

## “ Tubotomaculum ” et nodules de manganèse Comparaison d'objets énigmatiques fossiles avec des concrétions marines et lacustres \*

par GUY PAUTOT \*\*, RENÉ TRUILLET \*\*\* et MICHEL HOFFERT \*\*\*\*

*Sommaire.* — Les « TUBOTOMACULUM », qui sont des corps cylindriques de quelques centimètres de longueur, se trouvent en assez grande quantité dans les « argiles numidiennes » du pourtour méditerranéen d'âge crétacé supérieur à oligocène.

Nous présentons nos observations effectuées au microscope électronique. Des analyses géochimiques et minéralogiques ont été réalisées. Les teneurs en manganèse et en fer sont comparables aux nodules polymétalliques qui tapissent le fond des océans actuels. Nous avons poursuivi la comparaison avec les teneurs en éléments de transition (cuivre, nickel, cobalt).

Le cœur des TUBOTOMACULUM est constitué de rhodocrosite et de sidérite, alors que le cortex est constitué d'oxydes de fer et de manganèse non cristallisés.

On discute de la localisation du dépôt grâce à l'analyse des sédiments encaissants.

Plusieurs hypothèses sur la nature et l'origine des TUBOTOMACULUM sont discutées : épigenèse de terriers d'animaux fouisseurs, pelotes fécales minéralisées, fragments de vase roulés, figures de concrétionnement particulier des oxydes de fer et de manganèse.

### 1. — INTRODUCTION.

Il est fréquent de trouver sur le pourtour de la Méditerranée occidentale, dans les argiles du « flysch interne » ou « argiles numidiennes » [Caire, 1970], encore appelées « argille scagliose » (A.S.) ou « argille varicolori » par les auteurs italiens, des objets de forme cylindrique, conique ou aplatie, de couleur marron foncé, recouverts la plupart du temps par de nombreuses petites pustules ou protubérances ellipsoïdales (fig. 1).

Ces objets sont appelés des TUBOTOMACULUM. Leur longueur varie entre 2 et 8 cm, leur diamètre entre 0,3 et 1,5 cm. Les petites pustules ont une longueur de 1 à 2 mm ; quelquefois, leur grand axe est allongé parallèlement au grand axe du corps principal ; sinon, la disposition de ces dernières est irrégulière.

L'encaissant est constitué d'argiles dont les âges se situent entre le Crétacé supérieur et l'Oligocène [Duée, 1969 ; Truillet, 1968] ainsi que Miocène inférieur pour Wezel (communication orale). Ces argiles, dites varicolores, présentent une gamme de teintes souvent vives allant du gris clair ou beige au bleu, rouge ou lie-de-vin. Les TUBOTOMACULUM

se ramassent le plus souvent sur des surfaces lessivées par les eaux de ruissellement. Les glissements continuels, qui se produisent chaque hiver, ont désorganisé la stratification des argiles sur de fortes épaisseurs. Néanmoins, il semble que les TUBOTOMACULUM n'aient jamais présenté d'orientation préférentielle dans les argiles.

### 2. — CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES « TUBOTOMACULUM » ET DES AUTRES CORPS ASSOCIÉS.

Si la plupart des TUBOTOMACULUM présentent une structure et une couleur homogènes, les échantillons de plus forte densité montrent souvent un

\* Contribution n° 257 du Dépt scientifique, Centre océanologique de Bretagne.

\*\* Centre océanologique de Bretagne, B.P. 337, 29273 Brest.

\*\*\* Lab. de géologie, Faculté des sciences, Alger et L.A. au C.N.R.S. n° 145 (Géologie méditerranéenne).

\*\*\*\* Centre de sédimentologie et géochimie de la surface, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.

Note déposée le 27 juin 1974, présentée à la séance du 2 novembre 1974.

noyau central et un cortex plus foncé comprenant les pustules. Le cortex a parfois tendance à se desquamer (échantillons les plus foncés situés au centre de la fig. 1).



FIG. 1. — TUBOTOMACULUM et PLAQUES. Les trois échantillons situés dans la moitié gauche de la photographie représentent des TUBOTOMACULUM typiques. L'échantillon de gauche (S 266 L), de densité 2,8, très dur, est couvert de petites pustules ellipsoïdales dont le grand axe est le plus souvent allongé parallèlement au grand axe du corps principal ; la périphérie a une teinte plus sombre. Les deux échantillons plus foncés, situés plus à droite, montrent un noyau central et un cortex noirâtre qui a tendance à se desquamer. A droite, sont représentés deux échantillons de « plaques », de teinte et de composition chimique semblables à celles des TUBOTOMACULUM (tabl. I) ; des TUBOTOMACULUM avec les pustules caractéristiques prennent naissance sur ces « plaques ».

Dans les mêmes conditions de gisement que les TUBOTOMACULUM classiques décrits précédemment, nous avons trouvé des corps longs de 1 à 2 cm et de 0,2 à 0,8 mm de section, avec des excroissances se présentant comme des micropustules. Ces excroissances sont toutefois moins abondantes et moins bien formées que les pustules des TUBOTOMACULUM. Par leur forme et par leur teinte, ces corps ressemblent à de petits TUBOTOMACULUM. Nous les avons appelés MICROTUBOTOMACULUM. Dans les affleurements du nord-est sicilien, il ne semble pas qu'il y ait de taille intermédiaire entre les TUBOTOMACULUM et les MICROTUBOTOMACULUM.

Accompagnant les TUBOTOMACULUM et les autres corps associés, on peut observer d'abondants fragments d'argiles indurées de teintes marron à noirâtre. Manifestement, les analyses chimiques vont le confirmer, il s'agit d'argiles encaissantes qui ont subi un enrichissement en sels métalliques. On peut observer tous les intermédiaires entre les argiles varicolores encore malléables et les niveaux les plus indurés, aux teintes noirâtres. C'est toujours au voisinage des TUBOTOMACULUM que l'on observe ces niveaux indurés.

B.S.G.F., (7), XVII, 1975, n° 1.

Dans un affleurement d'argiles à TUBOTOMACULUM, était visible une « plaque » de teinte marron foncé, épaisse de 6 à 8 mm, apparaissant sur une largeur de 50 cm et que nous avons suivie en creusant, sur près de 1 m de profondeur [R. Truillet, 1968, p. 339]. Deux fragments de cette « plaque » sont reproduits sur la partie droite de la figure 1. Cette « plaque » semble couchée dans la stratification (dans la mesure où la distribution des couleurs permet de la deviner). La surface de base est à peu près plane. Sur la face supérieure, irrégulière, s'individualisent des corps allongés prenant naissance au cœur même de la « plaque » : certains constituent de véritables TUBOTOMACULUM avec des pustules caractéristiques (échantillon à droite sur la fig. 1).

Procédant probablement d'un phénomène de même ordre, il faut signaler les bancs à septas (fig. 2).

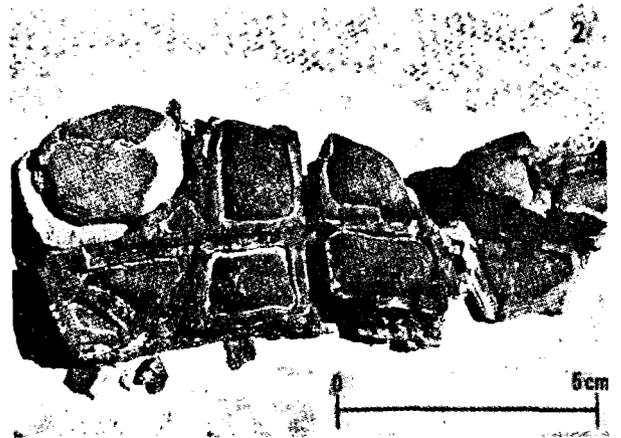


FIG. 2. — Banc à septas rencontré dans les argiles à TUBOTOMACULUM. Des galets arrondis sont séparés par des septas rectilignes qui forment à la base un « plancher » continu épais de 3 à 5 mm. On remarquera que chaque galet a une enveloppe propre, indépendante de celle du galet voisin ; l'épaisseur des septas est constante. La taille et la forme de chaque galet conditionnant le dessin des loges qui les contiennent, on peut penser que la formation des septas est postérieure à la mise en place des galets.

Nous les avons rencontrés dans le NE sicilien [Truillet, 1968, p. 402], dans un important affleurement d'« argille scagliose » varicolores, à une vingtaine de mètres de niveaux à TUBOTOMACULUM. Les bancs à septas affleurent au-dessous d'une barre de phtanites blanches ; le banc le plus typique a été observé sur une dizaine de mètres carrés. La photographie 2 montre à la base un « plancher » continu, épais de 3 à 5 mm, constitué d'une matière noirâtre. La même matière forme des septas verticaux, rectilignes, hauts de 15 mm, d'orientations diverses, faisant entre eux des angles aigus ou obtus. Ainsi s'individualisent des loges occupées par des « galets » de teinte marron à rougeâtre. Ces « galets »

sont arrondis, leur taille va de 0,5 à 3 cm ; leur forme semble conditionner le dessin des loges. Ce qui conduirait à penser que les septas se sont formés alors que les « galets » se trouvaient déjà en place. Un septa séparant deux loges contiguës est formé d'une double paroi. Sur l'échantillon de la figure 2, toutes les loges sont ouvertes à la partie supérieure. Sur d'autres échantillons, nous avons observé que le système septas-galets peut se répéter suivant trois étages superposés.

Voisinant avec les TUBOTOMACULUM les plus typiques, cylindriques, entièrement recouverts de pustules, il existe une grande variété d'échantillons aux formes irrégulières : cônes allongés, droits ou tordus, en spirale, ou sans aucune forme particulière, sans pustules. Ces échantillons n'ont plus qu'une lointaine ressemblance avec les TUBOTOMACULUM, si ce n'est la teinte et une composition chimique semblables comme nous le verrons. Tous ces corps ont une structure assez compacte, leur densité varie entre 1,6 et 2,6. Il n'est pas rare de trouver des corps pyriteux ou de beaux cristaux de pyrite dans les mêmes formations.

### 3. — GÉOCHIMIE DES TUBOTOMACULUM, CORPS ASSOCIÉS ET DES NODULES DE MANGANÈSE.

L'analyse chimique montre que TUBOTOMACULUM, MICROTUBOTOMACULUM, plaques et corps associés de formes irrégulières ont des teneurs importantes en fer (14,5 à 29,5 %) et en manganèse (14 à 22,5 %). De plus, il n'y a pas de variations significatives entre les différentes formes, ni entre le cortex et le cœur des TUBOTOMACULUM. Dans les sédiments actuels, les seuls corps ayant une composition chimique comparable sont les nodules polymétalliques ; ceci nous incite à tenter une comparaison.

Sur le tableau 1, on voit que les teneurs en fer et en manganèse des TUBOTOMACULUM au sens large sont comparables à celles des nodules océaniques. Pour pousser plus loin la comparaison, nous avons effectué des dosages des éléments de transition qui sont la caractéristique économiquement importante des nodules de manganèse. Ici, les valeurs sont très différentes, et l'on peut dire que la teneur en éléments de transition des TUBOTOMACULUM est très basse, égale ou inférieure aux valeurs minimales des nodules du Pacifique prélevés à des profondeurs assez importantes.

Cependant, les concrétions polymétalliques ne se trouvent pas uniquement dans les grands fonds océaniques mais à toutes profondeurs et même en eau douce [Goodell *et al.*, 1970 ; Cronan, 1972 ; Glasby, 1973 ; Cronan et Thomas, 1972 ; Elderfield, 1972].

Les nodules lacustres [Cronan et Thomas, 1972 ; Edgington et Callender, 1970 ; Calvert et Price,

1970], les nodules de type « hydrothermal » (Santorin, Stromboli, dorsale Est-Pacifique), ainsi que ceux de type « diagénétique » (loch Fyne, fjords, plateau continental japonais) sont caractérisés par une teneur en manganèse et en fer comparable à celle des nodules des bassins océaniques, et par une teneur en Ni, Cu et Co très faible [voir tabl. II d'après E. Bonatti *et al.*, 1972].

### 4. — MINÉRALOGIE DES TUBOTOMACULUM.

L'élément dominant du cœur des TUBOTOMACULUM est le couple rhodocrosite-sidérite (fig. 3) qui sont des indicateurs d'un milieu faiblement réducteur. La fraction argileuse, réduite, est composée essentiellement de montmorillonite et de kaolinite. Des minéraux interstratifiés irréguliers sont présents en très faible quantité. Le quartz, très peu abondant, n'est pas représenté dans la fraction argileuse, ce qui indique une taille relativement grossière de ces grains.

Le cortex, dont la partie externe est recouverte de pustules, est constitué d'un mélange d'oxydes de fer et de manganèse non cristallisés. La fraction argileuse est formée par une dominante de montmorillonite, de kaolinite et d'une fraction très réduite d'illite et de goëthite. Le quartz est absent.

Les TUBOTOMACULUM sont donc des corps dont le cœur et le cortex sont de nature minéralogique différente, bien que leur composition chimique soit comparable.

### 5. — LE « CŒUR » DU TUBOTOMACULUM. COMPARAISON AVEC LES NODULES.

Les fragments rocheux ou débris organiques déposés sur le fond des océans se recouvrent lentement d'un mince film de ferromanganèse qui leur donne une patine rougeâtre puis brune et enfin noire. Cette couche s'épaissit graduellement pour former un nodule polymétallique. Ces nodules de couleur noir jais présentent un aspect lustré lorsqu'ils viennent d'être prélevés. En séchant, ils deviennent bruns et d'aspect plus terreux. Ils ont des formes variées : arrondies à ellipsoïdales, agglomérats, bothryoïdes, croûtes [H. G. Goodell *et al.*, 1970].

Le cœur peut être constitué de débris de délestage d'icebergs, de ponce volcanique, d'otolites de baleines, de dents de requins, de verre volcanique, d'argiles indurées, de roches altérées, de zéolites, etc. Ce cœur est frais, altéré, transformé ou totalement détruit et disparu ; il représente une fraction plus ou moins importante du nodule suivant son âge et sa vitesse de formation.

Nous avons effectué un grand nombre de sections dans des TUBOTOMACULUM de toutes formes, pour trouver le germe de cette concrétion, mais nous n'en avons jamais trouvé. Dans les nodules, lorsque le

G. PAUTOT, R. TRUILLET ET M. HOFFERT

Echantillons	Mn %	Fe %	Ni %	Co %	Cu %	
<u>TUBOTOMACULUM****et corps associés</u> (nord-est sicilien)						
- TUBOTOMACULUM type	22,50	14,50	tr.	0,005	0,003	
- MICROTUBOTOMACULUM	20,00	18,30	tr.	0,07	0,003	
- "plaque"	14,70	25,20	tr.	0,01	0,03	
- TUBOTOMACULUM de forte densité (2,6, fig. 1)	26,50	23,90				
- TUBOTOMACULUM de faible densité (1,6 à 1,9)	12,30	25,00				
- MICROTUBOTOMACULUM	14,00	31,30				
- TUBOTOMACULUM issu d'une plaque	16,10	21,24				
- Plaque dont sont issus les TUBOTOMA- CULUM	15,80	21,00				
- Forme mal définie avec ou sans pustules	16,00	24,50				
- Nodules marron de 1 à 4 mm de dia- mètre accompagnant les TUBOTOMACULUM	19,00	15,60				
- Septa du "banc à septas"	17,40	30,50				
- Nodule du "banc à septas"	16,10	26,65				
- Cortex d'un TUBOTOMACULUM (E du Monte Cuculo)	23,00	30,50				
- Coeur du précédent	26,50	23,90				
- Cortex d'un TUBOTOMACULUM (Monte Castelluzzo)	21,80	26,60				
- Coeur du précédent	21,40	26,30				
<u>Nodules océaniques*</u>						
- Atlantique	moyenne	16,18	21,82	0,297	0,309	0,109
	maximum	37,69	41,79	1,41	1,01	0,884
	minimum	1,32	4,76	0,019	0,017	0,022
- Pacifique	moyenne	19,75	14,29	0,722	0,381	0,366
	maximum	34,60	32,73	2,37	2,58	1,97
	minimum	9,87	6,47	0,161	0,052	0,034
- Indien	moyenne	18,03	16,25	0,510	0,279	0,223
	maximum	29,16	26,46	2,01	1,04	1,38
	minimum	11,67	6,71	0,167	0,068	0,029
<u>Nodules lacustres</u>						
- Loch Fyne (Ecosse)**						
Nodule A	30,70	3,99	0,0075	0,0115	0,0020	
Petit nodule	25,56	5,53	0,0060	0,0115	0,0020	
- Lac Michigan***						
Maximum	15,0	18,0	?	0,008	0,0015	
Minimum	1,0	2,5	?	0,001	0,0003	

TABLEAU I. — Teneurs en éléments métalliques des TUBOTOMACULUM et formes associées et des nodules polymétalliques.

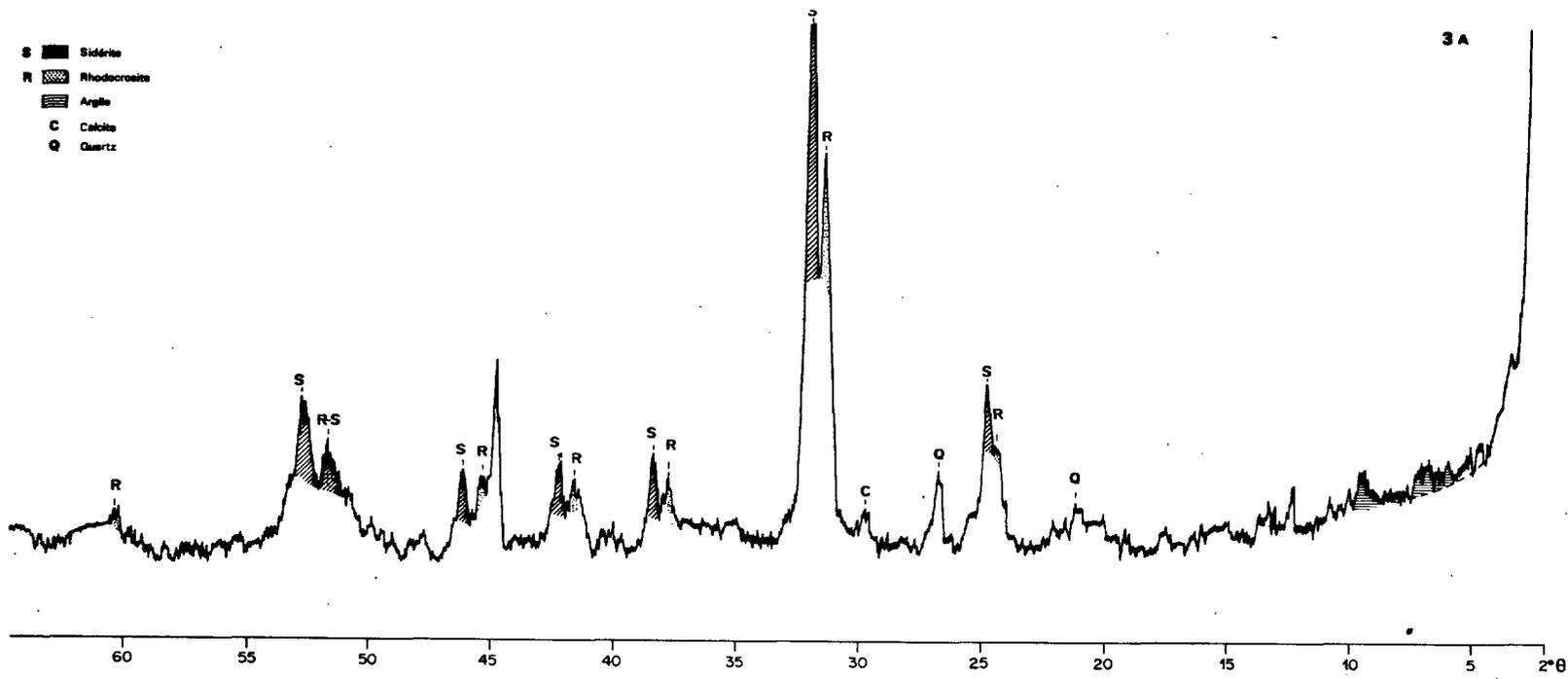
\* : Cronan D. S. [1972].

\*\* : Edington D. N. et Callender E. [1970].

\*\*\* : Calvert S. E. et Price N. B. [1970].

\*\*\*\* : Analyses des éléments de transition réalisées au C.O.B. par H. Bougault et P. Cambon.

- S ■ Sidérite
- R ▨ Rhodocrosite
- Argile
- C Calcite
- Q Quartz



- I ■ Illite
- K ■ Kaolinite
- ▨ Oxydes et hydroxydes Fe, Mn

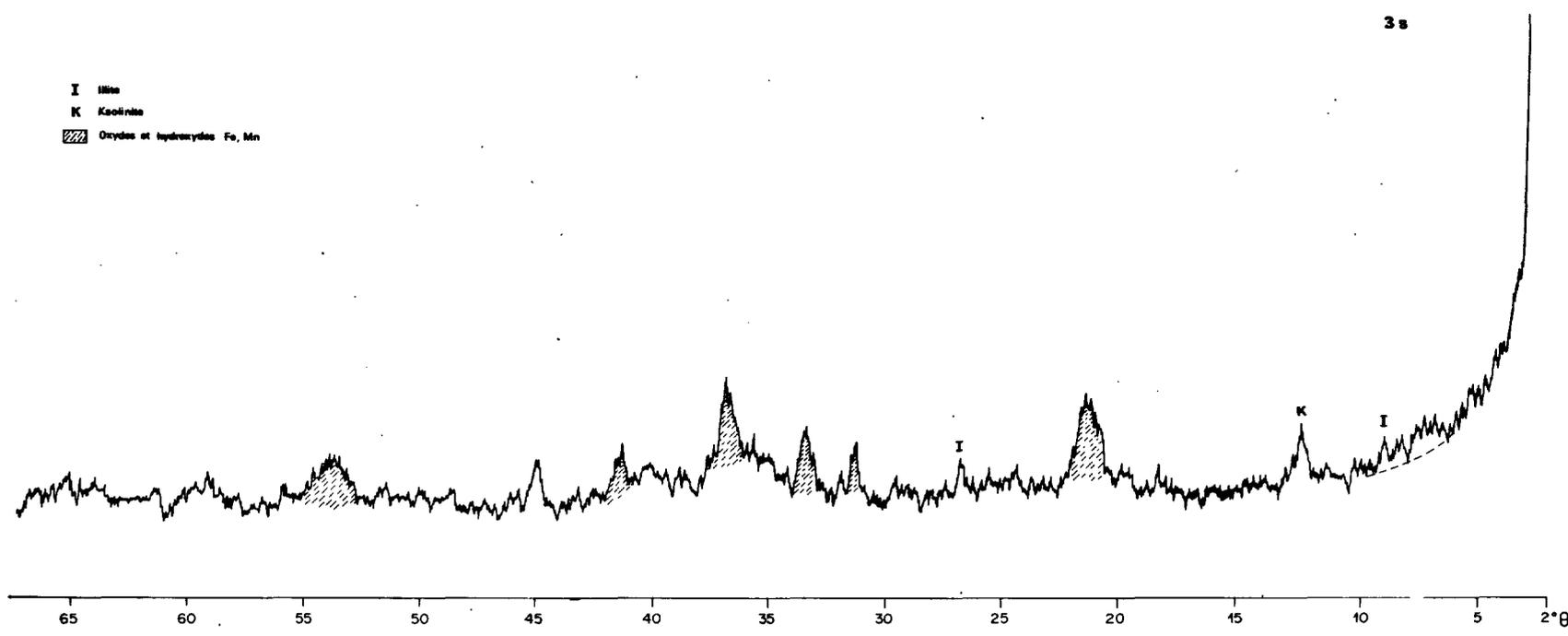


FIG. 3. — Diffractogrammes de poudre.

3A : le cœur du TUBOTOMACULUM est constitué principalement de sidérite et de rhodocrosite.  
 3B : le cortex du TUBOTOMACULUM est constitué principalement d'oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse.

Concrétions Fe-Mn*	Mn %	Fe %	Ni %	Co %	Cu %
1) "hydrogènes"					
a. Blake Plateau	15,7	15,5	0,59	0,41	0,14
b. nodule du Pacifique Equatorial	18,6	17,3	0,32	0,44	0,11
c. nodule du Pacifique Sud	15,5	12,7	0,33	0,26	0,16
2) "hydrothermales"					
d. Santorin	0,6	35,0	< 0,0005	< 0,0005	0,003
e. Stromboli	9,2	28,0	0,001	0,0015	0,016
f. Dorsale est-Pacifique	0,58	31,1	0,009	0,003	0,006
3) "diagénétiques"					
g. nodule du loch Fyne (Ecosse)	30,70	3,99	0,0075	0,0115	0,002
h. nodule d'un fjord de Colombie Britannique	40,5	4,6	0,0470	0,0170	0,0110
i. nodule au large du Japon (260 m)	37,0	0,6	0,051	0,092	0,010

TABL. II. — Teneurs en éléments métalliques de différents types de nodules actuels

\* : D'après Bonatti *et al.* [1972].

germe est dissout, il reste habituellement une cavité. Or, il n'y en a pas dans le cas des TUBOTOMACULUM. Le cœur des TUBOTOMACULUM étant constitué de rhodocrosite et de sidérite, nous avons cherché à savoir si ce type de dépôt est connu dans les sédiments actuels. N. V. Logvinenko *et al.* [1970], D. C. Lynn et E. Bonatti [1965] signalent des concrétions de rhodocrosite par grandes profondeurs dans l'Océan Pacifique et particulièrement dans le domaine des fosses : Japon-Kouriles et Pérou-Chili.

Logvinenko *et al.* [1970] retracent les processus géochimiques qui conduisent à des concrétions morphologiquement très semblables aux TUBOTOMACULUM : ce sont des pièces arrondies de 4 à 8 cm de longueur et de 7 à 12 mm de diamètre. C'est le phénomène d'oxydo-réduction qui présiderait à la redistribution des métaux. Les phénomènes de migration des ions, de diffusion, de dissolution en milieu réducteur et l'insolubilisation en milieu oxydant ont été étudiés par Michard [1970] et Kornprobst *et al.* [1973]. En milieu réducteur, en *B.S.G.F.*, (7), XVI, 1975, n° 1.

présence de matière organique et de carbonate de calcium, se forment par exemple des bicarbonates de manganèse qui migrent vers l'interface oxydant-réducteur. A cette interface, il y a dissociation du bicarbonate en solution, avec précipitation de carbonate de manganèse qui forme les germes de cristallisation dans le sédiment. Des *grains* de rhodocrosite sont parfois visibles dans les sédiments. La croissance peut alors se poursuivre à l'interface par agglutination de cristaux nouvellement formés.

#### 6. — LE CORTEX DES TUBOTOMACULUM. COMPARAISON AVEC LES NODULES POLYMÉTALLIQUES.

Le cortex des nodules polymétalliques consiste en un mélange intime de composants minéraux détritiques et d'oxydes hydratés de fer et de manganèse amorphes ou cristallisés à des états variés d'oxydation.

Le cortex des TUBOTOMACULUM est habituellement constitué d'anneaux à dominante rouge et

« TUBOTOMACULUM » ET NODULES DE MANGANÈSE

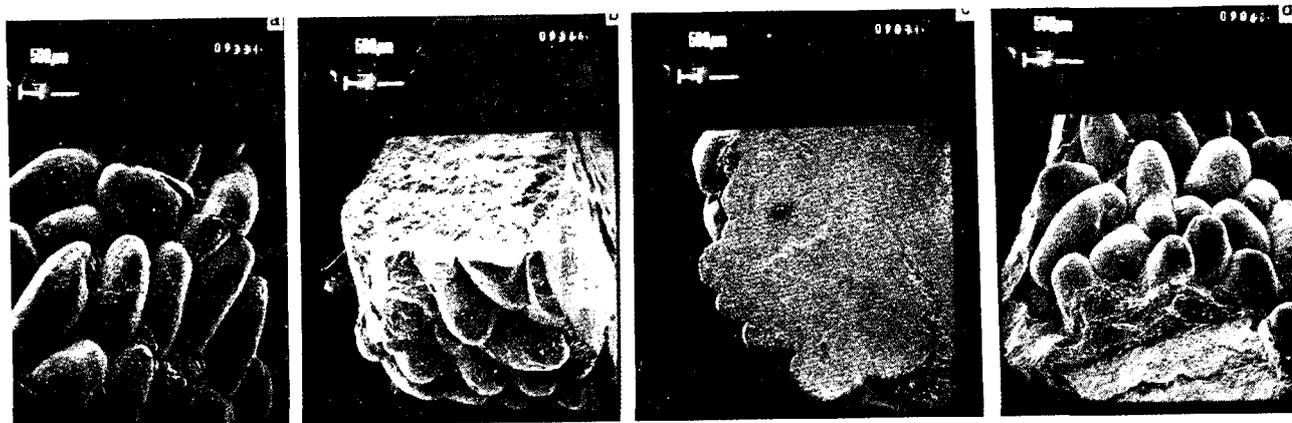


PLANCHE I

Fig. a, b, c et d. — Planche montrant les relations des pustules avec le cortex des TUBOTOMACULUM. On ne distingue pas de trace de la partie inférieure des pustules. Photographies au microscope électronique réalisées au C.O.B. par L. Pastouret.

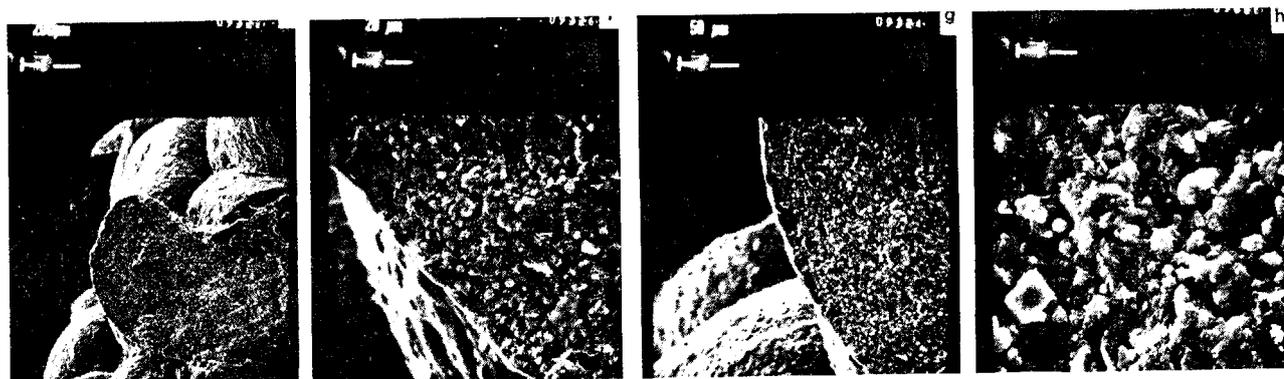


PLANCHE II

Fig. e, f, g et h. — Planche montrant ces mêmes pustules à des grossissements croissants. Photographies au microscope électronique réalisées par L. Pastouret.

noire formés d'oxydes de fer et de manganèse amorphes ou peu cristallisés et en faible proportion de minéraux argileux détritiques. Les petites pustules, qui sont les protubérances externes du cortex, ne semblent pas plaquées sur ce cortex, mais elles en font partie très intimement et l'on ne distingue pas de trace de leur partie inférieure (photographies microscope électronique, texte-plates I et II) dans le cortex lui-même. Bien que l'examen macroscopique évoque une forme ovoïde, l'examen microscopique des pustules permet de voir que ce sont des protubérances plus ou moins aplaties qui forment la partie la plus externe du cortex. Un film de couleur noire et à éclat métallique recouvre toute la partie externe du cortex (fig. microscope électronique). Ces protubérances évoquent d'assez près les protubérances de nombreux nodules polymétalliques (texte-plates III et IV).

7. — LES SÉDIMENTS ENCAISSANTS.

Afin de mieux situer les TUBOTOMACULUM, nous avons analysé chimiquement et minéralogiquement le sédiment encaissant.

Dans le tableau III nous présentons une *comparaison géochimique* entre l'encaissant des TUBOTOMACULUM et différents types de sédiments actuels. Les argiles varicolores ont une teneur en métaux proche des argiles des grands fonds. Leur pauvreté en manganèse les place du côté des sédiments de type atlantique.

A l'intérieur de ces argiles varicolores, on peut différencier les niveaux indurés qui dérivent des argiles meubles encaissantes. Les niveaux de couleur gris-vert montrent une déplétion en manganèse et un enrichissement en fer. Les niveaux de couleur rouge ont un enrichissement en fer presque compa-

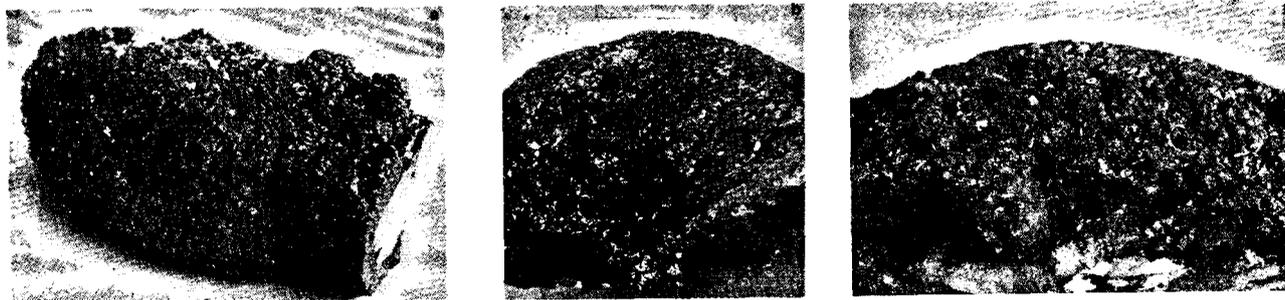


PLANCHE III

FIG. a, b et c. — Photographies de nodules polymétalliques prélevés au cours de mission du C.N.E.N.O. On distingue le cœur et le cortex, ainsi que les protubérances sur la partie externe du cortex. Photographies réalisées au G.O.B. par R. Kerbrat.

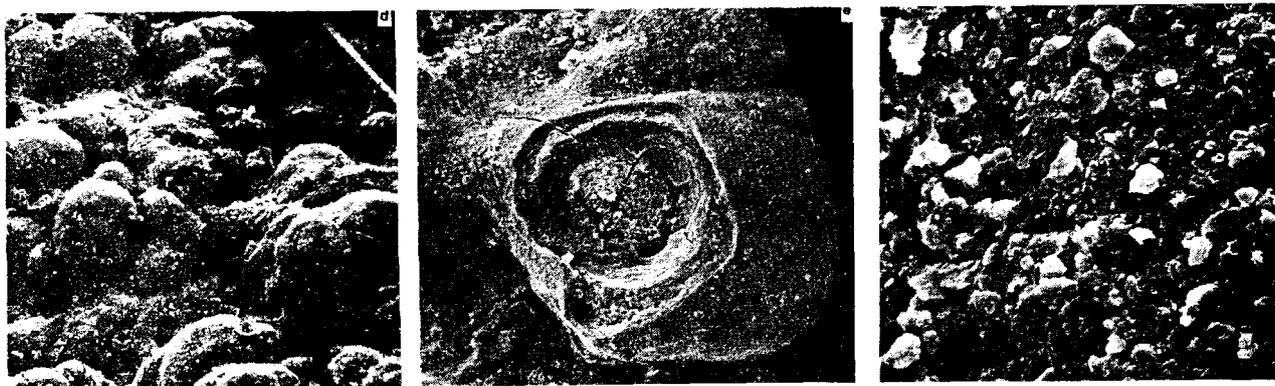


PLANCHE IV

FIG. d, e et f. — Photographies au microscope électronique des concrétionnements constituant la pellicule externe du cortex des nodules polymétalliques [d'après R. H. Fewkes, 1973]. Ces concrétionnements peuvent être comparés aux pustules des figures des planches I et II. La photographie de la planche IV est à comparer avec les photographies de la planche I. La photographie e, planche IV est une des structures bothryoïdales partiellement fracturée. La photographie planche IV est à comparer avec les photographies de la planche II.

rable à celui des *TUBOTOMACULUM* classiques, mais ils sont beaucoup plus pauvres que ces derniers en manganèse.

L'analyse minéralogique des niveaux marneux ou plus consolidés, de couleur rouge ou gris-vert, montre qu'il y a présence de quartz dans la fraction grossière et une absence presque totale dans la fraction argileuse.

La calcite est presque totalement absente. F. Wezel [1970] et d'autres auteurs avaient déjà observé ce fait dans des formations analogues. La fraction argileuse est constituée par de la montmorillonite et de la kaolinite dominantes et de l'illite en quantité réduite. Cette abondance de kaolinite et de montmorillonite indique que ces sédiments n'ont pas subi de diagenèse importante dans des conditions de température élevée.

B.S.G.F., (7), XVII, 1975, n° 1.

#### 8. — LOCALISATION DU DÉPÔT — DISCUSSION.

La composition géochimique des *TUBOTOMACULUM*, *MICROTUBOTOMACULUM* et *PLAQUES* permet de les situer dans le diagramme génétique triangulaire de E. Bonatti *et al.*, [1972] (fig. 4). Le rapport Mn/Fe compris entre 2 et 0,5 place ces concrétions dans le domaine des nodules du type « hydrogène », c'est-à-dire formés par une précipitation lente à partir de l'eau de mer.

La position excentrée des valeurs des *TUBOTOMACULUM* au sens large sur le diagramme de E. Bonatti *et al.* [1972] est liée à la faible teneur en métaux de transition. Les concrétions du type « hydrogène » sont habituellement riches en Cu + Ni + Co. Leur concentration dans les concrétions dépend en grande partie de la concentration de ces métaux dans les masses d'eau dont ils dérivent.

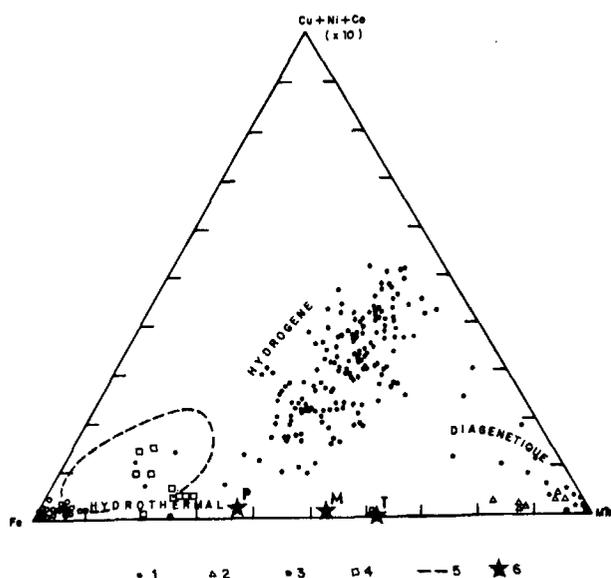


FIG. 4. — Diagramme de Bonatti *et al.* [1972] utilisé pour la classification et la genèse des dépôts ferro-manganeux sous-marins.

1. nodules du Pacifique ; 2. dépôts du loch Fyne ; 3. dépôts hydrothermaux de Santorin, Stromboli et Afar ; 4. sédiments riches en fer de la dorsale de l'Est Pacifique ; 5. aire des dépôts de la mer Rouge ; 6. T : TUBOTOMACULUM, M : MICROTUBOTOMACULUM, P : PLAQUES.

Si les concrétions du Pacifique sont riches en (Cu + Ni + Co) à cause du volcanisme intense de ce bassin, on peut penser réciproquement que la faible teneur en (Cu + Ni + Co) des TUBOTOMACULUM est due à un dépôt dans un bassin sans marques évidentes de volcanisme.

La *minéralogie* de ces TUBOTOMACULUM avec un cœur constitué de rhodocrosite et de sidérite, rappelle des corps morphologiquement comparables et décrits par grandes profondeurs dans l'océan Pacifique, particulièrement dans le domaine des fosses. La tendance réductrice est soulignée par la pyrite associée. D'après les analyses de N. V. Logvinenko *et al.* [1970], les conditions conduisant à la formation de concrétions de carbonates de fer et de manganèse sont réunies dans les premiers stades de diagenèse précoce si les sédiments sont relativement riches en matière organique. De telles conditions existent en milieu océanique dans les zones de transition entre les sédiments côtiers très réducteurs et les variétés pélagiques oxydés. Après la formation du cœur par des carbonates de fer et de manganèse, celui-ci est recouvert d'une couche d'oxydes de fer et de manganèse suivant un processus similaire à celui des nodules de manganèse.

L'étude des *sédiments encaissants* apporte d'autres arguments sur la situation de ces dépôts. La fraction abondante de quartz dans la fraction grossière du

sédiment et son absence presque totale dans la fraction argileuse, suggère la proximité relative des sources d'apports terrigènes et une érosion. Cette déduction semble en accord (sur les quelques échantillons étudiés) avec l'association argileuse dominante montmorillonite-kaolinite qui indique une provenance détritique correspondant à un climat chaud et hydrolysant [G. Millot, 1964].

L'absence presque totale de calcite suggère soit que les organismes calcaires ont été remobilisés au cours de l'épigenèse, soit qu'ils aient été dissous au cours de la sédimentation (profondeur supérieure au niveau de compensation des carbonates). F. Wezel [1970] pense que ces dépôts se sont effectués à une profondeur supérieure à la surface de compensation des carbonates car il a récolté dans les argiles varicolores quelques organismes reconnus comme typiques des grandes profondeurs par Benson, tels des Ostracodes, des restes organiques résistant à la dissolution, comme des dents de poissons et des otolites, enfin une faune de Foraminifères arénacés, similaire à celle décrite par Bandy et Rodolfo [1964] dans la zone Pérou-Chili. F. Wezel [1970] assimile les argiles varicolores aux « argiles rouges » des grands fonds. La comparaison nous semble impropre car nous voyons dans ce type de dépôt une influence continentale marquée et peu ou pas d'influence volcanique, ce qui est contraire aux milieux pélagiques francs. Ce type de dépôt peut correspondre d'assez près aux sédiments de bas de marge continentale du type fossé ou glaciais.

#### 9. — NATURE ET ORIGINE DES TUBOTOMACULUM.

Dans ce contexte profond, à quoi peuvent correspondre ces corps minéralisés ?

L'explication habituellement avancée pour la formation des TUBOTOMACULUM est celle d'une épigenèse de terriers d'animaux fouisseurs de type crustacés et les pustules seraient les coprolithes de ces animaux [Durand-Delga, 1955]. Or, les biologistes [L. Laubier, comm. orale] observent que dans la faune épibenthique profonde actuelle, aucun animal n'amoncele ses rejets dans le terrier mais les expulse par l'un des orifices. J. C. Plaziat [1971], dans son analyse des traces animales et végétales fossiles, décrit des terriers de type Ophiomorpha, dont la paroi intérieure est lisse et la paroi extérieure constituée de boulettes sableuses. Cependant, ces terriers se fossilisent sous forme de « manchons », la précipitation diagénétique est faible, et le diamètre reste sensiblement constant sur toute la longueur puisque l'organisme générateur ne change pas de diamètre. La composition particulière de ces « manchons », avec concentration de CaCO<sub>3</sub>, d'oxydes de fer, de manganèse et d'argile, est expliquée par la sécrétion de l'animal qui sert de liant au cours de la fabrication des boulettes.

Echantillons	Mn %	Fe %	Ni %	Co %	Cu %
<u>Argiles du Nord-Est Sicilien :</u>					
1) Argiles varicolores type *	0,25	4,60	tr	tr	tr
	0,45	4,80	tr	tr	tr
2) Argiles indurées :					
- couleur rouge	4,10	16,50	0,005	tr	tr
- couleur gris-vert	0,10	5,00	0,005	0,003	tr
-----					
3) Matrice des pelotes du delta du Niger **	0,04	6,70			
4) Matrice argileuse des pelotes du plateau ivoirien ***	0,10	8,20			
	0,09	4,10			
-----					
5) Sédiment de faible profondeur ****	0,085		0,0055	0,0013	0,0048
6) Vase carbonatée profonde	0,10	0,90	0,003	0,0007	0,003
7) Argiles des grands fonds	0,67	6,5	0,022	0,0074	0,025
8) Argiles profondes de l'Atlantique	0,398		0,0079	0,0039	0,0115
9) Argiles profondes du Pacifique	1,25	7,0	0,0293	0,0116	0,0570

TABL. III. — Comparaison géochimique de l'encaissant des TUBOTOMACULUM, des pelotes fécales et des sédiments marins.

\* : analyses réalisées au C.O.B. par H. Bougault et P. Cambon.

\*\* : Porenga D. H. [1966].

\*\*\* : MARTIN L. [1972].

\*\*\*\* : Riley et Chester [1971].

Si certains TUBOTOMACULUM cylindriques correspondent peut-être à ce genre de terriers d'animaux fouisseurs, l'existence de formes coniques, effilées et torsadées, et de toute autre forme irrégulière, dérivent d'un autre processus de formation. Dans le cas d'une épigenèse, le phénomène aurait alors pris naissance à partir d'argiles riches en manganèse, de type comparable géochimiquement aux argiles profondes océaniques. Durant le processus de réduction, le manganèse bivalent contrôle le mouvement du fer [N. V. Logvinenko *et al.*, 1970] et ce dernier migre moins haut que le manganèse. Le sédiment s'appauvrit plus vite en manganèse qu'en fer ; le fer participe à la lithification de certains niveaux sédimentaires (présence des niveaux indurés) et le manganèse à la surface d'oxydo-réduction précipite en rhodocrosite dans les zones préférentielles que sont les terriers éventuels ou toute autre irrégularité.

B.S.G.F., (7), XVII, 1975, n° 5.

L'aspect morphologique des *pustules* évoque très nettement les grains ferrugineux authigènes ou pelotes fécales, minéralisés décrits dans les zones tropicales sur le plateau continental ou dans des lacs comme le lac Tchad. L. Martin [1972] en signale également sur la pente continentale jusque vers 800 m de profondeur.

Ces pelotes fécales ont une forme et une taille comparables aux *pustules*. Elles présentent les caractères morphologiques de pelotes fécales d'animaux benthiques. Ces animaux pourraient être des crabes fouisseurs dans les mangroves de delta, mais des Polychètes et des Gastéropodes peuvent également en être à l'origine. K. O. Emery et J. Hulsemann [1962] ont décrit par moins 500 m dans le bassin de Santa Barbara (Californie du Sud) des pelotes ovalaires de Polychètes respectivement de 1,1 mm de long et 0,65 mm de diamètre, et de 0,4 mm de long et 0,2 mm de diamètre.

« TUBOTOCAMULUM » ET NODULES DE MANGANÈSE

Il est enfin concevable [P. Giresse, 1969] que certaines de ces pelotes, les plus grosses en particulier, aient une origine inorganique. Il s'agirait alors de boulettes de vase constituées par voie purement mécanique à l'image des galets d'argile

en bordure des courants de dérive. Dans le tableau IV, nous avons reporté les teneurs en fer et manganèse de pelotes fécales de régions différentes et celles du produit de leur transformation, c'est-à-dire la goethite, la berthiérine et la glauconie.

Echantillons	Fe0%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Mn0%
Pelotes fécales du N°149 plateau continental	4,00	38,40	0,34
de Côte d'Ivoire * N°176	4,62	13,37	0,15
N°165	6,35	21,95	0,17
Pelotes fécales du delta du Niger **			
- pelotes grises	10,00		0,05
- pelotes de proto- glauconie	2,87	17,30	0,05
- pelotes brunes	1,00	46,82	0,11
- pelotes de berthiérine	20,00		0,20
"Oolites" du lac Tchad ***			
- Ech. 1094	49,5		0,26
- Ech. 14,63	36,0		0,13
Glauconite tertiaire ****	3,85	17,88	-
Glauconite récente	3,60	27,09	-
Berthiérine	37,61	3,66	0,2
Goethite	0,95	69,93	0,48

TABLEAU IV. — Teneurs en éléments métalliques de pelotes fécales minéralisées

\* : Martin L. [1972].

\*\* : Porrenga, D. H. [1966].

\*\*\* : Le Moalle, J. et Dupont, B. [1972].

\*\*\*\* : James H. L. [1966].

Que ce soit en domaine lacustre, en zone estuarienne, sur le plateau continental ou sur la marge continentale, la teneur en manganèse de ces pelotes est toujours infime et inférieure à 0,5 %, alors que la teneur en fer est très élevée. On pourrait donc considérer par exemple que les TUBOTOCAMULUM proviennent de fragments de vase plus ferme roulés par les courants. Les pustules pourraient provenir des pelotes fécales ou de boulettes de vase qui parsemaient le fond et qui se seraient agglutinées au cours du transport. Leur aspect aplati et imbriqué dans certains cas pourraient répondre à ce modèle. Cependant les différences de composition chimique sont importantes et on ne trouve pas de trace de la partie inférieure des pelotes dans le cortex (planches I et II).

Une autre hypothèse, qui nous semble plus vraisemblable, serait un mode de concrétionnement particulier des oxydes de fer et de manganèse. Le cœur peut s'être constitué à partir de la cristallisation de carbonates de fer et de manganèse à la limite d'oxydo-réduction dans des zones de biotur-

bation ou non. Lorsque ce cœur est constitué, il y a dans une phase ultérieure, dépôt en surface d'auréoles d'oxydes de fer et de manganèse, et les pustules ne seraient alors que des *figures de concrétionnement*. Des figures de ce type sont souvent visibles sur les nodules de manganèse (planches III et IV). La pellicule externe du cortex de ces nodules est constituée de nombreuses petites sphères brillantes qui sont parfois presque jointives. Cette hypothèse est géochimiquement plus en accord avec le modèle génétique de E. Bonatti *et al.* [1972]. Car si ce type de concrétion dérivait uniquement d'un processus diagenétique, le rapport Mn/Fe serait dans ce modèle supérieur à 10. De plus, dans le modèle organique, le cortex avec les pustules serait dû à l'épigenèse du manchon lui-même avec ses coprolithes. Ce manchon doit contenir plus de matière organique que la cavité centrale, il devrait donc y avoir du carbonate plutôt que des oxydes. Par contre, la constitution d'un cœur de carbonates de fer et manganèse dans des conditions à tendance réductrice, suivie de la formation d'auréoles d'oxydes

du type nodules de manganèse répond mieux à la constitution des TUBOTOMACULUM.

En conclusion, l'origine vraisemblable du cortex serait alors de nature « hydrogène » en relation avec un transit important des masses d'eau, ce qui paraît en accord avec la situation déduite du dépôt.

#### 10. — PROBLÈME PARTICULIER DES « PLAQUES » — « HARDGROUNDS ».

La présence de « plaques » géochimiquement comparables aux TUBOTOMACULUM, emballées dans le même encaissant, est à présent considérée.

On compare les analyses géochimiques de ces plaques à des analyses de « hardgrounds » et nodules associés du Briançonnais et de Sicile (tabl. V). Les « hardgrounds » de la chaîne calcaire de Sicile

[Truillet, 1968] montrent des concentrations en fer de 4 à 19 % et en manganèse de 0,5 à 14,5 %. Les « hardgrounds » et nodules du Briançonnais [M. Bourbon, 1972] présentent des concentrations comparables avec un appauvrissement en manganèse : 4,60 à 19,50 % de fer et 1,26 à 4,54 % de manganèse.

Il semble légitime de vouloir associer les plaques et les bancs à septas avec les « hardgrounds » et niveaux condensés que l'on trouve assez fréquemment sur le pourtour de la Méditerranée occidentale. Ces plaques sont d'autre part associées avec les TUBOTOMACULUM dans un encaissant de type océanique profond. On peut donc penser que ces « hardgrounds » ne traduisent pas forcément l'existence des zones hautes ou « géanticlinales », mais bien aussi la présence de zones profondes soumises à l'action de courants vigoureux. On connaît plusieurs exem-

Région	Mn %	Fe %	Ni %	Co %	Cu %
1) Briançonnais*					
Ech. G 724	2,40	19,50	0,29	0,17	0,003
Ech. 72/4	1,26	14,90	0,37	0,12	0,003
Ech. C 721	4,54	6,20	0,10	0,05	0,003
Ech. E 18	4,20	4,60	0,15	0,07	0,003
2) Sicile (environs de Taormina)**					
Ech. 1	11,7	9,9			
Ech. 2	14,4	19,0			
Ech. 3	1,1	4,0			
Ech. 4	6,2	18,5			
Ech. 5	0,5	4,5			
Ech. 6	0,6	5,6			

TABL. V. — « Hard grounds » et nodules fossiles

\* : analyses réalisées au C.O.B. par H. Bougault et P. Cambon.

\*\* : R. Truillet [1968].

ples océaniques actuels de ce type. Au large du Brésil, l'eau antarctique profonde qui parcourt le bassin argentin emprunte un chenal profond (5 000 m) en bas de marge pour s'épancher dans le bassin brésilien. Tout le fond de ce chenal montre des séries condensées, des encroûtements importants et des nodules polymétalliques (mission Géobrsil du C.O.B.). De même au milieu du Pacifique sud, nous avons mis en évidence (mission Transpac 2 du C.O.B.) des hiatus importants du Pléistocène à l'Oligocène inférieur, dus vraisemblablement à des courants de fond.

B.S.G.F., (7), XVII, 1975, n° 1.

Si notre hypothèse d'une origine minérale des TUBOTOMACULUM *s.l.* se vérifie, elle obligera à remettre en cause l'utilisation de ces corps en paléocologie et en paléogéographie, et conduira à envisager pour certaines parties de la Mésogée, au Crétacé supérieur et durant une bonne partie du Tertiaire, des conditions bathymétriques et de dépôt comparables aux fonds océaniques actuels recouverts de nodules polymétalliques.

*Remerciements.* Nous remercions H. Bougault et P. Cambon pour la réalisation des analyses

chimiques, L. Pastouret pour les photographies au microscope électronique, R. Kerbrat pour les photographies des nodules, R. Neff, R. Wendling et A. Wetzstein pour les analyses minéralogiques, F. Oppermann pour les dessins, Y. Potard et

N. Guillo-Uchard pour la mise en forme du manuscrit.

Des discussions avec H. Bougault, J. Dercourt, G. Duée, G. Dunoyer de Segonzac, L. Pastouret et F. Wezel nous ont été très utiles.

### Bibliographie

- BANDY O. L. et RODOLFO K. S. (1964). — Distribution of foraminifera and sediments, Peru-Chile trench area. *Deep-Sea Res.*, 11, p. 817-837.
- BONATTI E., KRAEMER T. et RYDELL H. (1972). — Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In : Ferromanganese deposits on the ocean floor, ed. by D. HORN, Lamont-Doherty Geol. Observatory, 293 p.
- BOURBON M. (1972). — Contribution à l'étude sédimentologique et géochimique des lacunes et des condensations de la série pélagique briançonnaise. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Paris, 92 p.
- CAIRE A. (1970). — Sicily in its Mediterranean setting. Guidebook to the geology and history of Sicily. Petr. Expl. Soc. Libya, Tripoli, p. 145-170, 10 fig., 1 planche.
- CALVERT S. E. et PRICE N. B. (1970). — Composition of manganese nodules and manganese carbonates from Loch Fyne, Scotland. *Mineralogy Petrology*, vol. 29, n° 3, p. 215-234.
- CRONAN D. S. (1972). — Composition of Atlantic Manganese nodules. *Nature Phys. Sci.*, vol. 235, n° 61, p. 171-172.
- CRONAN D. S. et THOMAS R. L. (1972). — Geochemistry of ferromanganese oxide concretions and associated deposits in lake Ontario. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 83, n° 5, p. 1493-1502.
- DUÉE G. (1969). — Étude géologique des Monts Nebrodi (Sicile). Thèse Science, Paris, ronéotypé.
- DURAND DELGA M. (1955). — Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. Thèse Sc. Paris et *Bull. Serv. Carte géol. Alg.*, n° 24, 548 p.
- EDGINGTON D. N. et CALLENDER E. (1970). — Minor element geochemistry of lake Michigan ferromanganese nodules. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 8, p. 97-100.
- ELDERFIELD H. (1972). — Compositional variations in the manganese oxide component of marine sediments. *Nature Phys. Sci.*, 237, p. 110-112.
- EMERY K. O. et HULSEMAN J. (1962). — The relationships of sediments, life, water in a marine basin. *Deep-Sea Res.*, vol. 8, p. 165-180.
- FEWKES R. H. (1973). — External and internal features of marine manganese nodules as seen with the SEM and their implications in nodule origin, Papers on the origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration, Ed. by M. MORGENSTEIN, Honolulu, Hawaii, p. 21-29.
- GIRESSÉ P. (1969). — Étude des différents grains ferrugineux authigènes des sédiments sous-marins au large du delta de l'Ogooué (Gabon). *Sciences de la Terre*, Nancy, t. 14, n° 1, p. 27-62.
- GLASBY G. P. (1973). — Manganese deposits of variable composition from north of the Indian-Antarctic Ridge. *Nature Phys. Sci.*, 242, p. 106-108.
- GOODELL H. G., MEYLAN M. A. et GRANT B. (1970). — Ferromanganese deposits of the South Pacific Ocean, Drake passage, and Scotia Sea. *Antarctic Research Series*, vol. 15, Biology of the Antarctic Seas 4, Ed. by Joseph L. REID, p. 27-92.
- JAMES H. L. (1966). — Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks. Data of Geochemistry, 6th ed., chapter W, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 440 W, p. 62.
- KORNPROBST C., BOULEGUE J. et MICHARD G. (1973). — Remobilisation du manganèse dans les sédiments superficiels du bassin angolais. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, t. 276, p. 145-148.
- LEMOALLE J. et DUPONT B. (1972). — Iron-bearing oolites and the present conditions of iron sedimentation in lake Chad (Africa). In : Ores in Sediments, ed. by G. C. AMSTUTZ and A. J. BERNARD, p. 167-178.
- LOGVINENKO N. V., VOLKOV I. I. et SOKOLAVA G. (1970). — Rhodochrosite in deep-sea sediments of the Pacific Ocean. *Doklady Akad. Nauk S.S.S.R.*, vol. 203, p. 178-181.
- LYNN D. C. et BONATTI E. (1965). — Mobility of manganese in diagenesis of deep-sea sediments. *Marine Geol.*, 3, p. 457-474.
- MARTIN L. (1972). — Étude des « faecal-pellets » minéralisés des sédiments du plateau continental de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., vol. 4, n° 2, p. 105-120.
- MICHARD G. (1970). — Contribution à l'étude du comportement du manganèse dans la sédimentation chimique. Thèse d'État, Paris, 176 p.
- MILLOT G. (1964). — Géologie des argiles. Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 499 p.
- PLAZIAT J. C. (1971). — Racines ou terriers ? Critères de distinction à partir de quelques exemples du Tertiaire continental et littoral du Bassin de Paris et du Midi de la France. Conséquences paléogéographiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, t. 13, n° 1-2, p. 195-203.
- PORRENGA D. H. (1966). — Clay minerals in recent sediments of the Niger delta. Clays and clays minerals, Pergamon Press, Oxford, Proc. 14th Nat. Conf., p. 221-233.
- RILEY J. P. et CHESTER R. (1971). — Introduction to Marine Chemistry. London and New York, Academic Press, 465 p.
- TRUILLET R. (1968). — Étude géologique des Péloritains orientaux (Sicile). Thèse Sciences, Paris, 547 p., 117 fig., 2 tomes, ronéotypé.
- WEZEL F. (1970). — Interpretazione dinamica della « eugeo-sinclinale » meso-mediterranea. *Riv. Miner. Siciliana*, Anno 21, n° 124-126, p. 187-198.