

Bioturbation récente au large de la Nouvelle-Calédonie. Premiers résultats de la campagne Biocal

Bioturbation
Traces d'activité biologique
Environnement bathyal
Turbidites
Nouvelle-Calédonie

Bioturbation
Biogenic traces
Deep-sea environment
Turbidites
New Caledonia

Christian GAILLARD

Centre de Paléontologie stratigraphique et Paléoécologie, CNRS, Centre des Sciences de la Terre, Université Claude Bernard-Lyon I, 29-43, boulevard du 11-Novembre-1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France.

Reçu le 29/6/87, révisé le 14/3/88, accepté le 28/3/88.

RÉSUMÉ

Ce travail présente les premiers résultats de l'étude des traces biologiques et de la bioturbation dans les fonds bathyaux situés au large de la Nouvelle-Calédonie. Toutes les données ont été acquises lors de la mission pluridisciplinaire Biologie/Géologie Biocal qui s'est déroulée en été 1985 à bord du N/O *Jean-Charcot*. Elles concernent plus particulièrement un transect Thio-Lifou qui traverse le bassin des Loyauté. Un premier inventaire et quelques réflexions sur la répartition des traces biologiques de surface sont proposés. Certaines correspondent à des ichnogènes peu ou pas connus dans les fonds océaniques actuels, mais fréquents dans les séries marines profondes fossiles (*Paleodictyon*, *Urohelminthoïda*). Contrairement aux milieux pélagiques francs, la bioturbation paraît très variable. La vie benthique est en effet assez fréquemment perturbée par la mise en place de turbidites et, près des talus, de coulées boueuses. L'importance de la bioturbation est directement liée à ces perturbations sédimentaires. La bioturbation semble contrôlée par l'épaisseur des dépôts turbiditiques, leur fréquence, la taille et la forme des éléments et l'existence, ou non, d'une phase d'érosion préalable. Le rôle perturbateur de la bioturbation a pu être analysé au niveau de l'effacement des contacts hémipélagite/turbidite et de la disparition de certains niveaux turbiditiques peu épais. Les observations réalisées et les conclusions qui en découlent montrent l'intérêt de l'étude de la bioturbation pour l'analyse des séries fossiles où alternent turbidites et hémipélagites.

Oceanol. Acta, 1988, 11, 4, 389-399.

ABSTRACT

Recent bioturbation off New Caledonia. Preliminary results of the Biocal cruise

This preliminary study deals with deep-sea biogenic traces and bioturbation off New Caledonia. All the data were obtained during the Biocal multidisciplinary (biology/geology) cruise aboard the oceanographic vessel *Jean-Charcot* (summer 1985). The studied area was chiefly along a transect extending from Thio to Lifou across the Loyalty basin. An initial inventory of superficial biogenic traces and some reflections concerning their distribution are given. Certain traces correspond to ichnogenera rarely or not found on modern oceanic floors but well known in deep-sea fossil deposits (*Paleodictyon*, *Urohelminthoïda*). In contrast with plain pelagic environments, the bioturbation is very variable. Indeed, the benthic life is frequently disturbed by turbidites and mud flows. Bioturbation is closely dependent on these sedimentary perturbations, and seems to be conditioned by the thickness and frequency of turbiditic deposits, size and shape of particles, and occurrence of a predepositional erosive phase. The effects of bioturbation have been analysed in connection with the obliteration of contacts between hemipelagites and turbidites and with the progressive disappearance of some thin turbiditic deposits. These observations and corresponding conclusions underline the interest of studying bioturbation for the analysis of fossil deposits containing hemipelagites and turbidites.

Oceanol. Acta, 1988, 11, 4, 389-399.

INTRODUCTION

L'interprétation des traces fossiles dont l'intérêt paléoenvironnemental est unanimement reconnu, ne peut progresser sans une bonne connaissance des traces biogènes actuelles ou récentes. Ces dernières sont assez bien connues en milieu littoral, mais restent difficiles à étudier en milieu marin profond. L'essor récent de la géologie marine a permis de progresser vers la solution des principaux problèmes qui leur sont liés : caractérisation, inventaire et répartition bathymétrique (Chamberlain, 1975; Hollister *et al.*, 1975; Ekdale, 1977; Ekdale, Berger, 1978; Futterer, 1980; Young *et al.*, 1985), conservation des traces dans le sédiment (Berger *et al.*, 1979; Werner, Wetzel, 1982), approche quantitative, estimation de la profondeur et de l'intensité de la bioturbation (Nelson, 1983; Ekdale *et al.*, 1984b), liaison avec les peuplements benthiques (Kitchell *et al.*, 1978; Richardson *et al.*, 1985), liaison avec la dynamique sédimentaire et notamment la mise en place des turbidites (Wetzel, 1983; 1984; Wetzel, Aigner, 1986). Cette énumération est bien évidemment très schématique, car les divers problèmes en question, fortement interdépendants, ont toujours été plus ou moins abordés dans ces divers travaux. Elle est également loin d'être exhaustive.

Le travail présenté ici apporte quelques éléments au dossier en s'appuyant sur des observations nouvelles obtenues dans un secteur auparavant inexploré et présentant un environnement original. Son but est de donner un premier inventaire des traces biogènes en pré-

sant leur répartition géographique et bathymétrique, de tenter une évaluation de la bioturbation, de voir comment celle-ci varie en fonction du régime sédimentaire et comment elle altère la stratigraphie d'origine.

LE CADRE DE L'ÉTUDE

La mission et son contexte

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme pluridisciplinaire Envimarges, ayant pour but l'étude de l'environnement biologique et sédimentaire bathyal des marges océaniques en zone intertropicale. La campagne Biocal, la première liée à ce programme, s'est déroulée en été 1985 au large de la Nouvelle-Calédonie, à bord du N/O *Jean-Charcot*. Les travaux ont en particulier porté sur un transect SW-NE partant, à hauteur de Thio, du talus situé au pied de la barrière récifale qui ceinture la Nouvelle-Calédonie, traversant le bassin des Loyauté, puis la ride des Loyauté à hauteur de l'île de Lifou, et abordant les pentes conduisant à la fosse des Nouvelles-Hébrides (fig. 1).

Le contexte géologique est bien connu dans ses grandes lignes (Dubois *et al.*, 1974; Bitoun, Recy, 1982). Le bassin des Loyauté est un vaste sillon orienté Nord-Ouest-Sud-Est, large d'une centaine de kilomètres et dépassant 2000 m de profondeur. Il est encadré par la ride de Norfolk au Sud-Ouest et la ride des Loyauté au Nord-Est. La Nouvelle-Calédonie correspond à une zone émergée de la ride de Norfolk, constituée d'une

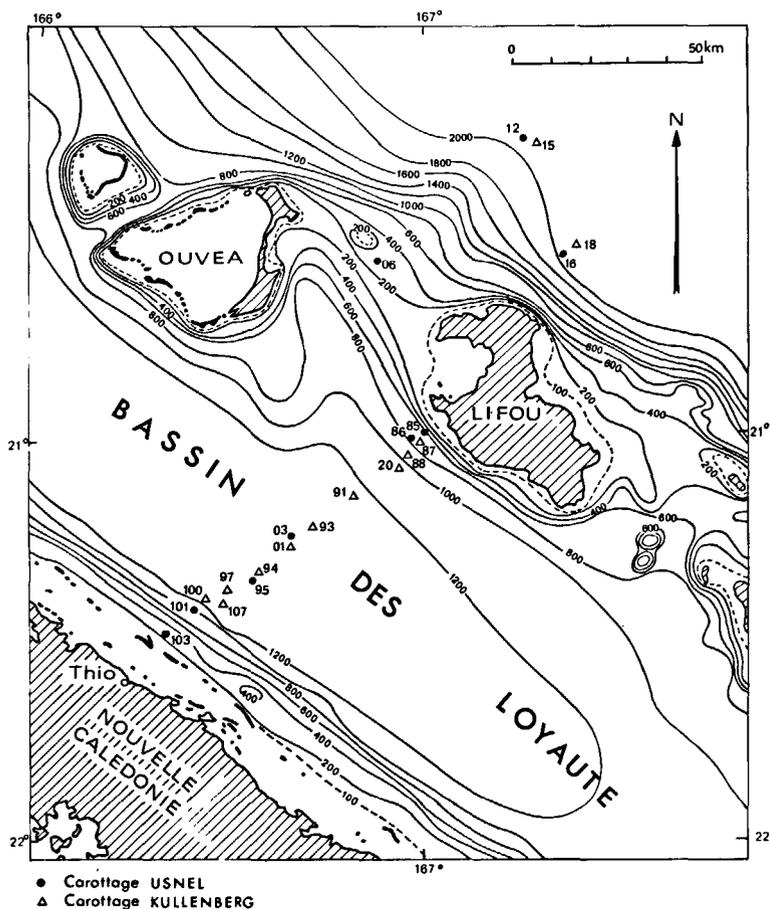


Figure 1

Situation géographique des principaux prélèvements par carottage réalisés le long du transect Thio-Lifou. Bathymétrie : ORSTOM, Nouméa, 1979. Profondeurs en brasses (1 = 1,8 m).

Map of the Loyalty basin showing the location of the main core sites investigated along the Thio-Lifou transect. Bathymetry: ORSTOM, Nouméa, 1979. Submarine contours in fathoms.

zone axiale soulevée et de marges affaissées soit par flexuration, soit par blocs faillés disposés en escaliers. Elle est enfin ceinturée par une barrière récifale délimitant un lagon d'une dizaine de kilomètres de largeur en moyenne. La ride des Loyauté émerge au niveau des îles d'Ouvéa, de Lifou et de Maré, qui sont des récifs quaternaires soulevés par bombement de la plaque australienne avant son plongement sous la plaque pacifique au niveau de la fosse des Nouvelles-Hébrides. Au cours de la mission, le suivi bathymétrique (sondeur 3,5 KHz) et la reconnaissance détaillée (Sea beam) de cinq zones d'une superficie moyenne de 140 km², dont trois au niveau de chacun des talus recoupés par le transect Thio-Lifou, ont permis de préciser la topographie des lieux (Cotillon *et al.*, 1985). Le long de ce transect, le bassin des Loyauté présente un fond plat situé à 2 300 m de profondeur. Le talus qui le raccorde aux récifs de la Nouvelle-Calédonie présente une pente moyenne d'environ 7,5°. Elle n'est pas régulière, mais organisée en paliers creusés de canyons. Les pentes situées de part et d'autre de l'île de Lifou sont plus irrégulières et plus pentues dans leur partie supérieure, où elles atteignent 15 à 20°. Du côté de la fosse des Nouvelles-Hébrides, l'exploration a été étendue jusqu'à plus de 3 700 m de profondeur.

Les sédiments concernés

Les sédiments étudiés sont d'âge quaternaire récent. Les travaux sédimentologiques (en cours) montrent qu'ils sont représentés principalement par des boues calcaréoargileuses mais aussi par des silts et des sables bioclastiques. Ces sédiments proviennent de cinq sources : la Nouvelle-Calédonie (argiles, quartz, minéraux lourds), les barrières récifales (organismes et bioclastes de milieu récifal, boues de périplate-formes), le benthos bathyal (bioclastes variés), le plancton (coccolithes, foraminifères, ptéropodes) et le volcanisme (débris pyroclastiques). Les dépôts s'organisent en fonction de leur nature et de leur granulométrie en une alternance plus ou moins régulière de turbidites et d'hémipélagites. Les dépôts turbiditiques sont de plus en plus importants à l'approche de la Nouvelle-Calédonie où ils s'associent, en pieds de talus, à des mud-flows. Cette disposition évoque une alimentation principale par les canôns situés au niveau de la passe de Thio, et beaucoup plus faible par ceux du talus de Lifou. Ce régime sédimentaire semble avoir existé au moins depuis 100 000 ans, âge des sédiments carottés les plus anciens (Liu, Cotillon, 1987). Le taux de sédimentation des boues hémipélagiques est de l'ordre de 3 à 3,5 cm/1 000 ans d'après les premiers résultats de datation (travaux en cours).

En ce qui concerne l'état actuel du fond, mis à part le seuil Ouvéa-Lifou (KG 06), la couche superficielle de sédiment est toujours représentée par une boue très fine, riche en eau, de consistance crémeuse (soupground à softground selon Ekdale, 1985) sur environ 2 cm et de couleur jaune-brun clair (10 Y R 6/3 selon le code international de Munsell). Cette boue de surface est suffisamment consistante pour supporter des traces biologiques superficielles bien caractérisées et même des terriers ouverts. Toutes les traces superficielles décrites

ont été observées sur ce type de sédiment. Sa teneur en carbonates varie de 85% sur les marges à 60% au centre du bassin. Les argiles sont caractérisées par l'association : chlorite/illite/smectites et les autres éléments terrigènes sont rares, surtout au large de Lifou (Pannetier, 1986). Les constituants planctoniques sont abondants : coccolithes, foraminifères (globigérines, orbulines...), et localement ptéropodes. Les foraminifères benthiques présentent un pourcentage décroissant très rapidement lorsque l'on éloigne des bordures (Coustillas, 1986; Vincent, 1986). Des ponces, provenant sans doute des volcans actifs des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu), sont fréquentes notamment au large de Lifou.

Les techniques utilisées

Diverses opérations géologiques et biologiques ont été réalisées le long du transect Thio-Lifou entre — 600 m et — 3 700 m de profondeur. Elles ont consisté en carottages (carottiers Usnel et Kullenberg, voir fig. 1), dragages (dragues Warren et Sanders) et chalutages (chalut à perche).

Les carottages Usnel, en prélevant des surfaces de fond à peu près non perturbées, de 50 × 50 cm, ont permis une observation directe des traces superficielles. L'épaisseur de sédiment prélevé (25 à 40 cm) a également été observée non seulement dans son état original mais aussi par sections réalisées après durcissement par dessiccation de prélèvements secondaires (« briques » de 5 × 12 cm × 25 à 40 cm). Quelques lames minces ont été faites dans ces derniers, après imprégnation à l'araldite. En outre, le sédiment superficiel de consistance crémeuse a systématiquement été prélevé, lavé et tamisé afin de récupérer la méiofaune contenue.

Les carottages Kullenberg ont fourni des carottes de 6 cm de diamètre, dont les plus longues ont atteint près de 800 cm. Moins utiles que les carottages de grande surface pour la reconnaissance des principales traces, ces carottages ont surtout servi pour l'évaluation de l'intensité de la bioturbation et pour l'étude de ses variations en fonction des paramètres sédimentaires. Pour exprimer les variations d'intensité de la bioturbation, nous avons travaillé sur photographies de sections longitudinales de carottes. Par la technique du comptage de points ont été évaluées, horizontalement, ligne par ligne, l'importance des zones sombres correspondant au matériel turbiditique et celle des zones claires correspondant au matériel hémipélagique.

Les dragages et chalutages, dont certains ont été faits sur les mêmes sites que les carottages, ont permis d'avoir un aperçu du benthos autochtone susceptible d'avoir une action sur le sédiment.

INVENTAIRE ET RÉPARTITION DES TRACES BIOLOGIQUES

Traces visibles sur le fond

Toutes les surfaces observées (carottages Usnel sur sédiment boueux) présentaient une structure plus ou moins réticulée résultant sans doute d'une activité biologique.

OBSERVATIONS		SITES									
		KG 103 -630 m	KG 101 -1790 m	KG 95 -2350 m	KG 03 -2327 m	KG 86 -1860 m	KG 85 -1640 m	KG 06 -570 m	KG 16 -3680 m	KG 12 -3716 m	
TRACES DE SURFACE	Surface réticulée	+	++	++	++	++	+	-	++	++	
	"Pellets" allongés	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
	Terriers ouverts	++	++	+	-	+	+	-	+	+	
	Tubes verticaux	++	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Tube agglutiné	-	+	-	-	-	-	-	-	-	
	Galeries arquées	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
	? Dendrographe	-	+	-	-	-	-	-	-	-	
	Urohelminthoïda	-	+	-	-	-	-	-	-	-	
	Paleodictyon	-	-	-	-	-	-	-	+	+	
FAUNE ASSOCIÉE	sur place	1 spongiae 10 annélides	-	1 astérie	-	-	-	-	-	-	
	à proximité (taxons dominants)	"azoïque"	?	?	Scaphopodes Ophiures Astéries	?	?	Hexactinél.	Bivalves Ophiures	Bivalves Ophiures Holothuries	
	ABONDANCE	+	?	?	+	?	?	++	+	-	
	DIVERSITÉ	-	?	?	+	?	?	++	++	++	
SEDIMENT											
PROFIL SIMPLIFIÉ											
		SW	THIO	BASSIN DES LOYAUTE				LI FOUJ	NE		

Figure 2

Inventaire des principales traces biologiques observées en surface du sédiment (carottes Usnel) et aperçu de la faune associée (sur place = observée dans les carottes Usnel; à proximité = récoltée par chalutages effectués sur le même site). Abondance: -, +, ++ peu à beaucoup d'individus récoltés.

Diversité: -, +, ++ peu à beaucoup de taxons observés (comptages approximatifs faits à bord).

Inventory of main biogenic traces observed on the surface of the sediment (box cores Usnel) and associated fauna (sur place = observed in box cores Usnel; à proximité = collected by trawling on the same site).

Abundance: -, +, ++ few to many collected specimens.

Diversity: -, +, ++ few to many observed taxa (approximate counting done on board).

Dans la plupart des cas les traces sont difficilement caractérisables. Celles qui ont pu l'être sont inventoriées dans le tableau de la figure 2 où sont fournies parallèlement certaines données biologiques et sédimentologiques. Le nombre restreint d'observations ne permet guère de conclusions sur la répartition ou la signification de ces traces. La découverte de certaines d'entre elles correspond toutefois à des données originales ou confortent, avec des exemples actuels, certaines lois appliquées dans les séries géologiques.

Les traces bien caractérisées qui ont pu être mises en évidence se rapportent aux ichnogenres *Paleodictyon* et *Urohelminthoïda*. Un unique exemplaire de galerie ramifiée en mauvais état se rapporte peut-être à l'ichnogenre *Dendrographe*.

La découverte de plusieurs exemplaires de *Paleodictyon* est intéressante, car il s'agit d'une trace très banale dans les séries fossiles de type flysch, mais dont la découverte reste exceptionnelle dans les sédiments actuels (Ekdale, 1980). Ces traces se présentent sous forme d'un réseau à maille hexagonale de sillons creusés à la surface du sédiment. Une forme présente une maille centimétrique (fig. 3A, 4A), une autre présente une maille qui ne dépasse pas 2 mm (fig. 4B). Ces caracté-

ristiques sont très proches de celles des exemplaires décrits par Ekdale (1980) et rapportés à l'ichnoespèce *Paleodictyon (Glenodictyum) minimum* Sacco. L'hypothèse génétique récente selon laquelle *Paleodictyon* pourrait être une empreinte de crevette (Rona, 1986), paraît très peu vraisemblable. D'autre part, les chalutages et dragages effectués sur les mêmes sites n'ont récolté que de rares crustacés incapables de produire de telles empreintes. Selon Seilacher (1977), il s'agit vraisemblablement d'un réseau de galeries développé à très faible profondeur dans le sédiment (Graphoglyptid burrows). En accord avec Ekdale (1980), les perturbations liées à la remontée du carottier ont sans doute provoqué une légère érosion sur le fond suffisante pour détruire toute la partie supérieure du réseau et notamment les éventuels puits verticaux décrits par Seilacher. Cette légère érosion est clairement démontrée par l'état de certaines traces évoquées ci-dessous (fig. 4D). Ce caractère « profond » de *Paleodictyon* explique que cet ichnogenre soit pratiquement invisible en photographie sous-marine. La très faible érosion qui apparaît ainsi nécessaire pour sa conservation habituelle dans les séries géologiques, en simples « nids d'abeilles » à la semelle des bancs, explique bien sa présence limitée aux dépôts turbiditiques distaux. On notera enfin que

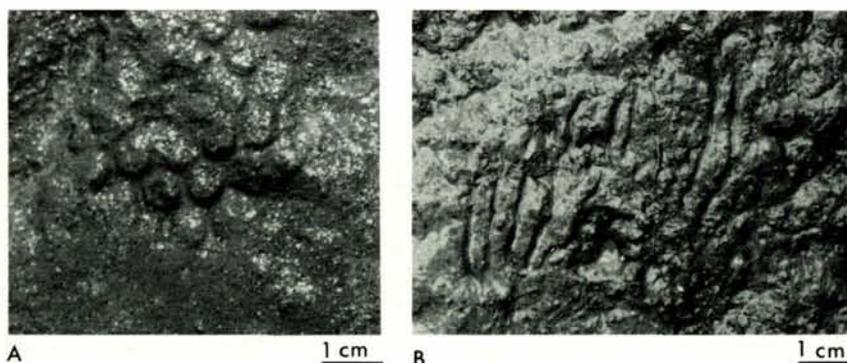


Figure 3

A = *Paleodictyon minimum*. Exemplaire photographié à la surface de la carotte Usnel KG 12. Profondeur: 3716 m (voir fig. 4A).

B = *Urohelminthoïda*. Exemplaire photographié à la surface de la carotte Usnel KG 101. Profondeur: 1790 m (voir fig. 4C).

A = *Paleodictyon minimum*. Specimen photographed on the surface of the Usnel box core KG 12. Depth: 3716 m (see Fig. 4A).

B = *Urohelminthoïda*. Specimen photographed on the surface of the Usnel box core KG 101. Depth: 1790 m (see Fig. 4C).

Paleodictyon a été observé exclusivement et systématiquement dans les sites les plus profonds qui dépassent ici 3 000 m (KG 12, KG 16). Le résultat est intéressant, car il tend à confirmer le fait que cet ichnogenre est un indicateur de faciès profond, comme cela est admis à propos des séries fossiles depuis les travaux de Seilacher (1967).

Dans les séries fossiles, l'ichnogenre *Urohelminthoidea* est connu dans les flyschs du Crétacé et du Tertiaire inférieur (Hantzschel, 1975). La trace rapportée à cet ichnogenre est, semble-t-il, la première signalée dans la nature actuelle. Elle a été récoltée au large de Thio dans la pente basse du talus de Nouvelle-Calédonie, à une profondeur de 1 790 m. Elle se présente sous forme d'un sillon principal de largeur millimétrique, dessinant des méandres à la surface du sédiment (fig. 3 B, 4 C). Les méandres sont distants les uns des autres de 3 à 6 mm et longs de 30 à 35 mm. Dans la courbure des méandres, ont souvent été observés des appendices très courts (2 à 5 mm) mais de même largeur que le sillon principal. Selon Seilacher (1977), il s'agirait d'un réseau de galeries très peu profond dont les ouvertures se situeraient à l'extrémité des appendices. Ceci suppose les mêmes conditions de préservations (donc une légère érosion superficielle) que pour les traces rapportées à *Paleodictyon*, ce qui est vraisemblable. L'interprétation de *Urohelminthoidea* comme trace de pacage est également envisageable (Hantzschel, 1975). L'état de l'unique exemplaire observé ne permet pas d'argumenter sur ce problème d'interprétation. On notera en revanche la



Figure 4

Quelques traces biologiques de surface :

A - *Paleodictyon minimum*-KG 12 (voir fig. 3 A); B - *Paleodictyon*-KG 16; C - *Urohelminthoidea*-KG 101, flèche = déjection? (voir fig. 3 B); D - Réseau de galeries arquées partiellement érodé - KG 12.

Some biogenic surface traces:

A - *Paleodictyon minimum*-KG 12 (see Fig. 3 A); B - *Paleodictyon*-KG 16; C - *Urohelminthoidea*-KG 101, arrow = fecal pellet? (see Fig. 3 B); D - Partially eroded network of curved burrows-KG 12.

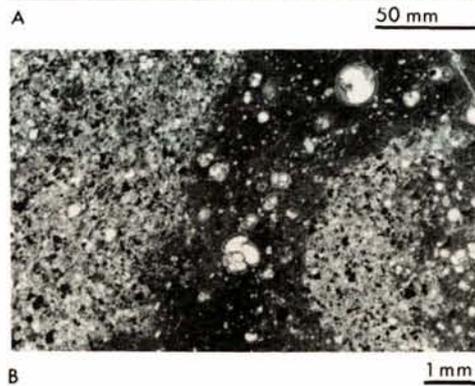
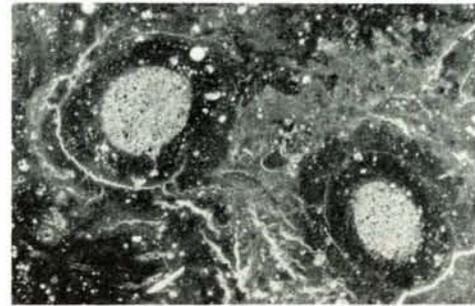


Figure 5

A - Deux terriers creusés dans la boue hémipélagique et remplis de matériel turbiditique fin. Les craquelures et les halos sombres autour des terriers sont des artefacts dus à l'araldite (carotte Usnel KG 03, — 6 cm). B - Détail d'un contact par bioturbation entre turbidite et hémipélagite. La boue hémipélagique renferme des foraminifères planctoniques (1 = *Orbulina*, 2 = *Globigerina*; carotte Usnel KG 03, — 5 cm).

A - Two burrows in hemipelagic mud filled with turbiditic material. Cracks and dark halos around burrows are artefacts made by araldite impregnation (Usnel box core KG 03, — 6 cm). B - Detail of a bioturbated contact between a turbiditic layer and a hemipelagic layer. The hemipelagic mud contains planktonic foraminifers (1 = *Orbulina*, 2 = *Globigerina*; Usnel box core KG 03, — 5 cm).

présence d'un petit corps cylindrique de 10 mm de long et d'un diamètre proche de la largeur du sillon situé dans le prolongement de ce dernier. Il peut s'agir d'une déjection produite par l'auteur de la trace.

D'autres petits boudins cylindriques de sédiment de 10 à 15 mm de long et de 1 à 2 mm de diamètre correspondent sans doute aussi à des pelotes fécales. La présence d'ouvertures de terriers, de diamètre moyen millimétrique, montre que la boue, malgré sa grande richesse en eau possède déjà une bonne cohésion. Des tubes verticaux de 2 mm de diamètre et dépassant légèrement du sédiment, ou plus gros (L = 200 mm, O = 10 mm) couchés en surface et à paroi agglutinante épaisse, appartiennent probablement à des annélides tubicoles. Ils n'ont été reconnus que sur les pentes de la Nouvelle-Calédonie. L'observation (en KG 12) d'un réseau complexe de galeries arquées de 2 mm de diamètre à parcours soit « aérien » soit souterrain est une preuve supplémentaire d'une légère érosion sur le fond (fig. 4 D).

Traces visibles au sein du sédiment

Les structures biogènes superficielles décrites ci-dessus ne laissent pratiquement aucune trace visible dans les carottes. Ceci s'explique par leur petite taille, ainsi que par l'action de la bioturbation ultérieure et de la compaction. En revanche, de nombreux terriers peu-

vent être mis en évidence, d'autant plus facilement qu'ils sont de plus grande taille. Lorsqu'ils intéressent des niveaux de lithologie différente, ils se marquent par un remplissage qui peut trancher nettement par rapport au sédiment encaissant (fig. 5 A, B). Ils s'observent ainsi préférentiellement au contact des niveaux turbiditiques et hémipélagiques. Le diamètre des terriers observés dans ces conditions varie généralement de 1 à 6 mm avec des valeurs atteignant 16 mm. Leur longueur paraît importante, mais reste toujours difficile à préciser. Certains ont pu être suivis sur plus de 10 cm. Leur longueur totale peut être bien supérieure, et peut s'estimer de manière indirecte grâce à des niveaux turbiditiques bien isolés dans les boues hémipélagiques et suffisamment peu bioturbés pour montrer nettement leur base. Dans ces conditions, on peut observer le matériel turbiditique en remplissage de terriers situés jusqu'à 25 cm en dessous de la base des turbidites. Ceci donne, par défaut, une idée de la longueur que peuvent atteindre ces terriers qui doit être de l'ordre au moins de la trentaine de centimètres. On notera que cette profondeur est celle habituellement atteinte par les terriers de grande taille visibles dans la couche de transition des dépôts océaniques (Berger *et al.*, 1979; Ekdale *et al.*, 1984 a). Des profondeurs plus importantes restent exceptionnelles (Weaver, Schultheiss, 1983). Le tracé de ces galeries semble assez simple et généralement sans bifurcations. L'étude de l'angle formé par le grand axe des sections obliques avec l'horizontale montre des orientations très variables. On note toutefois une légère prédominance des portions de galeries verticales (type *Skolithos*) ou subhorizontales (type *Planolites*).

Au sein des boues, certains de ces terriers s'entourent de très beaux halos complexes d'oxydo-réduction, tout à fait semblables à ceux des « terriers auréolés » décrits dans les séries pélagiques du Crétacé vocontien (Gaillard, 1984). On signalera enfin l'absence de traces facilement identifiables et attribuables à des limivores profonds comme *Zoophycos*. On notera toutefois qu'il s'agit de traces habituellement dispersées, et que le volume de sédiment observé ici est relativement faible.

Les terriers moins développés sont plus difficiles à mettre en évidence, mais semblent quasi-systématiques dans les boues hémipélagiques et absents dans les turbidites, sauf dans leur partie sommitale la plus fine. Ils se distinguent de l'encaissant par de très légères différences de coloration. Leur densité apparente donne au sédiment un aspect plus ou moins marbré. Ces terriers, souvent recoupés par les gros terriers décrits ci-dessus, doivent être considérés, pour la plupart, comme plus superficiels (Bromley, Ekdale, 1986).

Schématiquement, on peut donc opposer une bioturbation superficielle, relativement intense mais limitée aux sédiments les plus fins, et une bioturbation profonde, moins importante mais capable d'affecter tous les types de sédiments rencontrés.

INTENSITÉ ET EFFETS DE LA BIOTURBATION

Essai d'évaluation de la bioturbation

Dans les boues, qui représentent la plus importante part des sédiments constituant le remplissage du bassin

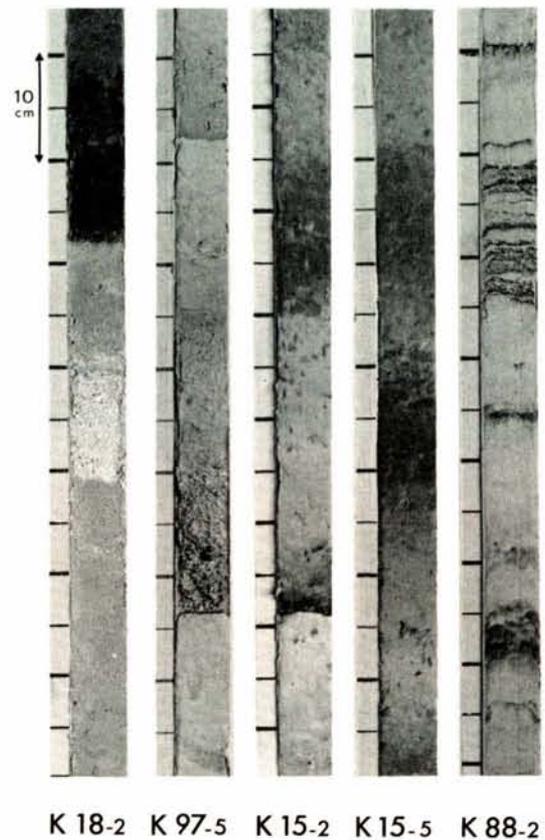


Figure 6

Aspect de quelques carottes Kullenberg : K 18-2 (Est de Lifou) : partie inférieure : turbidite claire, grossière et non bioturbée; partie supérieure : turbidite sombre, au grain plus fin mais plus épaisse, non bioturbée à sa base. K 97-5 (centre du bassin des Loyauté). Partie centrale : séquence turbiditique complète et épaisse dont la base grossière n'est pas bioturbée. K 15-2 (Est de Lifou) : partie inférieure : turbidite peu épaisse à grain fin mais peu bioturbée, sans doute mise en place après une phase d'érosion assez importante; partie supérieure : turbidite également peu épaisse et à grain fin mais fortement bioturbée, ne traduisant aucune discontinuité. K 15-5 (Est de Lifou). Succession régulière de turbidites fines dont la très forte bioturbation estompe toutes les limites lithologiques d'origine. K 88-2 S (bassin des Loyauté-Ouest de Lifou) : partie inférieure : niveaux turbiditiques minces, peu fréquents et bioturbés; partie supérieure : niveaux turbiditiques minces, très fréquents et non bioturbés.

Aspects of some Kullenberg cores: K 18-2 (East of Lifou): lower part: light, coarse-grained and non bioturbated turbidite; upper part: dark, fine-grained and thicker turbidite with a non bioturbated bottom. K 97-5 (centre of the Loyalty basin): central part: thick, full turbiditic sequence with coarse-grained non-bioturbated bottom. K 15-2 (East of Lifou): lower part: thin, fine-grained but slightly bioturbated turbidite probably deposited after an erosion stage; upper part: thin, fine grained, and highly bioturbated turbidite showing no discontinuity. K 15-5 (East of Lifou): regular sequences of highly bioturbated fine-grained turbidites. All the original lithologic limits are obliterated by bioturbation. K 88-2 (Loyalty basin-West of Lifou): lower part: thin, sparse and bioturbated turbiditic levels; upper part: thin, very frequent and non bioturbated turbiditic levels.

des Loyauté, l'importance de la bioturbation est très difficile à évaluer du fait de l'homogénéité et de la finesse du dépôt. L'observation directe, compte tenu du caractère très tenu des terriers, la sous-estime très certainement, et il semble que l'on doive la considérer, d'une manière générale, comme assez forte. Il semble malgré tout que l'on soit assez loin du remaniement intense ou total souvent diagnostiqué dans les boues pélagiques océaniques et présenté comme modèle (Berger *et al.*, 1979; Ekdale *et al.*, 1984 a). Les études quantitatives ont souvent confirmé ce modèle, mais ont aussi mis en évidence des variations parfois sensibles dans l'intensité de la bioturbation superficielle

(Guinasso, Schink, 1975; Berger, Johnson, 1978; Peng *et al.*, 1979; Mauviel *et al.*, 1982). Les organismes responsables de cette bioturbation sont sans doute de même type, c'est-à-dire des endobiontes de petite taille, limivores ou détritivores, vivant dans les premiers centimètres du sédiment. La recherche systématique de la faune vivante dans les premiers centimètres de boue crémeuse a montré la pauvreté de cette couche dans tous les sites. La méiofaune récoltée est dominée par les nématodes principalement, les copépodes et les annélides polychètes (résultats préliminaires communiqués par M. N. Helleouet).

La présence de nombreux niveaux turbiditiques, pour la plupart peu ou pas bioturbés, montre que l'on s'éloigne des modèles admis pour les régimes sédimentaires strictement pélagiques. La mise en place des turbidites perturbe les processus continus qui les caractérisent. C'est au niveau de ces turbidites, et grâce aux mélanges de sédiments produits, que la bioturbation s'exprime nettement. Tous les cas de figure possibles ont été observés, depuis des structures sédimentaires non perturbées (fig. 6, K 18-2, K 97-5), jusqu'à des structures fortement bioturbées de type *c/d* « mottled » selon Moore et Scruton (1957) ou d'intensité 4/5 selon Droser et Bottjer (1986; fig. 6, K 15-5, fig. 7). Dans le cas où les sédiments mélangés sont bien tranchés, la bioturbation peut être évaluée quantitativement selon la méthode de comptage de points (application : fig. 9).

Quelques effets de la bioturbation

Du simple point de vue stratigraphique, la bioturbation entraîne des perturbations qui se traduisent par deux effets essentiels :

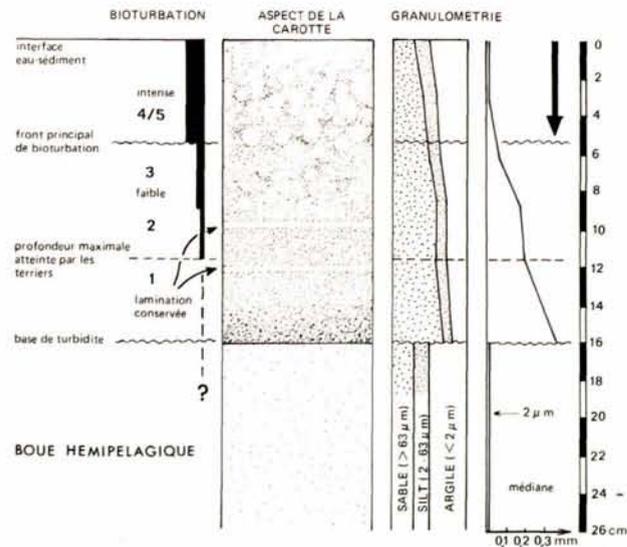


Figure 7
Exemple de carotte Usnel où l'intensité de la bioturbation montre des variations importantes (carotte KG 19 — étude granulométrique par Pannetier, 1985). Les différents degrés de bioturbation ont été évalués avec les indices 1 à 5 proposés par Droser et Bottjer (1986). La bioturbation est essentiellement fonction de la profondeur et peut-être aussi de la granulométrie.
Example of Usnel core where the intensity of bioturbation shows large variations (core KG 9 — Granulometry by Pannetier, 1985). Ichnofabric indices 1 to 5 of Droser and Bottjer (1986) have been used. Bioturbation is mainly dependent on depth but perhaps also on granulometry.

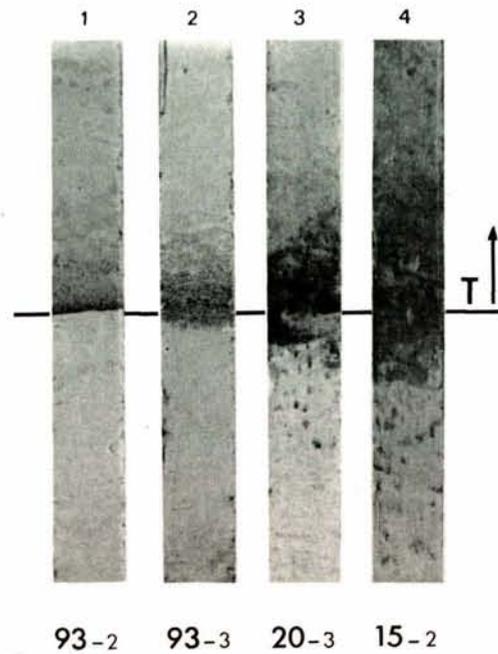


Figure 8
Différents stades de l'effacement des contacts entre pélagites et turbidites par la bioturbation (carottes Kullenberg). T = base de turbidite. Indices de bioturbation 1 à 4.
Different stages of obliteration of contacts between pelagites and turbidites by bioturbation (Kullenberg cores). T = turbidite base. Ichnofabric indices 1 to 4.

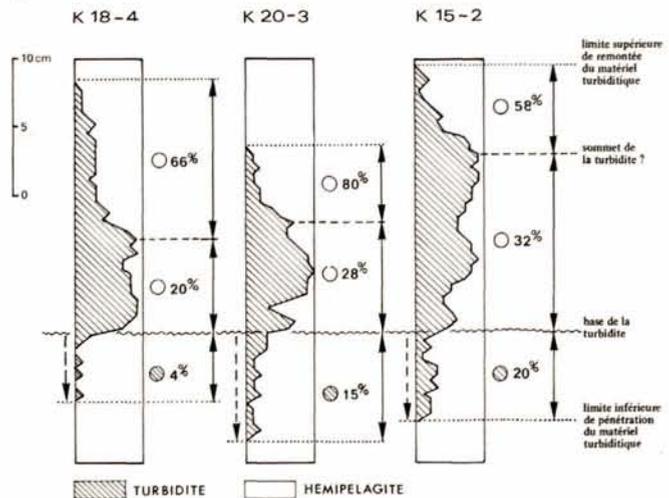


Figure 9
Essai de quantification de la bioturbation au niveau du contact entre une pélagite et une turbidite (carottes Kullenberg) par évaluation du mélange des deux sédiments (clair/sombre) selon la méthode du comptage de points.
Attempt at quantifying bioturbation intensity in contact between pelagite and turbidite (Kullenberg cores). Sediment mixing (light/dark) measured by point counting method.

L'effacement des contacts hémipélagites/turbidites

Les 70 m de carottes Kullenberg étudiés sur le transect Thio-Lifou ont permis de mettre en évidence tous les termes de passage depuis des successions de turbidites évidentes non dérangées par la bioturbation jusqu'à des alternances de dépôts turbiditiques fins et de boues hémipélagiques, sans limites nettes mais très fortement affectées par la bioturbation. Il est très probable que l'effacement de ces limites, qui ne séparaient déjà que des dépôts de granulométrie peu différente, résulte du seul jeu de la bioturbation (fig. 8). L'importance du mélange des deux types de sédiment a été évaluée (fig. 9). En-dessous de la limite marquant la base de la

séquence turbiditique et plus ou moins facile à situer, il est facile d'estimer le pourcentage de sédiment turbiditique entraîné vers le bas (de 4 à 20% dans les exemples choisis). Il est en revanche beaucoup plus difficile de faire des estimations dans la tranche supérieure. La limite supérieure des dépôts turbiditiques ne peut pas y être située avec précision, et il est impossible de faire la part exacte de sédiment de l'un ou de l'autre type qui a été remontée ou descendue par le jeu de la bioturbation.

L'effacement des niveaux peu épais

Il arrive que des turbidites distales peu épaisses ne se matérialisent que sous forme de remplissages de terriers. Ce phénomène a pu être observé dans les 30 premiers centimètres du sédiment qui tapissent le secteur centre/ouest du bassin des Loyauté (fig. 10). On y voit un niveau turbiditique, bien corréléable d'un site à l'autre, perdre progressivement de l'épaisseur vers le centre du bassin, où il n'est plus représenté que sous forme d'un nuage de terriers localement remplis par le sédiment qui l'individualisait. Ceci illustre le rôle considérable des organismes endobiontes dans la disparition de structures primaires d'origine physique.

Variation de la bioturbation le long du transect

A la seule vue des carottes, la bioturbation apparaît comme très inégale tout au long du transect étudié, mais montre une évolution en fonction de la sédimentation. La méthode quantitative précédemment utilisée ne pouvant s'appliquer pour la totalité du sédiment carotté, la bioturbation a simplement été exprimée en terme de présence/absence. Pour chaque carotte, donc pour chaque site, il a ainsi été possible de déterminer un pourcentage de sédiment bioturbé. Celui-ci peut être comparé utilement au pourcentage d'apports turbiditiques, à leur fréquence, ainsi qu'à d'autres paramètres sédimentologiques (répartition des mud-flows, évolution de la granulométrie maximale). L'ensemble de ces résultats, illustré dans la figure 11, met bien en évidence l'alimentation importante à partir de la Nouvelle-Calédonie, plus modeste à partir du seuil de Lifou. Il apparaît ainsi clairement que la bioturbation est globalement faible en pieds de talus situés au large de Thio, où les coulées boueuses sont importantes. Elle croît ensuite

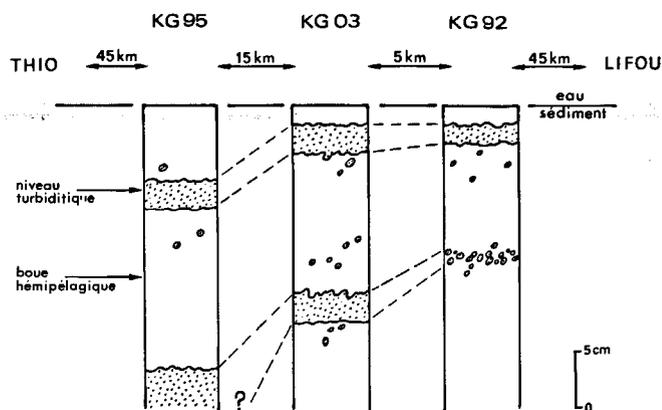


Figure 10
Effacement latéral progressif de niveaux turbiditiques fins sous l'effet de la bioturbation (carottes Usnel).
Progressive lateral obliteration of thin turbiditic levels by bioturbation (Usnel box cores).

régulièrement au fur et à mesure que l'on s'en éloigne et que les apports turbiditiques s'affaiblissent et se raréfient. Du centre du bassin des Loyauté jusqu'au large de Lifou, elle reste importante, affectant entre 85 et 100% de la longueur totale des carottes examinées. Les fluctuations mineures semblent tributaires d'autres facteurs pris en considération ci-dessous comme la granulométrie et la fréquence des apports grossiers. Ceci démontre clairement que la bioturbation est, avant tout, contrôlée par le facteur sédimentaire dont plusieurs aspects doivent être pris en compte.

DISCUSSION

La bioturbation des dépôts profonds de faciès pélagique peut se schématiser selon un modèle (Berger *et al.*, 1979) où se succèdent progressivement dans le temps et dans l'espace :

- une couche superficielle où la bioturbation est totale (mixed layer) ;
- une couche de transition où la bioturbation active se limite à l'action des fousseurs profonds (transition layer) ;
- une couche profonde (= le reste des sédiments) où les structures biogènes sont fossiles (historical layer).

SW	Nlle CALEDONIE										LIFOU		NE
N° Carottes Kullenberg	K100	K107	K97	K94	K01	K93	K91	K20	K88	K87	K18	K15	
Profondeur (en mètres)	2325	2330	2365	2356	2332	2320	2230	2001	2050	1870	3678	3720	
Longueur des carottes (en mètres)	227	748	700	453	482	620	382	518	602	370	713	754	
Nb niveaux turbiditiques grossiers par mètre	0.5	0.8	3.5	3.3	4	4.5	2.5	1.5	7.5	1.8	3	3	
Répartition des turbidites	[Diagram showing turbidite distribution across cores]												
Répartition des mud flow	[Diagram showing mud flow distribution across cores]												
Granulométrie maximale	[Diagram showing maximum grain size distribution across cores]												
origine supposée des apports	[Diagram showing supposed origin of inputs across cores]												
% matériel turbiditique grossier	50%												
% sédiment carotté bioturbé													
	0%	20%	50%	65%	85%	90%	100%	98%	90%	98%	95%	100%	

Figure 11
Principales caractéristiques sédimentologiques des carottes Kullenberg et importance corrélative de la bioturbation le long du transect Thio-Lifou (les épaisseurs des turbidites sont très variables dans chaque carotte).

Main sedimentological characters of Kullenberg cores and correlative development of bioturbation along the Thio-Lifou transect (the thickness of the turbidites is highly variable in each core).

Dans le détail, plusieurs étages de bioturbation, caractérisés chacun par une ichnocoenose particulière, peuvent compliquer ce schéma simple (Werner, Wetzel, 1982).

Les observations présentées ci-dessus montrent que ces modèles ne peuvent s'appliquer dans le cas du remplissage quaternaire récent du bassin des Loyauté. Les apports turbiditiques fréquents en sont la cause évidente. On sait que les turbidites peuvent permettre à des ichnocoenoses spécifiques de s'exprimer, soit pour des raisons écologiques évidentes, soit pour de simples raisons taphonomiques (Wetzel, 1984). Les conditions de préservation d'une part, et les moyens d'investigation utilisés d'autre part, n'ont pas permis de vérifier cet aspect qualitatif. La monotonie des traces observées suggère toutefois une faible diversité de l'endobenthos, ce qui semble conforme au caractère instable de l'environnement. Il est évident qu'un régime sédimentaire où dominent les turbidites a des conséquences importantes et très directes sur le benthos. L'arrivée soudaine et massive d'une grande quantité de sédiment sur le fond ensevelit et détruit la plupart de la faune. Certains organismes fousseurs ont la possibilité de réagir en rehaussant leur terrier en fonction du nouveau fond. Ils produisent ainsi les traces de fuite (= fugichnia, escape-trace) bien connues dans certains exemples actuels (Reineck, 1958; Schafer, 1972) et souvent envisagées (Kuenen, 1957; Ekdale *et al.*, 1984a) ou discutées (Seilacher, 1962) dans certaines séries fossiles. Il suffit que quelques individus réussissent cette opération pour qu'une communauté de fousseurs se maintienne et prospère à nouveau. Dans le cas contraire, il faudra attendre une nouvelle colonisation du secteur par les organismes, ce qui peut nécessiter un temps assez long. Dans le modèle interprétatif proposé, ce phénomène a été considéré comme possible. A la lumière des observations faites dans le bassin des Loyauté, la bioturbation des turbidites, c'est-à-dire leur traversée de bas en haut (éventuelles traces de fuite) ou de haut en bas (installation de nouveaux terriers) semble limitée par cinq facteurs principaux pouvant agir conjointement.

L'existence d'une phase d'érosion préalable

Les dépôts turbiditiques peuvent être précédés d'une phase d'érosion d'autant plus active qu'ils sont en situation proximale. Une érosion du fond sur une épaisseur importante peut malmener ou détruire complètement l'endofaune. La partie inférieure du secteur de la carotte K 15 représenté (fig. 6, K 15-2) montre vraisemblablement une turbidite sur surface d'érosion. Ce niveau à peine bioturbé bien que peu épais tranche avec ceux qui caractérisent normalement ce site (fig. 6, K 15-2 partie supérieure, K 15-5).

L'épaisseur du dépôt

Un dépôt trop épais peut faire obstacle à toute remontée des fousseurs. De même, s'il n'est pas ainsi affecté par des traces de fuite, il ne sera pas bioturbé à sa base si son épaisseur excède la plus grande profondeur atteinte par les terriers des organismes fousseurs qui seront amenés à le coloniser. C'est ainsi que les turbidites de plus de 30 cm d'épaisseur ne sont pas bioturbées à leur base.

La taille des éléments

Il semble que les éléments les plus grossiers, concentrés en base de turbidite, constituent souvent un obstacle infranchissable aux organismes fousseurs à partir d'une certaine granulométrie (fig. 6, K 97-5). Les données dans ce domaine sont encore insuffisantes pour proposer des valeurs chiffrées. De plus, la part du contrôle granulométrique de la bioturbation reste difficile à évaluer, puisque dans les dépôts étudiés (séquences turbiditiques) d'autres facteurs, comme la simple épaisseur de dépôt à traverser, interviennent souvent en priorité.

La forme des éléments

Il est possible que la forme des grains grossiers joue aussi un rôle inhibiteur. Certains niveaux bioclastiques, peu épais en l'occurrence, sont ainsi constitués essentiellement de coquilles de ptéropodes formant un feutrage dense d'éléments piquants sans doute très difficile à traverser par un organisme fousseur. La remarquable orientation des coquilles démontre l'action d'un courant, mais aussi l'absence de toute bioturbation (fig. 2).

La fréquence des apports grossiers

Il apparaît clairement que des apports grossiers, même peu importants mais rapprochés, sont défavorables à l'endofaune. La carotte K 88, par exemple, témoigne d'un régime sédimentaire particulier. Dans sa plus grande partie les boues dominent et la bioturbation globale est de ce fait élevée (90%, fig. 11). On remarquera par contre, dans un secteur limité (fig. 6, portion de carotte K 88-2), le contraste entre la partie inférieure du secteur représenté où les niveaux grossiers sont bioturbés et la partie supérieure où les niveaux comparables beaucoup plus resserrés ne sont pas bioturbés bien que très minces.



Figure 12

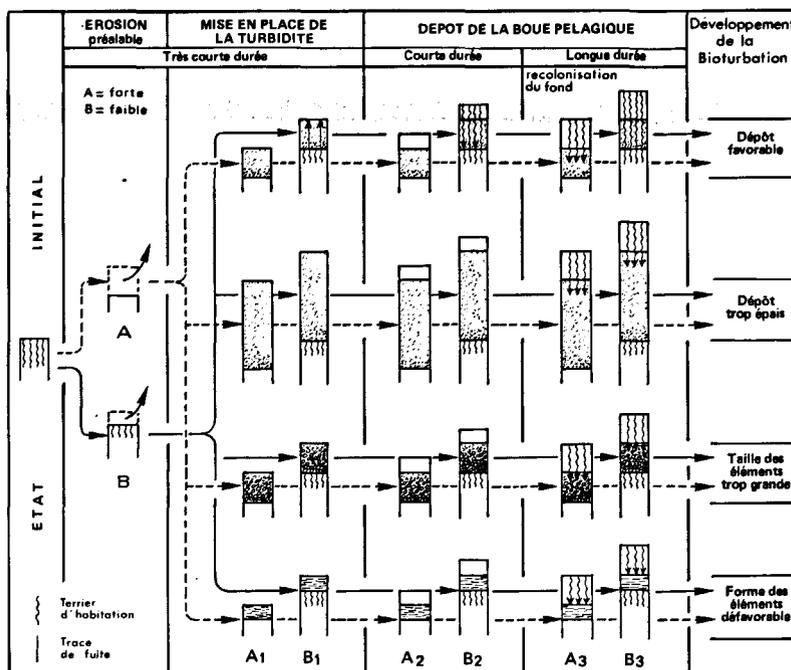
Vue en coupe horizontale d'un niveau bioclastique peu épais (4 cm) riche en coquilles de ptéropodes orientées par le courant constituant un obstacle non franchi par les organismes fousseurs (K G 86 — 26 cm de profondeur).

Horizontal section of a thin bioclastic level (4 cm) with pteropod shells orientated by a flow not crossed by endiobionts (K 6 86 — deepness: 26 cm).

Figure 13

Analyse du rôle des principaux facteurs sédimentaires contrôlant la bioturbation lors d'un cycle de dépôt turbidite/pélagite (voir la discussion dans le texte).

Schema showing the role of the main sedimentological factors determining bioturbation during a cycle of turbidite/pelagite deposition (see discussion in the text).



En conclusion, le tableau de la figure 13 schématise le rôle de chacun de ces facteurs au cours d'un simple cycle de dépôt turbidite hémipélagite (de ce fait le facteur « fréquence des apports grossiers » n'est pas pris en compte) : sur un fond initial bioturbé, on envisage la mise en place de différents types de turbidites à la suite d'une phase d'érosion préalable plus ou moins forte (A ou B). Le maintien d'une partie de l'endofaune initiale n'est possible (traces de fuite) que si la phase d'érosion n'est pas trop forte (cas B) et que si le dépôt est favorable (ni trop épais, ni trop grossier, ni avec des éléments de forme défavorable). Dans ce cas, le dépôt turbiditique ainsi que les boues pélagiques immédiatement surincombantes peuvent être très vite activement bioturbés (= « courte durée »). Si l'endofaune initiale ne peut pas se maintenir, il faudra attendre un temps beaucoup plus long (= « longue durée ») pour que le fond affecté par l'apport turbiditique soit à nouveau colonisé. De même, la bioturbation produite par les nouveaux organismes fouisseurs sera limitée en profondeur si la nature du dépôt turbiditique sous-jacent n'est pas favorable (taille des éléments trop grande ou forme des éléments défavorable). Dans le cas où le substrat est favorable, elle ne sera limitée que par la profondeur maximale que peuvent atteindre normalement les terriers. Il s'agit bien sûr d'une simplification dans la mesure où seuls des facteurs d'ordre sédimentaire sont pris en compte. Ce sont malgré tout des facteurs dominants compte tenu du régime sédimentaire et de la relative homogénéité du milieu. On remarquera qu'au large de Lifou, la bioturbation est très développée, voire permanente (95% à 100% de sédiment bioturbé), malgré des apports turbiditiques importants (fig. 10). Ces derniers forment des niveaux d'épaisseur modérée, assez régulièrement et suffisamment espacés, ce qui suppose un régime plus stable que peut supporter en permanence au moins une partie de l'endobenthos. C'est là que se manifeste la plus grande ressemblance avec les processus qui caractérisent le milieu pélagique (fig. 6 K 15-5).

CONCLUSION

Concernant les traces biogènes et la bioturbation, les premiers apports de la campagne Biocal, au large de la Nouvelle-Calédonie, sont les suivants :

— Des ichnogènes comme *Urohelminthoida* et *Paleodictyon*, fréquents dans les séries fossiles de type flysch, ont été mis en évidence sur le fond marin. L'observation de ce type de terrier est nouvelle ou exceptionnelle dans la nature actuelle.

— Ces traces, associées à d'autres terriers superficiels ou plus profonds (*Planolites*, *Skolithos*), constituent une ichnocoenose conforme à ce que l'on connaît en milieu marin profond. L'ichnogène *Paleodictyon*, restreint aux zones explorées les plus profondes, semble confirmer son rôle d'indicateur bathymétrique.

— La bioturbation n'est pas continue comme en milieu typiquement pélagique, mais fortement influencée par les apports turbiditiques, voire des coulées boueuses, provenant principalement de la Nouvelle-Calédonie. Elle dépend de divers paramètres qui sont : l'épaisseur des dépôts, la taille et la forme des éléments, la fréquence des apports, l'existence ou non de phases d'érosion.

— Cette bioturbation se manifeste par certains phénomènes comme l'effacement partiel ou total des contacts entre hémipélagites et turbidites, pouvant conduire à la disparition totale de certains niveaux peu épais. La mise en évidence de tels phénomènes par l'examen des figures de bioturbation est évidemment d'une grande importance pour la compréhension du régime sédimentaire.

— La plupart des conclusions de cette étude reposent sur l'observation de figures de bioturbation destinées à être conservées dans les couches géologiques. Le modèle de la Nouvelle-Calédonie présente ici un intérêt certain pour l'analyse des séries fossiles où alternent turbidites et hémipélagites.

Remerciements

L'auteur remercie M. C. Lévi, chef de la mission Biocal, ainsi que tous ses collègues géologues pour l'aide qu'ils lui ont fournie à bord et pour les discussions qui ont suivi la mission : P. Cotillon, F. Coustillas, B. Laurin, A. Pascal, P. Rigolot et M. Rio. Il remercie également M. Roux pour ses critiques et conseils,

M. M. Helleouet pour les premiers résultats concernant la méiofaune, J.-C. Reniaud et N. Podevigne pour leur aide technique. Ce travail a été soutenu par l'UA 11 et le GRECO 61 du Centre National de la Recherche Scientifique.

RÉFÉRENCES

- Berger W.H., Johnson R.F., 1978. On the thickness and the 14C age of the mixed layer in deep-sea carbonates, *Earth Planet Sci. Lett.*, **41**, 223-227.
- Berger W.H., Ekdale A.A., Bryant P.P., 1979. Selective preservation of burrows in deep-sea carbonates, *Mar. Geol.*, **32**, 205-230.
- Bitoun G., Recy J., 1982. Origine et évolution du bassin des Loyauté et de ses bordures après la mise en place de la série ophiolitique de Nouvelle-Calédonie, *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, **147**, 505-534.
- Bromley R.G., Ekdale A.A., 1986. Composite ichnofabrics and tiering of burrows, *Geol. Mag.*, **123**, 59-65.
- Chamberlain C.K., 1975. Trace fossils in DSDP cores of the Pacific, *J. Paleontol.*, **49**, 1074-1096.
- Cotillon P., Coustillas F., Gaillard C., Laurin B., Pascal A., Rigolot P., Rio M., Roux M., 1985. Résultats géologiques préliminaires de la campagne Biocal aux abords de la Nouvelle-Calédonie (SW Pacifique), *S.G.F. « Géologie des Océans », Bordeaux*, **14**.
- Coustillas F., 1986. Mission Biocal, Bassin des Loyauté (Nouvelle-Calédonie), Rapport micropaléontologique préliminaire, Total C.F.P. Dir. Expl. RL n° 3841, Rapport interne.
- Droser M.L., Bottjer D.J., 1986. A semi quantitative field classification of ichnofabric, *J. Sediment. Petrol.*, **56**, 558-559.
- Dubois J., Launay J., Recy J., 1974. Uplift movements in New Caledonia-Loyalty Islands area and their plate tectonics interpretation, *Tectonophysics*, **24**, 133-150.
- Ekdale A.A., 1977. Abyssal trace fossils in worldwide Deep sea Drilling Project cores, in: Trace fossils, 2, edited by T. P. Crimes and J. C. Harper, *Geol. J., Spec. Issue*, **9**, 163-182.
- Ekdale A.A., 1980. Graphoglyptid Burrows in Modern Deep-sea Sediment, *Science*, **207**, 304-306.
- Ekdale A.A., 1985. Paleoecology of the marine endobenthos, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **50**, 63-81.
- Ekdale A.A., Berger W.H., 1978. Deep-sea Ichnofacies: Modern Organisms Traces on and in Pelagic Carbonates of the Western Pacific, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **23**, 263-278.
- Ekdale A.A., Bromley R.G., Pemberton S.G., 1984a. Ichnology. Trace fossils in sedimentology and stratigraphy, SEPM short course 15, 317 p.
- Ekdale A.A., Muller L.N., Novak M.T., 1984b. Quantitative ichnology of modern pelagic deposits in the abyssal Atlantic, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **45**, 189-223.
- Futterer D.K., 1980. Bioturbation and Trace fossils in deep sea sediments of the Walvis ridge, Southeastern Atlantic, Leg 74, *Init. Rep. D.S.D.P.*, **524**, 543-556.
- Gaillard C., 1984. Bioturbation des sédiments pélagiques du Crétacé inférieur dans le Bassin vocontien (chaînes subalpines méridionales, France), 1^{er} Congrès International de Paléocécologie, *Géobios, H.S.*, **8**, 205-214.
- Guinasso N.L., Schink D.R., 1975. Quantitative Estimates of Biological Mixing Rates in Abyssal Sediments, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3032-3043.
- Hantzschel W., 1975. Trace fossils and Problematica (Part W. Miscellanea, supplement 1), *Treatise on Invertebrate Paleontology*, C. Teichert éd.
- Hollister C.D., Heezen B.C., Nafe K.E., 1975. Animal traces on the deep-sea floor, in *The study of Trace Fossils*, edited by R. W. Frey, Springer-Verlag, 493-510.
- Kitchell J.A., Kitchell J.F., Johnson G.L., Hunkins K.L., 1978. Abyssal traces and megafauna: comparison of productivity, diversity and density in the Arctic and Antarctic, *Paleobiology*, **4**, 171-180.
- Kuenen P.H., 1957. Sole markings of graded graywacks beds, *J. Geol.*, **65**, 231-258.
- Liu J.D., Cotillon P., 1987. Principaux aspects de la sédimentation actuelle et récente dans le Bassin des Loyauté le long du transect Thio-Lifou (Nouvelle-Calédonie, SW Pacifique), 1^{er} Congrès Français de Sédimentologie, *A.S.F.*, 229-230.
- Mauviel A., Nguyen H.V., Cheslelet R., Sibuet M., Yokoyama Y., Auffret G., 1982. Étude des variations des taux de bioturbations par la spectrométrie gamma non destructive (GeHP), dans trois zones sédimentaires de l'Atlantique Nord, à 2000 m et à plus de 6000 m de profondeur, *Actes Colloq. Inter. CNRS, Bordeaux, septembre 1981, Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, **31**, 257-274.
- Moore D.G., Scruton P.C., 1957. Minor Internal Structures of some recent unconsolidated sediments, *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, **41**, 2723-2751.
- Nelson C.S., 1983. Bioturbation in middle bathyal, cenozoic nannofossil oozes and chalks, Southwest Pacific, *Init. Rep. D.S.D.P.*, **90**, 1189-1200.
- Pannetier W., 1986. Les sédiments du bassin des Loyauté, Sud-Ouest Pacifique (mission Biocal, 1985), Rapp. DEA-Sédipal, Lyon-Dijon, soutenu à l'Université de Lyon.
- Peng T.H., Broecker W.S., Berger W.H., 1979. Rates of Benthic Mixing in Deep-sea Sediment as Determined by Radioactive Tracers, *Quat. Res.*, **11**, 141-149.
- Reineck H.E., 1958. Wühlbau-Gefüge in Abhängigkeit von Sediment-Umlagerungen, *Senckenbergiana Lethaea*, **39**, 1-23 et 54-56.
- Richardson M.D., Briggs K.B., Young D.K., 1985. Effects of biological activity by abyssal benthic macroinvertebrates on a sedimentary structure in the Venezuela Basin, *Mar. Geol.*, **68**, 243-267.
- Rona P.A., 1986. Black smokers on the Atlantic Seafloor: preliminary dive report, *Deep-Sea Newslett.*, **12**, 10-11.
- Schafer W., 1972. *Ecology and Palaeoecology of marine environments*, edited by G. Y. Craig, Univ. Chicago Press, 568 p.
- Seilacher A., 1962. Paleontological studies on turbidite sedimentation and erosion, *J. Geol.*, **70**, 227-234.
- Seilacher A., 1967. Bathymetry of trace fossils, *Mar. Geol.*, **5**, 413-428.
- Seilacher A., 1977. Evolution of trace fossil communities, in: *Patterns of evolution. Developments in Paleontology and Stratigraphy*, Hallam ed., Elsevier, **5**, 359-376.
- Vincent E., 1986. Les associations de foraminifères benthiques du bassin des Loyauté (Nouvelle-Calédonie). Rapports avec la sédimentation (mission Biocal, 1985), Rapp. DEA-Sédipal, Lyon-Dijon, soutenu à l'Université de Dijon.
- Weaver P.P.E., Schultheiss P.J., 1983. Vertical open burrows in deep-sea sediments 2 m in length, *Nature*, **301**, 329-331.
- Werner F., Wetzel A., 1982. Interpretation of biogenic structures in oceanic sediments, *Actes Colloq. Inter. CNRS, Bordeaux, septembre 1981, Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, **31**, 275-288.
- Wetzel A., 1983. Biogenic structures in modern slope to deep-sea sediments in the Sulu sea basin (Philippines), *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **42**, 285-304.
- Wetzel A., 1984. Bioturbation in deep-sea fine-grained sediments: influence of sediment texture, turbidite frequency and rates of environmental change, in: *Fine Grained Sediments: deep water Processes and Facies*, Stow and Piper ed., 595-609.
- Wetzel A., Aigner T., 1986. Stratigraphic completeness: tiered trace fossils provide a measuring stick, *Geology*, **14**, 234-237.
- Young D.K., Jahn W.H., Richardson M.D., Lohanick A.W., 1985. Photographs of deep-sea Lebensspuren: a comparison of sedimentary provinces in the Venezuela Basin, Caribbean Sea, *Mar. Geol.*, **68**, 269-301.