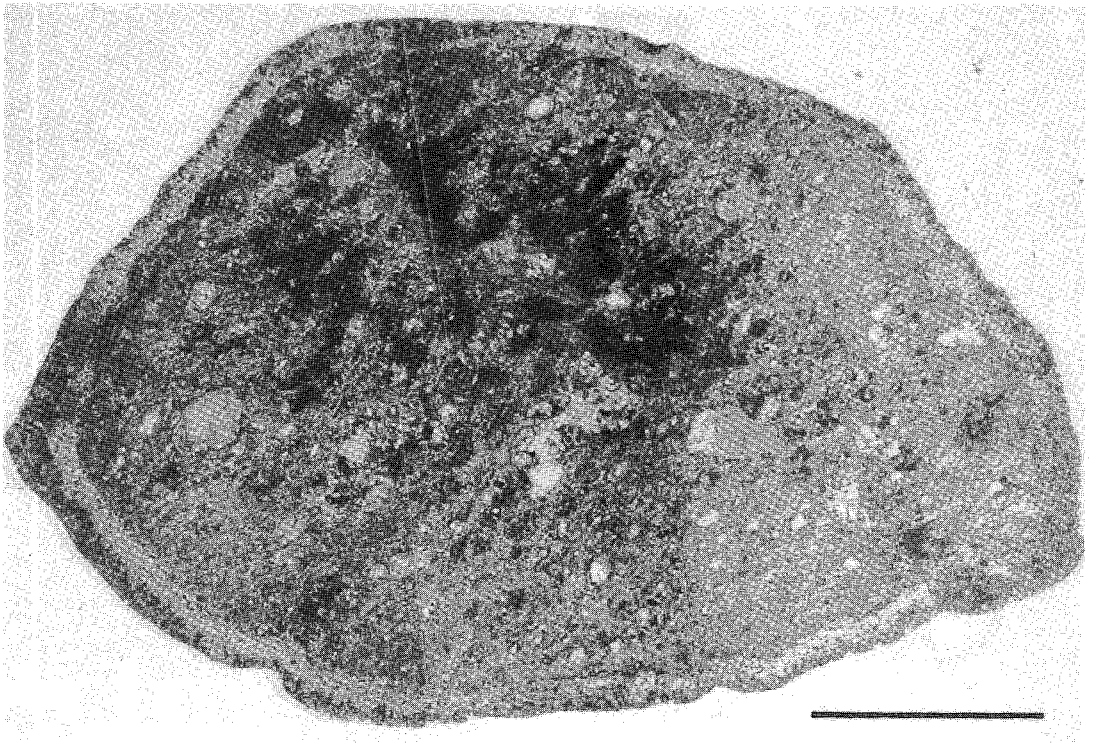


FIG. 3. Micronodules dans les sédiments hétérogènes du noyau d'un nodule polymétallique (CP 81 - 31). On remarque que les couches concentriques d'oxydes qui entourent le noyau ne dépassent pas quelques millimètres. Échelle: le tiret est égal à 1 cm.

stituée de birnessite α -désordonnée (Fig. 3), dont la très faible réflectance et l'anisotropie, en lumière réfléchie, sont très caractéristiques. L'analyse ponctuelle des parties internes des microconcrétions (Tableau 2) indique des teneurs importantes en fer et silice, alors que les éléments de transition se trouvent à l'état de traces. Si l'on se dirige vers la périphérie des microconcrétions (Tableau 2), le fer et la silice diminuent progressivement, tandis que la concentration en manganèse et éléments de transition (cuivre et nickel) augmente. L'analyse ponctuelle des 50 μm de la périphérie du nodule révèle d'une manière constante le renforcement de ces caractères minéralogiques et géochimiques, qui apparaissent à la frontière entre le noyau constitué de ponce rhyolitique et les concrétions d'oxydes qui l'entourent (Tableau 3).

L'analyse ponctuelle des micronodules présents dans le noyau (Tableau 4) met en évidence une diminution des concentrations en manganèse et éléments de transition du centre vers la périphérie. La corrélation entre les teneurs en fer et silice d'une part, et les teneurs en manganèse et éléments de transition d'autre part, semble très variable d'un micronodule à l'autre. Les propriétés physiques et la composition ponctuelle des micronodules définissent la todorokite si l'on fait abstraction des teneurs en silice. Or la silice ne peut entrer dans la structure, mais se trouve vraisemblablement entre les lamelles très fines de todorokite sous forme amorphe. Si le manganèse semble apparaître dans les micronodules directement sous forme de todorokite à éléments de transition, c'est toutefois sous la forme de birnessite α -désordonnée qu'il commence à se déposer autour du noyau. L'enrichissement du nodule en manganèse et éléments de transition est postérieur, et peut être mis en parallèle avec la diminution des teneurs correspondantes dans la partie périphérique des micronodules.

MICRONODULES DANS LES SÉDIMENTS HÉTÉROGÈNES

Certains nodules, parmi ceux qui ont été découverts à des profondeurs de plus de 5000 m (77DR03, 81CP27 et 81CP31) (Tableau 1), renferment des noyaux volumineux, constitués de sédiments fins (boues rouges) et présentant de nombreux fragments de silicates, d'oxydes ou de roches (Fig. 4). Les sédiments fins silico-alumineux, plus ou moins riches en fer, possèdent une structure vacuolaire. Les spectres d'absorption infrarouge (Perseil 1985) de ces sédiments sont identiques à ceux des complexes silico-ferriques amorphes des boues rouges décrites par Fröhlich (1980). Des fragments de pyroxène et de feldspath sont englobés dans les sédiments silico-alumineux, ainsi que des fragments de roches altérées et d'os. Les fragments de pyroxène et de feldspath sont riches en inclusions d'oxydes. Tantôt

TABLEAU 2. VARIATION DE LA COMPOSITION PONCTUELLE DES MICROCONCRÉTIONS D'OXYDES AU CONTACT DU NOYAU (77-DRO2)

	1	2	3	4	5	6	7	8
MnO	24,99	27,88	43,67	45,80	24,53	25,27	35,29	37,40
FeO	19,46	13,49	5,47	4,50	19,26	12,19	9,59	9,10
SiO ₂	14,89	22,18	9,82	10,15	18,85	25,19	14,66	10,30
CaO	2,28	1,47	1,29	1,30	2,72	2,42	2,64	2,40
MgO	1,17	2,01	5,41	5,60	1,20	1,39	2,06	2,60
K ₂ O	0,44	0,33	0,65	0,70	0,29	0,32	0,38	0,40
Na ₂ O	2,81	1,53	2,35	2,50	0,82	2,60	2,54	2,70
Al ₂ O ₃	2,77	2,29	4,73	4,10	2,03	2,75	2,60	3,10
BaO	0,23	0,18	0,12	0,20	0,00	0,08	0,01	0,10
CoO	0,00	0,12	0,08	0,09	0,10	0,00	0,00	0,05
CuO	0,47	0,50	1,82	2,10	0,17	0,26	0,83	1,30
NiO	0,09	0,67	2,52	2,80	0,27	0,43	1,02	1,60
ZnO	0,13	0,00	0,20	0,40	0,00	0,15	0,00	0,30
TiO ₂	0,42	0,47	0,16	0,10	0,55	0,42	0,34	0,10

1,2 : Partie interne d'une microconcrétion.

3,4 : Partie périphérique de la microconcrétion analysée en 1 et 2.

5,6 : Partie interne d'une microconcrétion.

7,8 : Partie périphérique de la microconcrétion analysée en 5 et 6.

TABLEAU 3. VARIATION DE LA COMPOSITION PONCTUELLE DES CONCRÉTIONS PÉRIPHÉRIQUES DU NODULE POLYMÉTALLIQUE (77-DRO2), LES 50 μm PÉRIPHÉRIQUES DU NODULE 77-DRO2

	50 μm	40 μm	30 μm	20 μm	10 μm	périphérie	
MnO	47,42	40,31	50,89	52,21	58,34	59,82	61,06 61,50
FeO	1,01	3,29	0,76	0,70	0,28	0,52	0,65 0,60
SiO ₂	3,28	5,69	1,88	2,15	3,36	2,01	2,91 3,01
CaO	1,49	2,15	1,60	1,55	1,54	1,66	1,69 1,60
MgO	2,51	2,49	3,49	3,75	3,13	3,10	3,06 3,10
K ₂ O	0,98	0,68	0,73	1,10	1,07	1,12	1,12 1,08
Na ₂ O	2,09	1,28	1,98	2,24	3,38	3,63	2,84 2,90
Al ₂ O ₃	1,09	0,86	1,38	1,92	0,14	0,26	0,36 0,20
BaO	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20 0,10
CoO	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05	0,05	0,02 0,05
CuO	1,43	1,13	2,30	2,13	1,87	2,47	2,23 2,50
NiO	1,45	2,62	2,80	3,01	0,98	1,17	1,47 1,50
ZnO	0,45	0,25	0,17	0,22	0,00	0,40	0,40 0,30
TiO ₂	0,00	0,27	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09 0,03

automorphes (les plages de magnétite titanifère), tantôt en gouttelettes (les plages d'ilménite), ces inclusions dépassent souvent 50 μm (Fig. 5).

Si la fréquence d'oxydes est importante dans la constitution des noyaux relevant de ce type de nodules, elle est par contre moins évidente dans les couches d'oxydes autour des noyaux, car ces granules sont souvent camouflées entre les couches ferro-manganésifères, et leur taille est plus petite. Dans les sédiments observés au voisinage de micronodules (Fig. 5), ces plages d'oxydes sont entourées d'un mince dépôt d'oxydes ferro-manganésifères. Les fragments de feldspath sont représentés le plus souvent par un plagioclase dont la composition ponctuelle est celle de l'andésine; le pyroxène, pour sa part, est principalement constitué de pigeonite.

TABLEAU 4. VARIATION DE LA COMPOSITION PONCTUELLE (A LA MICROSONDE) DES MICRONODULES (77-DRO2) EN FONCTION DE LEURS DIMENSIONS, DANS LEUR PARTIE CENTRALE ET PERIPHERIQUE

	1		2		3		4	
	c	p	c	p	c	p	c	p
MnO	45.96	28.29	31.70	17.63	34.64	28.77	36.40	25.02
FeO	0.08	0.40	1.55	3.65	0.52	0.68	0.20	0.80
SiO ₂	7.80	25.70	23.36	25.63	15.51	23.17	18.10	25.10
CaO	1.11	1.01	0.97	0.60	1.36	1.16	1.20	1.18
MgO	4.97	3.98	4.34	4.00	4.87	4.71	4.90	4.80
K ₂ O	0.63	0.40	0.46	1.02	0.28	0.29	0.30	0.29
Na ₂ O	1.96	1.06	0.80	1.02	1.29	0.86	1.30	0.90
Al ₂ O ₃	2.57	2.66	5.21	9.31	2.63	3.02	2.50	3.03
BaO	0.19	0.14	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
CoO	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CuO	1.77	1.15	1.24	0.66	1.65	1.21	1.70	1.20
NiO	2.08	1.33	0.86	0.72	1.42	1.35	1.47	1.20
ZnO	0.34	0.30	0.17	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
TiO ₂	0.08	0.14	0.16	0.29	0.22	0.15	0.00	0.00

c = centre ; p = périphérie ; 1 = 150 µm ; 2 = 100 µm ; 3 = 50 µm
4 = 30 µm.

Les analyses ponctuelles (à la microsonde) à travers les plages d'oxydes indiquent une légère migration du fer, qui serait, d'après Akimoto *et al.* (1984), caractéristique d'une oxydation de basse température. On remarque cependant (Tableau 5) que le titane, dont la teneur augmente habituellement lors de ce processus d'oxydation (Tableau 5, composition 1, 3 et 4), suit dans certaines plages (Tableau 5, composition 2 et 5) le trajet du fer, ce qui signifie qu'il a tendance à migrer. Les deux tendances ont été constatées à la suite de quelques certaines d'analyses ponctuelles dans la partie centrale des plages d'oxydes et à leur périphérie et pourraient être interprétées comme la superposition d'un autre processus d'altération des oxydes hérités.

Tantôt des micronodules se manifestent dans les vides de la structure vacuolaire du sédiment (Fig. 5), tantôt ils sont pris dans le sédiment, lorsqu'ils se sont formés autour des fragments de roche, sédiments, oxydes ou silicates (Fig. 4).

L'analyse des premières couches d'oxydes ferromanganésifères du nodule, au contact avec le sédiment fin du noyau, indique en général un passage graduel du sédiment (complexes silico-ferriques amorphes) aux oxydes ferro-manganésifères. Le départ de l'aluminium et d'une partie du silicium s'opère en même temps que le manganèse se fixe dans la structure. Ce processus se retrouve dans la partie centrale de chaque micronodule de la structure vacuolaire. Grâce à l'analyse ponctuelle, nous avons constaté un enrichissement progressif en manganèse de la masse silico-ferrugineuse dans la partie centrale des micronodules. Dans certains micronodules, le produit de ce processus d'enrichissement en manganèse des complexes silico-ferriques amorphes est la

birnessite z-désordonnée (Tableau 6). La couche périphérique des micronodules est formée essentiellement de todorokite, qui s'enrichit progressivement en Cu + Ni. Dans la plupart des cas analysés pour ce type de micronodule, on remarque que le nickel est plus important que le cuivre, alors que dans les couches périphériques du nodule, les teneurs en cuivre et en nickel sont comparables.

On peut même observer des micronodules dépourvus de cuivre (Tableau 6, composition 1). À la lumière de ces données, il semble bien que l'origine du nickel ne soit pas nécessairement liée à celle du cuivre. Toutes les données relatives aux micronodules présents dans les nodules hétérogènes confirment une observation déjà valable dans le cas des micronodules des ponces rhyolitiques (Tableaux 3 et 4): le rapport entre la somme des éléments de transition et le manganèse [(CuO + NiO + ZnO)/MnO] varie de 0.08 à 0.10 dans les micronodules, alors que dans les nodules polymétalliques la variation est plus large (de 0.05 à 0.10).

Les fragments de roches altérées sont, le plus souvent, entourés d'oxydes (Fig. 4) dont la nature minéralogique et géochimique est identique au coeur des micronodules trouvés dans le sédiment fin. L'évolution vers la todorokite dans la couche périphérique de ces micronodules (Figs. 6A, B) est lente et peu fréquente. Lorsque les fragments des silicates sont particulièrement altérés, ils sont imprégnés d'oxydes de manganèse (Fig. 4) sous la forme d'un vaste champ de micronodules. L'enrichissement en manganèse du milieu conduit par la suite au dépôt de l'oxyde autour de ces fragments de silicates.

Quelques fragments d'os qui ne dépassent pas 500 µm ont été identifiés dans les sédiments hétérogènes. Leur structure vacuolaire est souvent tapissée de fins micronodules de birnessite z-désordonnée sans traces d'éléments de transition (Fig. 5). Ces fins micronodules sont parfois enveloppés de fines lamelles de todorokite; lorsqu'il en est ainsi, leur teneur en éléments de transition augmente. À côté des concrétions de todorokite, on remarque souvent la présence de zéolites (la phillipsite).

MICRONODULES ENFERMÉS DANS DES SÉDIMENTS CLAIRS ET FINS

Des nodules à concrétions multiples provenant des profondeurs dépassant souvent 5,000 m, et dont le type représentatif pourrait être fourni par les échantillons 81CP23 (Caulet *et al.* 1984) (Tableau 1), possèdent des noyaux clairs de sédiments fins. Le nodule à concrétions multiples s'est formé par l'assemblage de quatre nodules dont chacun avait une évolution individuelle. Progressivement, des couches d'oxydes enveloppèrent d'abord deux à deux les nodules puis ces ensembles de deux nodules se sont réunis sous une mince couche d'oxydes de quelques millimètres (Fig. 7).

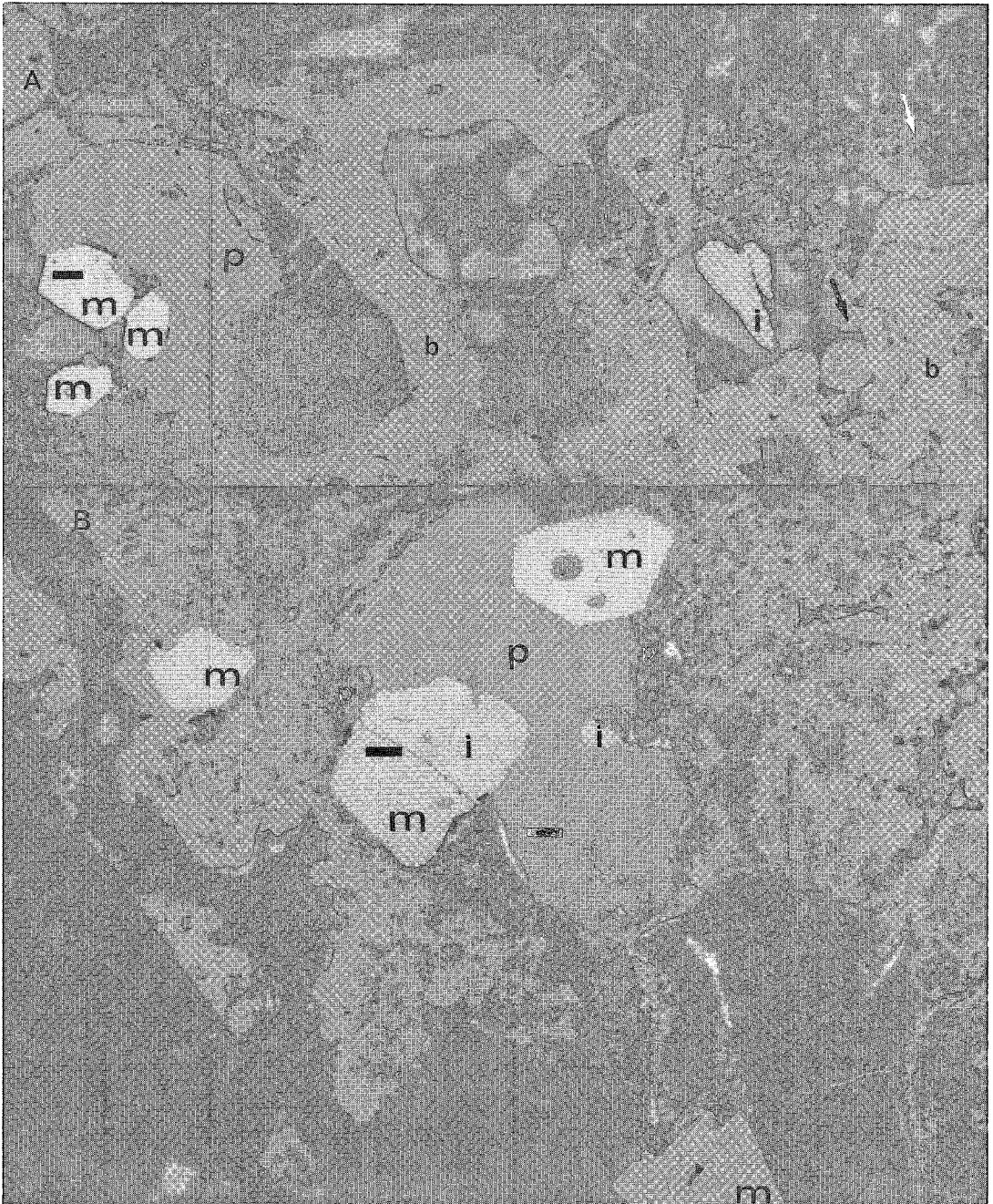


FIG. 4. Fragments de roches imprégnés et entourés par les oxydes de manganèse dans les sédiments hétérogènes du nodule CP 81 - 31. A. Pyroxène (p) à inclusions de magnétite (m) entourés de birnessite α -désordonnée (b). B. L'enrichissement en manganèse est nettement visible dans les parties les plus altérées des plages (p'). Cet enrichissement aboutit à la formation de micronodules (flèche dans A). Le tiret est égal à 10 μm .

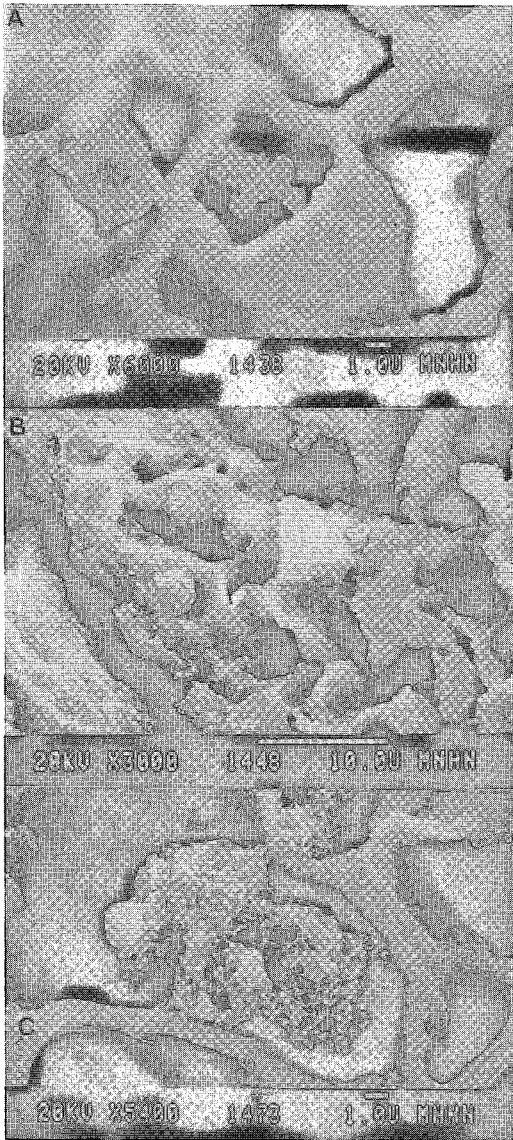


FIG. 5. Micronodules sur des fragments d'os. A et B: fins micronodules de birnessite α -désordonnée. C: enveloppe de fines lamelles de todorokite.

Le sédiment clair et fin des noyaux est constitué de complexes silico-ferriques amorphes (Fröhlich 1980). La composition ponctuelle ainsi que le spectre d'absorption infrarouge de ces complexes nous permettent de découvrir de nombreux îlots de smectite ferrique et alumineuse, assez bien cristallisée au milieu de la masse amorphe. La monotonie du sédiment est rompue non seulement par la présence de

nombreuses zéolites en fins prismes, mais aussi par des fragments, très fins, des silicates et carbonates. Les éléments de transition sont pratiquement absents de ce sédiment. Des fragments de micronodules, des micronodules et des infiltrations d'oxydes envahissent le sédiment à l'échelle microscopique. Grâce à l'observation, même à l'oeil nu, des coupes à travers le nodule 81CP23 (Fig. 7), nous sommes en mesure de constater la tendance que présentent les concrétions d'oxydes à remplacer le sédiment des noyaux. Dans la partie centrale des nodules, au voisinage du sédiment avec les premières couches d'oxydes qui constituent le cortex des nodules, nous trouvons des compositions intermédiaires entre la birnessite α -désordonnée et les complexes silico-ferriques amorphes (Tableau 7).

Les formes et les dimensions des micronodules présentent une grande diversité; c'est généralement dans les plus gros que l'on trouve les teneurs les plus importantes en manganèse et éléments de transition, alors que, dans les micronodules dont le diamètre n'atteint pas $50 \mu\text{m}$, la birnessite α -désordonnée est prédominante. Le fer restant important, la concentration en éléments de transition est faible. Les deux phases d'oxydes, la todorokite et la birnessite se partagent les micronodules selon leur dimension; on ne remarque cependant ni de variation sensible dans la composition ponctuelle du centre vers la périphérie, ni quelque autre indice de mobilisation des éléments constituant ces micronodules. La todorokite en intercalations assez fines et rares semble davantage concentrée à la partie périphérique du nodule polymétallique. Sa formation, ainsi que la concentration des éléments de transition dans son réseau, doivent correspondre à un épisode récent de l'histoire du nodule. Le remplacement, à la frontière cortex - noyau, du sédiment par les oxydes peut plaider en faveur d'une mobilisation des éléments du cortex vers le noyau, processus qui pourrait être à l'origine des nodules polymétalliques sans noyau, de type AET21 (Perseil et Jehanno 1981), enrichis postérieurement en manganèse et éléments de transition.

Nous retrouvons dans certaines plages de birnessite α -désordonnée des teneurs importantes en Ti qui peuvent être comparées aux concentrations décelées dans les boues rouges.

L'examen thermique pondéral du sédiment et des constituants des micronodules (Fig. 8, courbes 2, 3, 4 et 5) est exprimé par un ensemble de courbes présentant la même allure, avec le maximum de perte de poids vers 200°C . La perte de poids la plus importante est enregistrée par les complexes silico-ferriques amorphes (Fig. 8, courbe 5), mais on constate un passage progressif entre les courbes 3, 4 et 5. La proportion infime et la répartition intime et constante des complexes silico-ferriques amorphes dans chaque prélèvement d'oxydes pourraient expliquer en partie l'allure générale des courbes 2, 3 et 4. Nous

TABLEAU 5. VARIATION DE LA COMPOSITION PONCTUELLE A LA MICROSONDE DES PLAGES DE MAGNETITE TITANIFERE ET D'ILMÉNITE ENFERMEES DANS LES SEDIMENTS HETEROGENES

	1c	1p	2c	2p	3c	3p	4c	4p	5c	5p
MnO	0,86	0,97	1,00	0,80	0,87	0,75	0,85	0,80	0,78	0,90
FeO	76,31	75,27	77,27	75,52	75,32	74,06	49,51	48,13	49,30	46,10
SiO ₂	0,02	0,16	0,05	0,13	0,01	0,04	0,01	0,20	0,02	0,18
MgO	1,80	1,94	1,89	2,11	1,85	2,08	3,05	2,90	3,00	2,80
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	2,30	2,15	2,25	2,22	2,26	2,15	0,18	0,32	0,30	0,31
CoO	0,05	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,05	0,04	0,08
CuO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO	0,00	0,01	0,01	0,14	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
ZnO	0,00	0,33	0,00	0,00	0,05	0,12	0,00	0,20	0,00	0,40
TiO ₂	13,46	13,50	14,02	13,08	13,56	13,92	46,15	45,20	46,10	45,80

1c, 2c et 3c : partie centrale des plages automorphes de magnétite titanifère.

1p, 2p et 3p : périphérie des plages automorphes de magnétite titanifère.

3c et 5c : partie centrale des plages d'ilménite.

4p et 5p : périphérie des plages d'ilménite.

TABLEAU 6. VARIATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA PARTIE CENTRALE DES MICRONODULES DANS LES SEDIMENTS HETEROGENES (ANALYSES A LA MICROSONDE)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MnO	17,86	20,40	27,40	28,99	30,10	32,05	39,76	17,97	15,27
FeO	16,46	15,30	8,10	4,81	4,10	4,20	2,26	17,37	14,89
SiO ₂	23,39	20,40	20,10	19,85	19,00	19,10	13,45	17,26	25,15
MgO	2,23	2,40	3,10	3,24	3,30	3,20	6,59	1,49	1,02
K ₂ O	0,96	0,60	0,50	0,51	0,40	0,42	0,77	0,40	0,87
Na ₂ O	1,30	1,50	2,18	2,08	2,10	2,18	2,54	0,74	1,05
Al ₂ O ₃	7,59	6,30	4,80	4,79	4,50	4,60	5,08	4,76	3,39
CoO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
CuO	0,00	0,20	0,70	0,81	0,90	0,80	1,12	0,04	0,15
NiO	0,41	0,50	1,40	1,51	1,60	1,55	1,92	0,11	0,20
ZnO	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	0,51	0,30	0,80	0,99	0,90	0,85	0,37	0,84	0,46

1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 : partie centrale des micronODULES dans les sédiments hétérogènes le diamètre des micronODULES : "1" = 100 μm ; "2" = 90 μm ; "3" = 80 μm ; "4" = 70 μm ; "5" = 60 μm ; "6" = 50 μm ; "7" = 40 μm.

8 et 9 : premières concrétions du nodule 81C31 au voisinage du noyau.

observons toutefois que lorsque la todorokite prédomine dans un échantillon, l'allure générale de la courbe (1) change. L'examen thermique pondéral confirme également que la structure de la birnessite α -désordonnée est finalement assez proche de celle des complexes silico-ferriques amorphes. Les courbes thermodifférentielles des constituants des micronODULES (Fig. 9) sont sensiblement différentes de celles des sédiments (Perseil et Jehanno 1981); elles indiquent essentiellement l'importance du constituant faiblement cristallisé (la birnessite α -désordonnée), qui présente un accident endothermique très ample entre 100 et 300°C. À partir de 300°C, nous suivons

les transformations classiques des oxydes de manganèse.

CONCLUSIONS

Les nodules polymétalliques du Bassin Indien Central ainsi que les micronODULES enfermés dans leurs noyaux peuvent être classés dans le type C de Mero (1965). Nous avons constaté cependant (Tableau 6) que, parmi les micronODULES présents dans les sédiments hétérogènes, les plus petits correspondent encore au type «C» de Mero, tandis que le rapport de manganèse à fer ainsi que la teneur en éléments

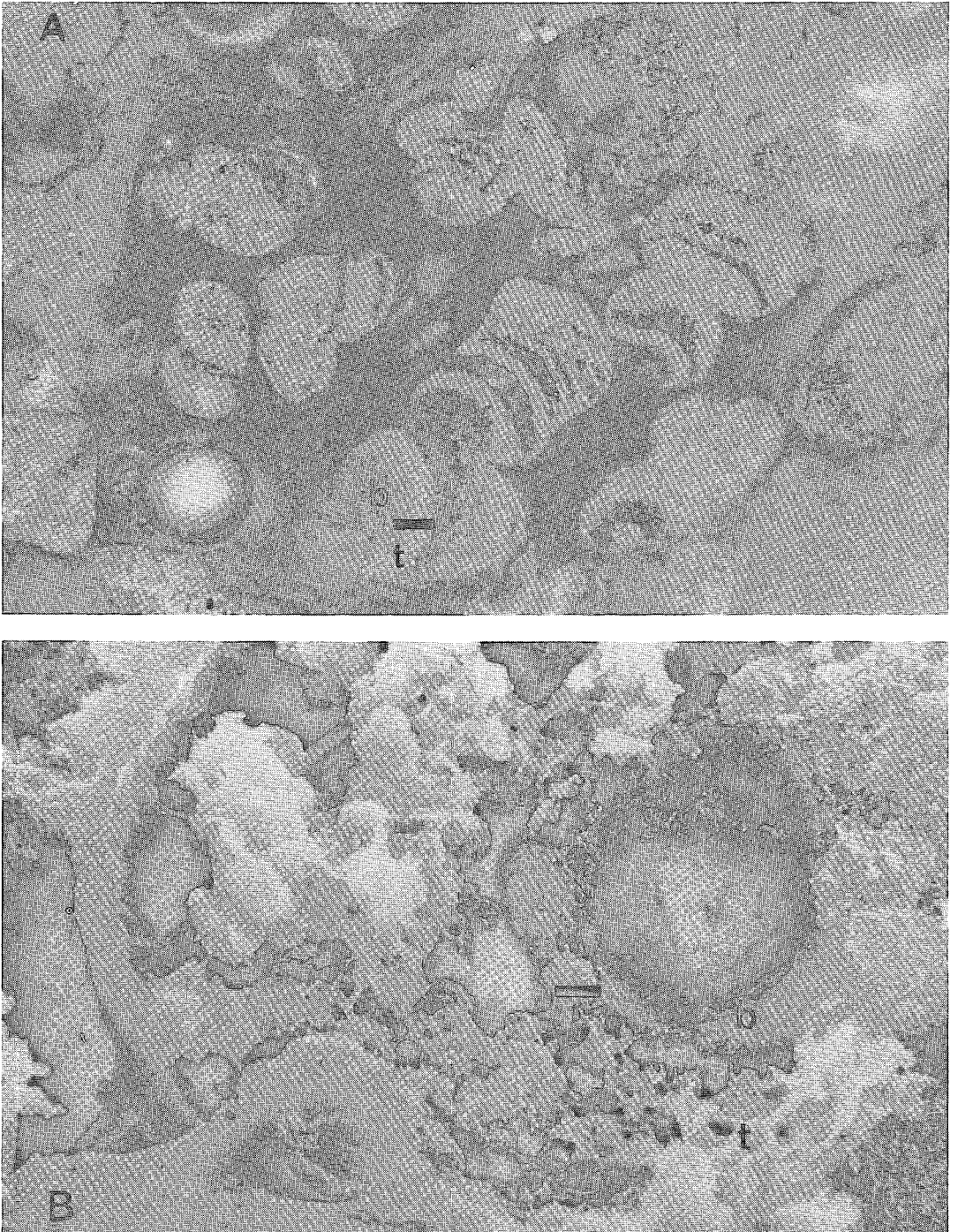


FIG. 6. Évolution des oxydes de manganèse dans les micronodules: birnessite z -désordonnée - todorokite. Le même processus observé en lame mince polie (A) et en cassure (B). A. La birnessite z -désordonnée (b) dans la partie centrale des micronodules passe en todorokite (t) vers la périphérie des micronodules; elle présente une réflectance nettement supérieure à celle de la birnessite z -désordonnée, ainsi que des effets d'anisotropie. Lumière réfléchie naturelle. Échelle: 15 μm . B. Des lamelles de todorokite (t) se forment à partir d'une concrétion massive faiblement cristallisée de birnessite z -désordonnée (b). Microscope électronique à balayage. Échelle: le tiret est égal à 3 μm .

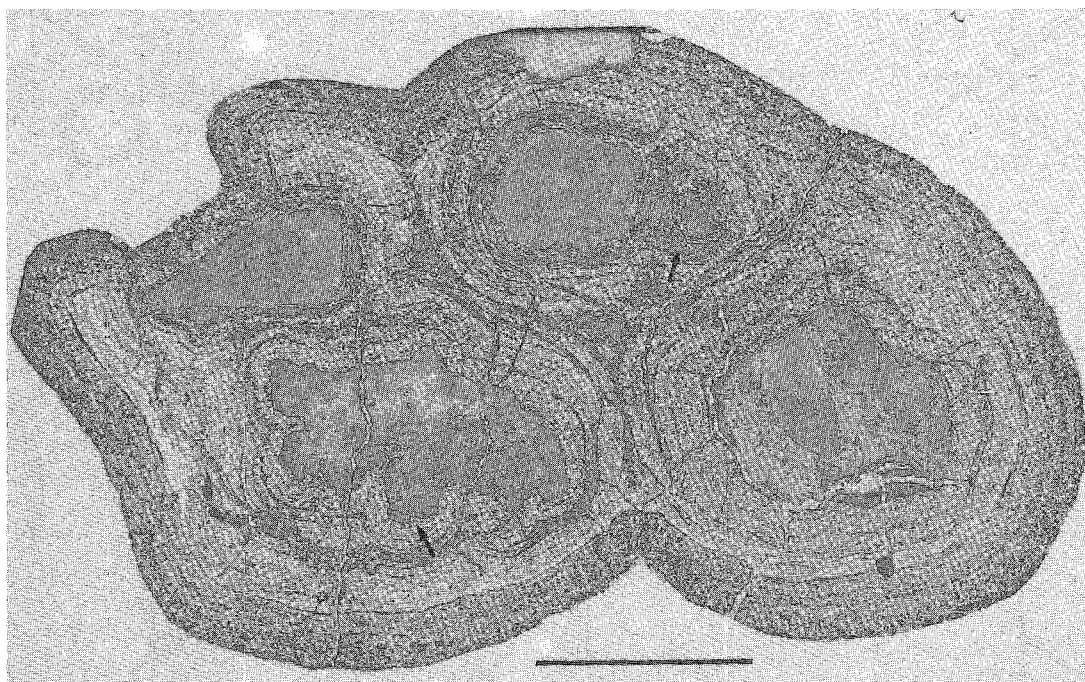


FIG. 7. Coupe à travers le nodule à concrétions multiples 81CP23. Les flèches indiquent la tendance visible que présentent les concrétions d'oxydes à remplacer le sédiment. Échelle: le tiret est égal à 1 cm.

TABLEAU 7. PASSAGE DES COMPLEXES SILICO-FERRIQUES AMORPHES A LA BIRNESSITE Z-DESORDONNÉE
(ANALYSES A LA MICROSONDE)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MnO	0.44	0.82	2.36	3.51	5.40	17.65	21.23	25.12	33.50	43.49
FeO	21.97	16.96	43.96	19.37	24.69	35.93	23.83	20.36	9.81	6.30
SiO ₂	37.37	49.97	17.93	38.82	35.48	16.18	16.25	17.78	10.26	10.82
CaO	0.25	0.30	0.92	0.93	0.87	1.49	2.35	3.06	2.81	2.20
MgO	1.46	4.54	0.93	3.17	1.28	1.34	2.62	1.77	1.33	2.50
K ₂ O	4.28	3.45	0.23	2.46	0.83	0.29	0.69	0.43	0.42	0.90
Al ₂ O ₃	10.83	9.86	1.52	9.17	8.81	1.77	3.59	2.90	1.06	2.46
BeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.56
CaO	0.01	0.08	0.00	0.00	0.07	0.00	0.35	0.40	0.17	0.18
CuO	0.22	0.00	0.07	0.00	0.03	0.20	0.79	0.00	0.35	0.56
NiO	0.00	0.00	0.22	0.00	0.30	0.00	0.44	0.35	0.65	0.79
ZnO	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00
PbO	0.08	0.00	0.18	0.00	0.24	0.15	0.00	0.22	0.00	0.06
TiO ₂	0.53	2.37	1.81	4.59	0.47	1.68	1.12	1.13	0.67	0.57

de transition diminuent considérablement dans les micronodules plus grands (Tableau 6, compositions 1 et 2), dont les caractéristiques géochimiques se rapprochent alors de celles du type «A» de Mero.

L'analyse des micronodules, compte tenu à la fois du sédiment qui les enferme et du cortex qui les enveloppe, nous a permis de souligner les points suivants:

- 1) Quel que soit le groupe de micronodules analysé, on note l'importance et la complexité du matériel hérité.
- 2) Les transformations discrètes des oxydes sont liées à l'enrichissement en manganèse ou éléments de transition.
- 3) L'ordre paragénetique des oxydes varie non seu-

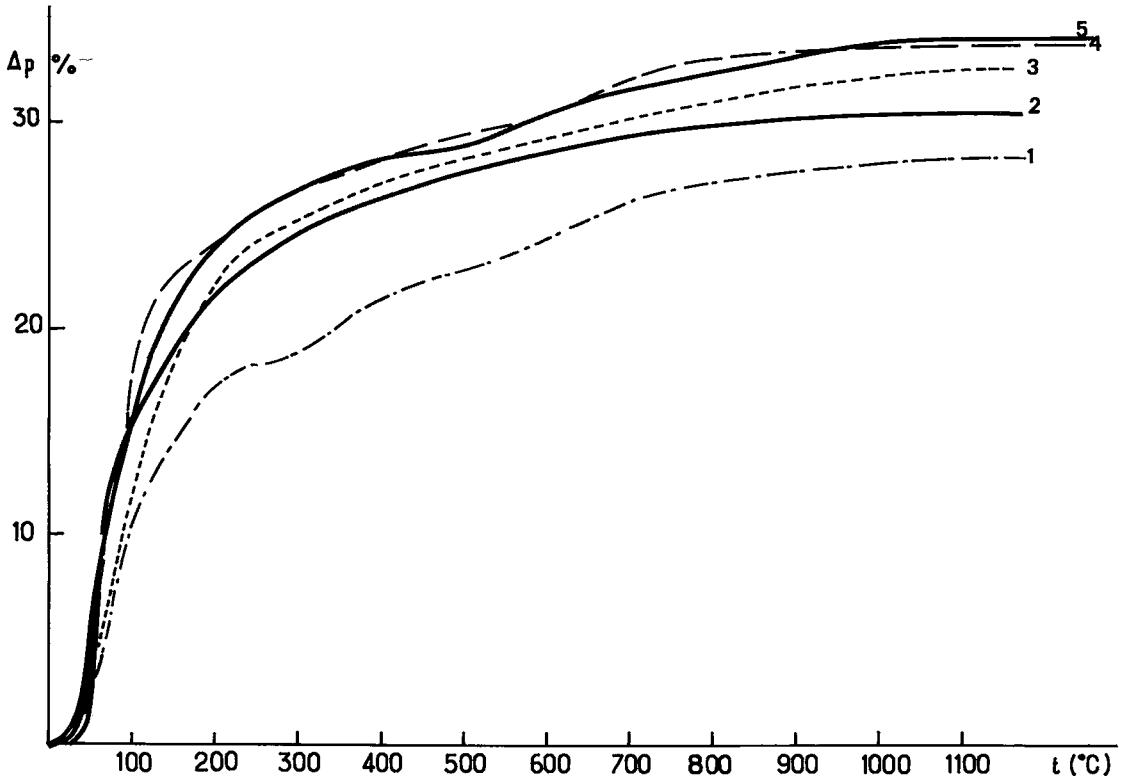
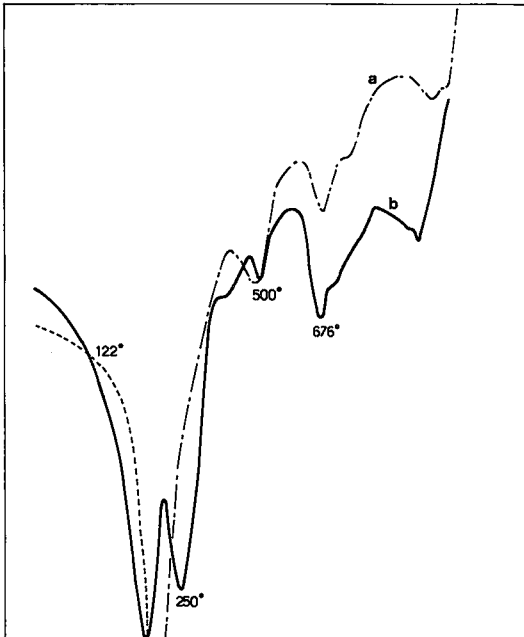


FIG. 8. Courbes thermopondérales: 1 micronodule à prédominance de todorokite, 2 micronodule à todorokite + birnessite z-désordonnée, 3 micronodule à prédominance de birnessite z-désordonnée, 4 micronodule à birnessite z-désordonnée + complexes silico-ferriques amorphes, et 5 complexes silico-ferriques amorphes.



lement en fonction des paramètres du milieu, mais aussi en fonction du substrat; c'est ainsi que la todorokite apparaît directement dans le premier type de micronodules, alors que, dans les autres types, elle évolue à partir de la birnessite z-désordonnée.

4) Le remplacement du sédiment (boues rouges) par les oxydes de manganèse, tout comme celui des tests de radiolaires ou foraminifères, signalé par Stoffers *et al.* (1984) dans le Pacifique, doit être interprété comme un processus d'enrichissement du nodule. Ce processus est susceptible d'expliquer la présence des nodules riches en manganèse et éléments de transition là où le noyau est pratiquement inexistant. La variation, souvent observée, des paramètres géochimiques des micronodules en fonction de leur diamètre, permet d'envisager le passage d'un type de concentration à un autre, lié au processus d'enrichissement en manganèse et éléments de transition. Nous avons signalé dans la zone d'oxydation des grands

FIG. 9. Courbes thermodifférentielles: a micronodule à prédominance de todorokite, b micronodule à todorokite + birnessite z-désordonnée.

gisements terrestres (Perseil et Grandin 1985) la possibilité de remplacement de tous les éléments du grenat (y compris le silicium et l'aluminium) par le manganèse. Krauskopf (1956) indique qu'il existe une superposition du comportement géochimique de la silice et de l'alumine à des pH assez élevés et assez proches du milieu des nodules polymétalliques.

Quelques-uns parmi les exemples abordés laissent valablement supposer que le manganèse n'est nullement indifférent à son substrat dans le processus de formation des concrétions comme aux associations qu'il formera. Cette étude fournit une illustration du rôle des ponces rhyolitiques et des boues rouges comme supports, mais il ne faut pas minimiser l'importance des supports basaltiques.

Les recherches sur les nodules polymétalliques des divers bassins de l'Océan Indien (Leclaire et Perseil 1979) ont en effet mis en évidence l'importance des noyaux basaltiques. Les produits d'altération des fragments basaltiques renferment des micronodules dont les paramètres géochimiques sont voisins de ceux des concentrations ferro-manganésifères reliées à une activité hydrothermale (Boulègue *et al.* 1984). L'étude comparative de ces paramètres et des données fournies dans ce travail facilitera la compréhension des divers aspects de la formation des nodules polymétalliques.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma gratitude au Professeur Robert F. Martin, ainsi qu'au rapporteur anonyme, pour la pertinence de leurs observations, qui ont été bénéfiques non seulement à la présentation, mais aussi à la compréhension de certains problèmes abordés. Ce travail a profité de l'appui technique de Monsieur J. Barrandon pour l'analyse ponctuelle et de Madame E. Malassis pour la présentation.

RÉFÉRENCES

- AKIMOTO, T., KINOSHITA, H. & FURUTA, T. (1984): Electron probe microanalysis study on processes of low-temperature oxidation of titanomagnetite. *Earth Planet. Sci. Lett.* **71**, 263-278.
- BOULÈGUE, J., PERSEIL, E.A., BERNAT, M., DUPRÉ, B., STOUFF, P. & FRANCHETEAU, J. (1984): A high-temperature hydrothermal deposit on the East Pacific Rise near 7°N. *Earth Planet. Sci. Lett.* **70**, 249-259.
- BURNS, V.M. & BURNS, R.G. (1978a): Post-depositional metal enrichment processes inside manganese nodules from the north equatorial Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.* **39**, 341-348.
- _____ & _____ (1978b): Authigenic todorokite and phillipsite inside deep-sea manganese nodules. *Amer. Mineral.* **63**, 827-831.
- CAULET, J.P., CLÉMENT, P. & MILLELIRI, P. (1984): GEOCORES: inventaire informatisé des roches et sédiments marins conservés au Muséum National d'Histoire Naturelle. *Bull. Mus. Natn. Hist. Nat. Paris (4e sér.)* **6**, section c, **3**, 215-243.
- CHUKHROV, F.V., GORSHKOV, A.I., BERESOVSKAYA, V.V. & SVITSOV, A.V. (1979): Contribution to the mineralogy of authigenic manganese phases from marine manganese deposits. *Mineral. Deposita* **14**, 249-261.
- FRÖHLICH, F. (1980): Néof ormation des silicates ferri-fères amorphes dans la sédimentation pélagique récente. *Bull. Minéral.* **103**, 596-599.
- GIOVANOLI, R. (1980): Vernadite is random-stacked birnessite. *Mineral. Deposita* **15**, 251-253.
- KRAUSKOPF, K.B. (1956): The geochemistry of silica in sedimentary environments. *Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. Publ.* **7**, 4-19.
- LECLAIRE, L., CLOCCHIATI, M., GIANNESINI P.J. & CAULET, J.P. (1977): Dépôts métallifères dans l'Océan Indien austral. Données nouvelles sur la genèse et la prospection des champs de nodules. *Bull. B.R.G.M. sect. II*, **1**, 13-42.
- _____ & PERSEIL, E.A. (1979): Minéralogie, composition chimique et milieu de sédimentation de concrétions polymétalliques dans l'Océan Indien. *Dans La Genèse des Nodules de Manganèse. Colloques Internationaux C.N.R.S.* **289**, 23-37.
- MARCHIG, V. & GUNDLACH, H. (1979): Diagenetic changes in the radiolarian oozes of the central Pacific and their influence on the growth of manganese nodules. *In La Genèse des Nodules de Manganèse. Colloques Internationaux C.N.R.S.* **289**, 55-60.
- MERO, J.L. (1965): *The Mineral Resources of the Sea*. Elsevier, Amsterdam.
- PERSEIL, E.A. (1985): Les noyaux des nodules polymétalliques dans le Bassin Indien Central. *Minéralogie et géochimie. 110è Congrès national des Sociétés Savantes (Montpellier, Sciences)* **1**, 219-231.
- _____ & GRANDIN, G. (1985): Altération supergène des protores à grenats manganésifères dans quelques gisements d'Afrique de l'Ouest. *Mineral. Deposita* **20**, 211-219.
- _____ & JEHANNO, C. (1981): Sur les caractères minéralogiques et géochimiques des nodules polymétalliques du Bassin Indien Central. *Mineral. Deposita* **16**, 391-407.

- POTTER, R. & ROSSMAN, G. (1979): The tetravalent manganese oxides: identification, hydration, and structural relationships by infrared spectroscopy. *Amer. Mineral.* **64**, 1199-1218.
- STOFFERS, P., GLASBY, G.P. & FRENZEL, G. (1984): Comparison of the characteristics of manganese micronodules from the equatorial and south-west Pacific. *Tschermaks Mineral. Petrog. Mitt.* **33**, 1-23.
- _____, _____, THIJSSSEN, T., SHRIVASTAVA, P.C. & MELGUEN, M. (1981): The geochemistry of coexisting manganese nodules, micronodules, sediments and pore waters from five areas in the equatorial and south-west Pacific. *Chem. Erde* **40**, 273-297.

Reçu le 12 août, 1986, manuscrit révisé accepté le 28 mars, 1987.