HAL
open science

La bioturbation actuelle dans le milieu abyssal de l'Océan atlantique nord

Anne Mauviel

To cite this version:

Anne Mauviel. La bioturbation actuelle dans le milieu abyssal de l'Océan atlantique nord. Sciences de la Terre. Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, 1982. Français. NNT : . tel-02427477

HAL Id: tel-02427477

https://theses.hal.science/tel-02427477

Submitted on 3 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE
BRETAGNE OCCIDENTALE

don C. BABIN

CENTRE OCÉANOLOGIQUE
DE BRETAGNE

AUTEUR
n° 2

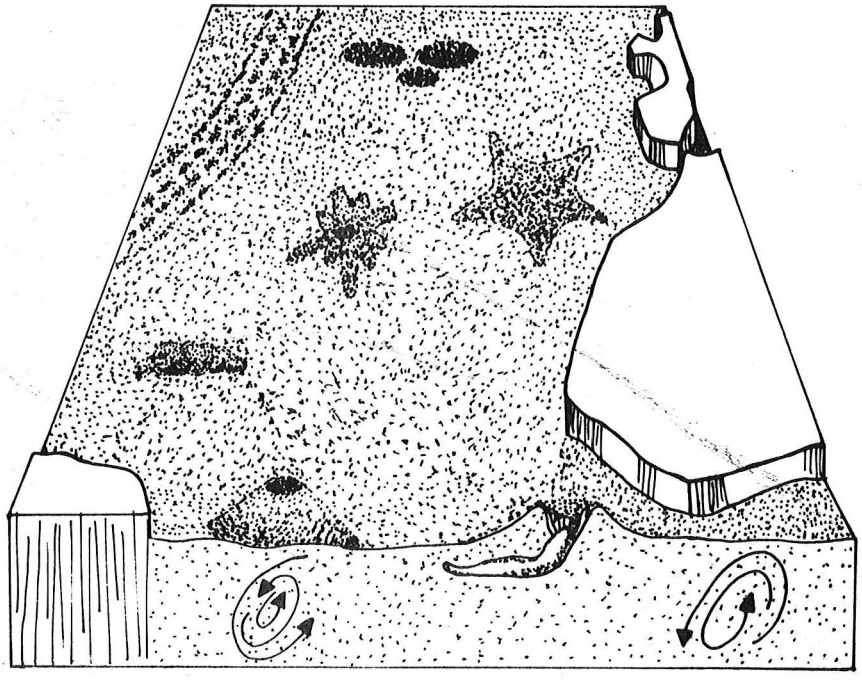
TROISIÈME CYCLE : GÉOLOGIE

OCEANOLOGIE ET GEODYNAMIQUE

Anne MAUVIEL

La bioturbation actuelle dans le milieu abyssal de l'Océan Atlantique Nord

THÈSE DE DOCTORAT DE 3ÈME CYCLE



BREST 1982

BUYEUR
UNIVERSITE DE LYON
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE
2

n° ordre: 156.

THESE

présentée pour l'obtention

du

DIPLOME DE DOCTEUR DE 3e CYCLE

à

L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Sciences de la Terre
Spécialité : Océanologie et Géodynamique

par

Anne MAUVIEL

LA BIOTURBATION ACTUELLE DANS LE MILIEU ABYSSAL DE L'OCEAN ATLANTIQUE NORD

Soutenue le 22 mars 1982 devant la Commission d'Examen :

M. René BLANCHET, Professeur, Brest	Président
Mme Myriam SIBUET, Chercheur C.O.B.	Rapporteur
M. Gérard André AUFFRET, Chercheur C.O.B.	Rapporteur
M. Roger CHESSELET, Directeur de Recherches CNRS, Gif/Yvette	Examinateur
M. Michel HOFFERT, Professeur, Brest	Examinateur

En collaboration avec le Centre des Faibles Radioactivités (Laboratoire C.N.R.S. - C.E.A.), Gif/Yvette.

".....et maintenant, comment pourrais-je retracer les impressions que m'a laissées cette promenade sous les eaux? Les mots sont impuissants à raconter de telles merveilles....."

Jules VERNE, "20 000 lieues sous les mers,1869.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier :

Monsieur BLANCHET qui m'accueillit en D.E.A. et qui préside ce jury de thèse,

Monsieur CHESSELET, de m'avoir accueillie au Centre des Faibles Radioactivités. Grâce à lui, j'ai pu profiter d'une toute nouvelle technique de spectrométrie gamma qui fait une grande partie de l'attrait de cette étude. Je le remercie vivement de son aide attentive et de son enthousiasme pour ce sujet,

Monsieur HOFFERT qui a accepté de juger ce travail, et, ainsi, de l'intérêt qu'il me témoigne.

Madame SIBUET qui m'a proposé ce sujet de recherche. Je lui suis reconnaissante de m'avoir initiée aux rudiments de l'écologie abyssale et de m'avoir consacré beaucoup de temps et de patience pour la correction de ce mémoire. Je la remercie plus particulièrement pour son enthousiasme constant, même devant les nombreux problèmes liés au monde de la recherche,

Monsieur AUFFRET qui m'a suivie et conseillée dans toutes les phases de ce travail. Je le remercie pour sa grande patience souvent mise à l'épreuve, au cours de ces deux années.

Les études de spectrométrie gamma ont été réalisées au Centre des Faibles Radioactivités, à Gif/Yvette où j'ai trouvé un accueil chaleureux de la part de tout le laboratoire. Je tiens à remercier Monsieur YOKOYAMA, d'avoir porté un vif intérêt à ce travail ; Monsieur H.V. NGUYEN, pour m'avoir familiarisée avec cette technique dans un climat de sympathie et Madame LAMBERT de s'être penchée sur ce mémoire et de m'avoir donné de nombreux conseils et suggestions, avec tant de gentillesse, pour un sujet qui ne lui était pas familier.

Les analyses de sédiments et de photographies ont été effectuées au Centre Océanologique de Bretagne. Je remercie Marguerite BRETON, Daniel DESBRUYERES, Alain DINET, René KERBRAT, Jean-René LE COZ, Suzanne MARQUES, Serge MONTI, Léo PASTOURET, Myriam SIBUET et Annick VANGRIESHEIM, pour les données communiquées, leur aide efficace et les conseils judicieux.

Je remercie l'ensemble de l'équipe d'écologie abyssale, grâce à laquelle j'ai pu embarquer trois fois au cours de l'année 1980 ; Daniel DESBRUYERES et Alexis-Stephan KHRIPOUNOFF, pour leurs suggestions pertinentes et leur bonne humeur communicative. Je remercie également Joëlle GALERON, Patrick BRIAND et Michel SEGONZAC du Centre National de Tri d'Océanologie Biologique, d'avoir trié les récoltes des missions en un temps record.

Je tiens aussi à remercier Annik PELHATE de m'avoir encouragée en tout point pendant ces deux années, et Yves PLUSQUELLEC pour ses suggestions.

Madame GROS et Mademoiselle MARTIN ont dessiné les cartes bathymétriques, les engins et les diagrammes ; Mademoiselle COLENO a été le maître d'oeuvre d'un fameux bloc diagramme ; Madame ROLET a assuré la frappe de ce mémoire, je les remercie toutes les quatre chaleureusement.

Enfin, je remercie mes parents, Sophie, Bernadette, Patrick, Rémy, Yves et tous ceux près ou loin de Brest, qui m'ont aidée pendant ces deux années.

Ce travail a été réalisé grâce à l'attribution d'une bourse de formation du CNEXO que je remercie ici.

Les études, effectuées dans le Bassin du Cap Vert, sont réalisées dans le cadre d'une collaboration CEA-CNEXO, pour le programme "SEABED".

SUMMARY

The *intensity of present bioturbation is investigated in three North Atlantic deep-sea basins* and define the connected environment control. The considered environmental parameters are topography, depth, hydrodynamism, faunistic density and sedimentation. This complete data set on abyssal ecology was collected during oceanographic deep-sea cruises.

In a first step, starting material, made up of 2524 photographs of the ocean bottom, is surveyed to study the *animal trace repartition* ("lebenspuren"). Two groups of traces are distinguished : superficial traces and relief traces. The abundance of traces is quantified using density and diversity measurements, at each station. Trace variation distribution is evaluated to the sampling quality defined at each station, and constrained by environmental parameters. The trace repartition interpretation is limited for the trace preservation is obtained from the sedimentologic and spectrometric determination.

In the second laboratory step, the upper layer sediment reworking ("mixed layer") is precisely obtained by *mixing rate measurement* (in cm^2/s). This mixing rate, D_B, is calculated from the distribution of excess Pb-210 and Th-228 measured by a recent gamma spectrometry technique : the Ge(H.P.) detector (Yokoyama, Nguyen, 1979). The sedimentologic characteristics are alsa precised at each station.

A brief bioturbation feature analysis is conducted in Holocen sediments.

Sediment reworking is localized where high trophic deposits are registred. High mixing rate is measured in the lower section of Amazonian deep-sea fan sediments ($D_B = 0,94.10^{-8}$ cm^2/s) and also in the Bay of Biscay sediments ($D_B = 0,53$ to $0,60.10^{-8}$ cm^2/s). Short preservation times of the traces characterize those areas. Observed traces are essentially of relief trace type relevant to deep reworking.

In return, abyssal oligotrophic plain sediments (Demerara abyssal plain, Cape Verde basin) *are poorly reworked and affect the two centimeters uppermost layer.* This type of environment is characterized by long preservation times of the traces, high densities and relative abundances of surficial traces.

Bioturbation intensity variations are evaluated from the mixing rates calculated for superficial sediment and the abundances and diversities of traces. Those variations are found to be directly related to the specific ecology of the three basins.

introduction

L'interface eau-sédiment constitue à la fois le support physique et le milieu nutritif des organismes benthiques. Lors de leurs activités locomotrices liées ou non à la fonction nutritive, les organismes benthiques de l'épifaune et de l'endofaune perturbent la structure physique des sédiments et laissent des traces (pistes ou terriers) à la surface et en profondeur dans le sédiment. L'ensemble de ces processus de remaniement est désigné sous le nom de *bioturbation*. La bioturbation est essentiellement conditionnée par la faune. L'importance des ressources nutritives du milieu abyssal détermine en général la densité des populations d'organismes benthiques (Griggs *et al.*, 1969 ; Sanders et Hessler, 1969 ; Rowe, 1971).

Dans cette étude, l'intensité de la bioturbation est analysée dans plusieurs sites profonds de l'Océan Atlantique Nord, prospectés au cours des missions d'écologie abyssale du Centre Océanologique de Bretagne. Le choix des secteurs étudiés a porté sur un ensemble de stations situées dans des bassins distincts ayant des sources d'apports trophiques variées. Ainsi trois secteurs sont soumis aux apports terrigènes car ils sont situés sur la marge continentale du Golfe de Gascogne ou au pied du Cône de déjection de l'Amazone. Trois autres secteurs sont localisés dans des plaines abyssales (Démérara et Cap Vert) où les ressources nutritives sont, *a priori*, d'origine essentiellement pélagique. Afin de rechercher l'influence des paramètres de l'environnement et des principales caractéristiques faunistiques sur la bioturbation dans les différents secteurs, un ensemble de prélèvements (chalutages, carottages, photographies sous-marines) a permis d'obtenir les données nécessaires.

Dans l'exposé de ce travail, un premier chapitre est consacré à la description de l'environnement de chacun des sites prospectés en tenant compte de la situation géographique, de la topographie, de l'hydrodynamisme, de l'abondance des différentes catégories de faune récoltées et de l'évolution sédimentologique au Quaternaire.

Dans le deuxième chapitre, la bioturbation est abordée sous l'aspect de traces qui résultent de l'activité animale. Ces traces sont observées à partir d'un grand nombre de photographies du fond prises dans chaque station. Jusqu'à présent, les traces organiques du domaine abyssal étaient étudiées sous des aspects descriptifs et qualitatifs (Dangeard, 1967 ; Ewing et Davis, 1967 ; Heezen et Hollister, 1971). Depuis quelques années, certains auteurs (Kitchell *et al.*, 1978 b, 1979) ont cherché à analyser les traces en termes de densité, de diversité et de fréquences.

L'observation photographique conduit à établir une classification des traces organiques, en tenant compte de l'importance du remaniement en profondeur. L'étude de la distribution des traces est menée pour chaque secteur en évaluant la densité totale (nombre de traces/surface) de traces, la

densité moyenne de chaque catégorie de trace et la diversité. Les résultats sont discutés connaissant les facteurs de l'environnement et les conditions de conservation des traces à la surface des sédiments. La conservation est liée à plusieurs paramètres, parmi lesquels l'activité plus ou moins importante des organismes benthiques. Ce degré d'intensité est variable et peut être déterminé grâce à l'évaluation du taux de mélange qui fait l'objet du chapitre suivant.

Le troisième chapitre présente les données recueillies à partir des analyses faites sur les sédiments superficiels (0-30 cm) prélevés à l'aide d'un carottier de type U.S.N.E.L. Les paramètres sédimentologiques (pourcentages de carbonate de calcium et de carbone organique, taux de fraction grossière et minéralogie) sont analysés afin de caractériser le substrat des différentes stations.

Les activités de huit radionuclides sont mesurées car leurs distributions permettent d'apprécier l'intensité du mélange sédimentaire et le taux de sédimentation. Des travaux récents se sont attachés à la définition des modalités de l'intensité du remaniement. Par exemple, dès 1962, Goldberg et Koïde, cherchant à déterminer le taux d'accumulation de sédiments profonds, ont constaté l'absence de la décroissance du rapport isotopique (Th-230/Th-232) en fonction de la profondeur dans les dix premiers centimètres d'une carotte. Ce phénomène s'explique par l'existence d'un mélange qui homogénéise les premiers centimètres de sédiments. Par la suite, en étudiant la distribution des radionuclides de courtes périodes (Pb-210 ou Th-234) on a pu traduire l'intensité de ce mélange par un coefficient qui a les dimensions d'une diffusion turbulente (Guinasso et Schink, 1975). Le coefficient de mélange obtenu dans le milieu abyssal est de l'ordre de $10^{-8} cm^2/s$ (Nozaki *et al.*, 1977 ; De Master, 1979).

Dans cette étude, l'importance du mélange sédimentaire est estimée dans chaque site prospecté, en tenant compte des variations de l'activité des radionuclides : Pb-210 en excès et Th-228 en excès dans la couche mélangée. Les mesures sont obtenues à l'aide d'une récente technique de spectrométrie gamma : le détecteur à Germanium à haute pureté (à Ge(H.P.)), mis au point par Yokoyama et Nguyen (1979), et installé au Centre des Faibles Radioactivités à Gif-sur-Yvette. A partir de ces mesures, les coefficients de mélange sont calculés. Ces valeurs sont discutées en tenant compte des données faunistiques et des caractéristiques de l'environnement : notamment le taux de sédimentation et le taux d'accumulation de C organique ; ce dernier indique l'importance des apports trophiques dans les sédiments.

Dans ce même chapitre, une considération des traces de l'activité animale conservées sous la couche mélangée (principalement des terriers) est réalisée. L'observation de ces terriers dans les sédiments datés de l'Holocène et tous les paramètres recherchés au cours de cette étude donnent des informations pour les reconstitutions de paléoenvironnement.

Toutes ces études sont menées parallèlement et systématiquement dans tous les secteurs prospectés, considérant que des données complémentaires sont nécessaires pour bien comprendre la bioturbation. L'approche à grande échelle, par photographie, des figures de bioturbation est *a priori* imprécise en méconnaissance des conditions de conservation. Il est utile de bénéficier par l'étude complémentaire menée au niveau de la couche superficielle des sédiments, de paramètres chiffrés permettant de définir l'intensité du remaniement et la conservation des traces au milieu profond.

UNIVERSITÉ DE LYON
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE

chapitre 1 : situations environnements

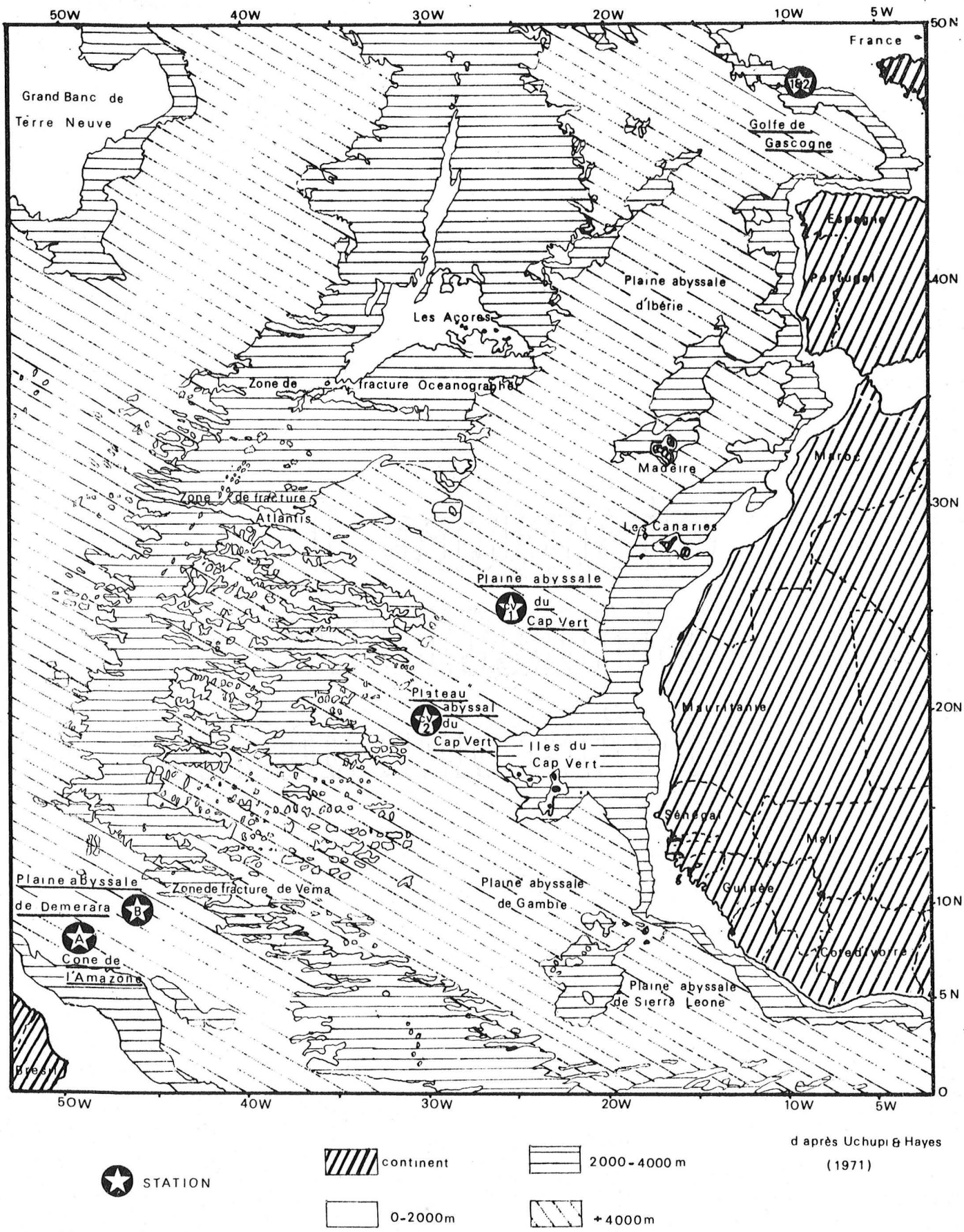


Fig. 1 - Situation des stations étudiées dans l'Océan Atlantique (0°-50°N).

I - CHOIX DES SITES

Cette étude s'inscrit dans un programme de recherches de la connaissance et de la compréhension de l'écosystème benthique profond. La première phase de ce programme a permis de faire l'inventaire des groupes zoologiques présents dans certains bassins abyssaux de l'Atlantique. Une deuxième phase, en cours actuellement, a pour but d'apprécier la dynamique de cet écosystème. Cette deuxième phase fait appel à la collaboration de plusieurs disciplines (physique, chimie, biologie, sédimentologie) et à l'utilisation de technologies nouvelles spécialisées. Ainsi, au cours des missions de prospection organisées par l'équipe de biologie abyssale du C.O.B., s'insèrent des opérations d'hydrologie, de courantométrie, de sédimentologie..., afin de préciser l'ensemble des paramètres constituant l'environnement.

Les secteurs prospectés sont choisis dans différents bassins profonds de l'Océan Atlantique Nord, où les sources d'apports trophiques sont variées. Les stations étudiées se situent dans trois bassins : le Bassin de Démérara (prospecté en septembre 1980), le Bassin du Cap Vert (prospecté en novembre 1980) et le Golfe de Gascogne (prospecté chaque année depuis 1972) (fig. 1).

- Dans le *Bassin de Démérara*, deux stations ont été investiguées au cours de la mission Demeraby. La *station A* est située au pied du cône de l'Amazone, et est considérée comme secteur soumis aux apports terrigènes du fleuve. La *station B* est à la limite du glacis et de la Plaine abyssale de Démérara, où l'influence terrigène serait moins importante.

- Le *Bassin du Cap Vert* est en domaine abyssal strict où les apports pélagiques dominent. Au cours de la mission Seabed 2, deux secteurs ont été explorés : la *station CV1* située à la limite du glacis et de la Plaine abyssale du Cap Vert, et la *station CV2* localisée aux abords de la Ride Médio-Atlantique.

- Deux autres stations situées sur la Marge du Golfe de Gascogne ont été prospectées dans le cadre du programme Biogas. Ces deux stations, *station 1* sur la Terrasse de Meriadzek, et la *station 2* sur la Ride Aegis, sont soumises aux influences continentales.

Pour chaque station, une carte bathymétrique du site prospecté est tracée avec plus ou moins de précision selon les stystèmes de navigation et les sondeurs utilisés.

II - TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT ET DE BATHYMETRIE

A - *SYSTEMES DE NAVIGATION UTILISES*

Les positions des prélèvements ont été localisées grâce à l'emploi de systèmes de navigation acoustique. Au cours des missions Demeraby et Seabed 2, à bord du N/O JEAN CHARCOT, le système employé était de type ATNAV (AMF). Au cours des missions Biogas 8, 9 et 10, à bord des N/O LE NOROIT, CAPRICORNE et CRYOS, le système utilisé était de type CSF 1. Pour ces deux systèmes le principe général est le même et consiste à mouiller trois ou quatre balises acoustiques au fond en figure géométrique (triangle équilatéral, losange). Après avoir mouillé les balises, on effectue la calibration pour connaître la distance exacte entre chaque balise, puis l'orientation afin de situer l'ensemble des balises par rapport au Nord géographique. La position des balises est connue grâce à la navigation par satellite. Au cours de la calibration, de l'orientation et des opérations de prélèvements, le bateau interroge les trois balises sur une même fréquence. Chaque balise répond sur sa propre fréquence. Le temps écoulé entre l'émission par le bateau et la réception de l'onde émise par la balise est transformé à l'aide d'un calculateur en distance bateau-balise. On obtient ainsi trois distances qui permettent de connaître la position par rapport au champ de balises. Chaque position du bateau est transcrite en temps réel sur une table traçante. La position des engins de prélèvement est déterminée grâce à une balise placée à l'avant de l'engin. Cette balise interrogée par le bateau permet de connaître les routes du bateau et de l'engin sur la table traçante. Un répétiteur est installé à la passerelle, un recalage permanent du bateau peut être effectué.

A la fin des opérations les balises sont récupérées. Elles sont munies d'un système de largage acoustique. Le bateau envoie un signal sonore de fréquence distincte pour chaque balise. Le lest est largué et la balise remonte à la surface où elle est récupérée.

Lorsque ces systèmes de navigation ne sont pas utilisés, le positionnement des prélèvements est obtenu par les points "satellite". Entre chaque point "satellite", la route du bateau est calculée en fonction de plusieurs paramètres (dérive du bateau, courants de surface...). Les positions obtenues sont alors appelées "estimes". La précision du positionnement est, dans ce cas, moins grande. C'est le cas, en particulier, des points de prélèvements de la deuxième station (CV2) de la mission Seabed 2.

B - *SONDEURS UTILISES*

Le N/O "Jean Charcot" dispose d'un sondeur à faisceaux multiples et étroits à haute résolution appelé le "Sea Beam". On observe, directement le relevé topographique du fond, suivant la route du navire (la largeur de cette carte est égale aux3/4 de la profondeur). L'échelle choisie est le 1/10000. L'ensemble des données de la navigation acoustique et du sondeur "Sea Beam" sont recalculées afin d'obtenir une carte bathymétrique très précise où sont positionnés les prélèvements.

Au cours des campagne BIOGAS, les bateaux étaient munis d'un sondeur à faisceau unique. Pendant le mouillage des balises, la calibration, l'orientation et les opérations de prélèvements, des profils bathymétriques ont été enregistrés. Les profondeurs obtenues ont été corrigées à l'aide des tables de Knudsen, qui tiennent compte des variations de la vitesse de l'onde sonore dans les différentes masses d'eau. Les cartes bathymétriques, limitées au champ de balise, sont à l'échelle du 1/10000. Sur ces cartes, l'ensemble des prélèvements est positionné.

III - DONNEES PRELIMINAIRES SUR L'ENVIRONNEMENT

A - *CONE INFERIEUR DE L'AMAZONE*

Dans la région du cône inférieur de l'Amazone, le secteur choisi, station A, s'étend de 08°06'N à 08°12'N en latitude, et de 49°00'W à 49°07'W en longitude (fig. 2). La carte bathymétrique, obtenue à l'aide d'un sondeur multifaisceau "seabeam", montre une topographie marquée, à l'Est, par un chenal orienté Nord-Sud.

D'après les observations de Whitebread et Worthing (sous presse) faites à partir de mesures proches de la station (4°N ; 39°30'W) pendant 1 an, à 10 m du fond, les courants maxima peuvent atteindre 17 cm/s. Il est vraisemblable que dans la station A les courants soient moins forts.

Les premiers résultats des opérations d'hydrologie permettent de conclure que cette station est caractérisée par l'Eau de Fond Antarctique en faibles proportions (A. Vangriesheim, comm. pers.). La température, *in situ*, au fond est de 2,2°C en moyenne.

La faune mobile , dans ce secteur, est abondante et riche. Les densités obtenues après 15 carottages, 6 chalutages et 2 traits photographiques, sont de 277 x 10^3 ind./m^2 pour la meïofaune et de 24,2 x 10^{-3} ind./m^2 pour la mégafaune (annexe 1). Cette dernière est dominée par les holothurides (6,3 ind./1000 m^2).

Peu de travaux ont été effectués dans l'ensemble du Bassin de Démérara, du point de vue sédimentologique. Les premiers résultats sont donnés par Damuth-Jumars (1975), Damuth (1977), puis

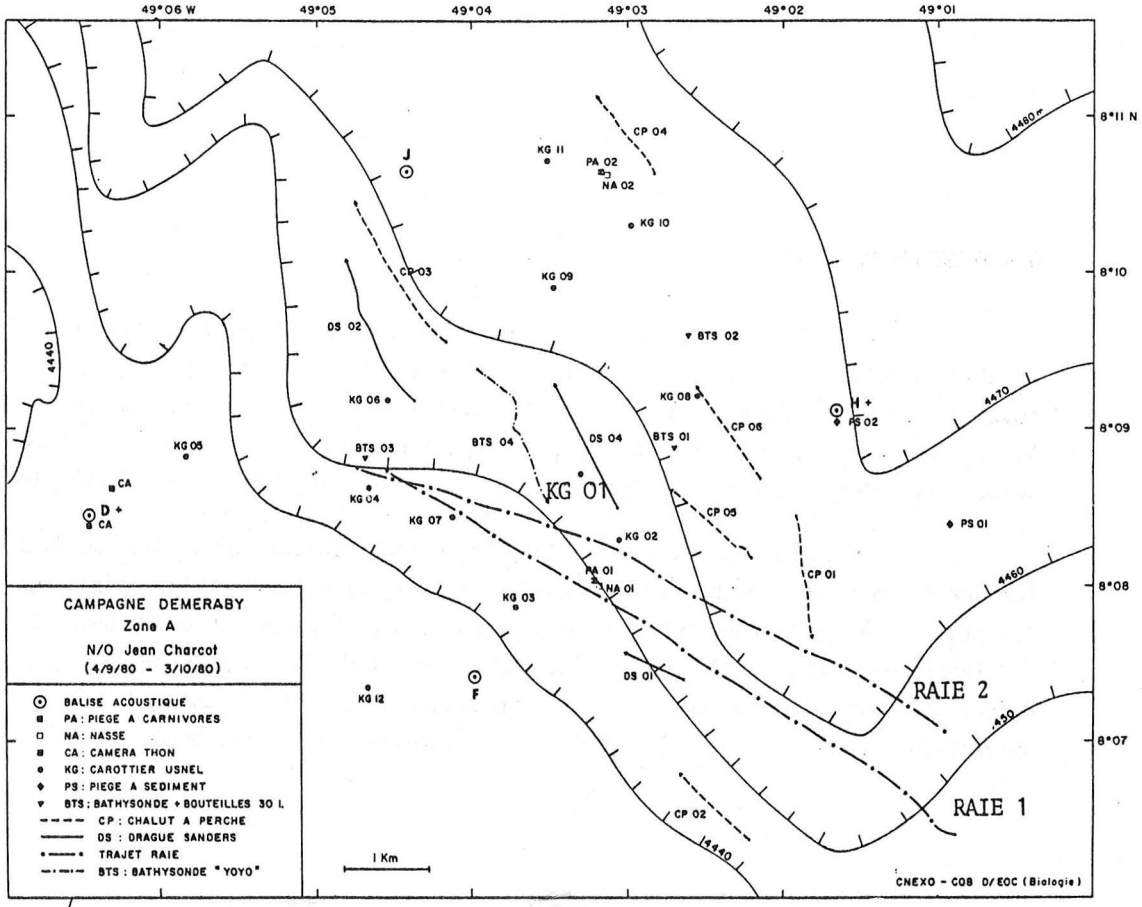
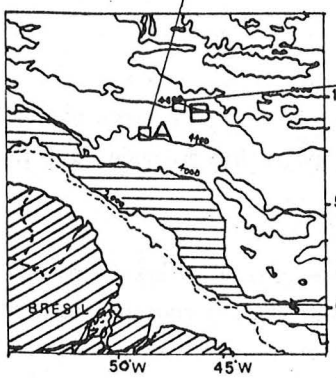


Fig.2: Carte des prélèvements de la station A.



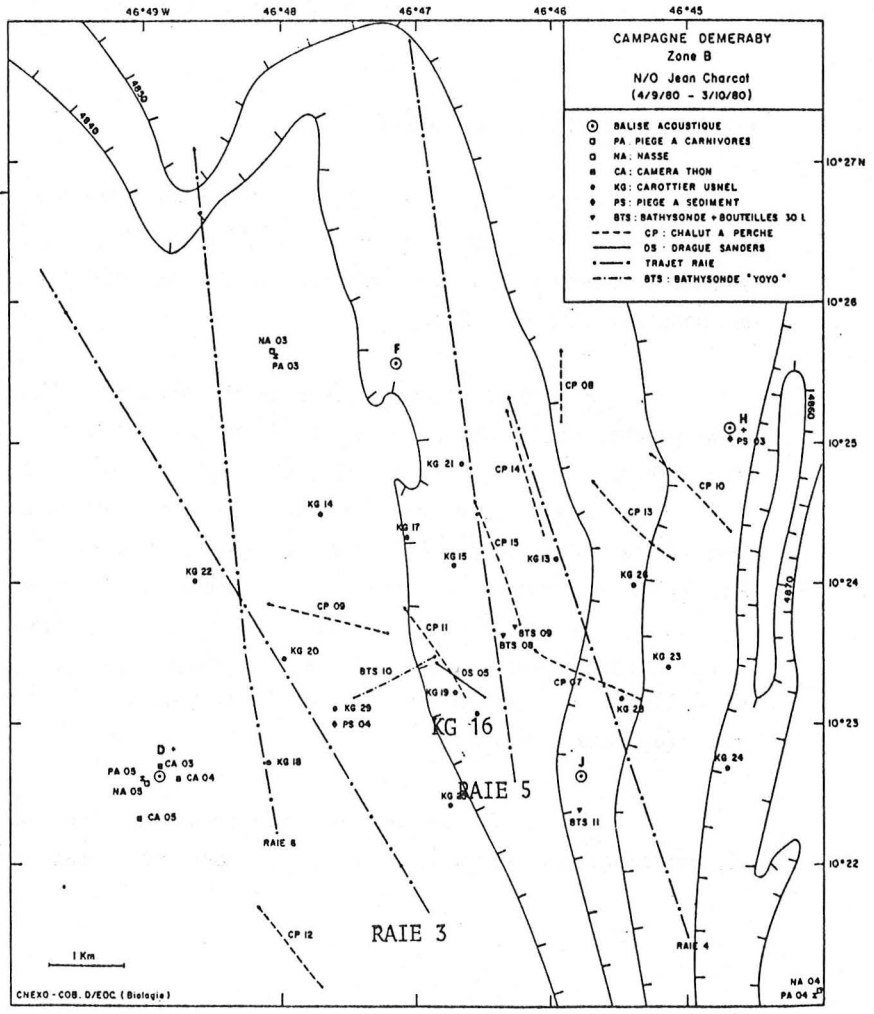


Fig.3: Carte des prélèvements de la station B.

Moyes *et al.* (1978). Ils ont retracé l'évolution sédimentologique des deux provinces : Cône de l'Amazone et Plaine abyssale de Démérara depuis la dernière période glaciaire :

- *Au cours du Würm* : la ligne de rivage a reculé, les sédiments détritiques fins s'étendent vers le Nord. Le Cône de l'Amazone est caractérisé par une sédimentation terrigène. Les sédiments détritiques atteignent la Plaine de Démérara par l'intermédiaire de courants de turbidité. Le taux de sédimentation déterminé par micropaléontologie est évalué à 15-30 cm/1000 ans (Damuth, 1977).

- *A l'Holocène* : le niveau marin remonte, la mer recouvre à nouveau la plateforme continentale. Les sédiments détritiques fins sont entraînés vers le Nord par les courants de la plateforme. Au large, la sédimentation devient plus pélagique. Sur le Cône de l'Amazone, les sédiments sont des vases marneuses hémipélagiques dont le taux de sédimentation est de 2-5 cm/1000 ans (Damuth, 1977 ; Moyes *et al.*, 1978).

B - *PLAINE ABYSSALE DE DEMERARA (STATION B)*

La station B s'étend de 10°21'N à 10°28'N en latitude et de 46°44'W à 46°50'W en longitude. La carte bathymétrique (fig. 3) permet d'observer une topographie dont la pente est orientée vers l'Est. La profondeur est comprise entre 4840 m et 4870 m.

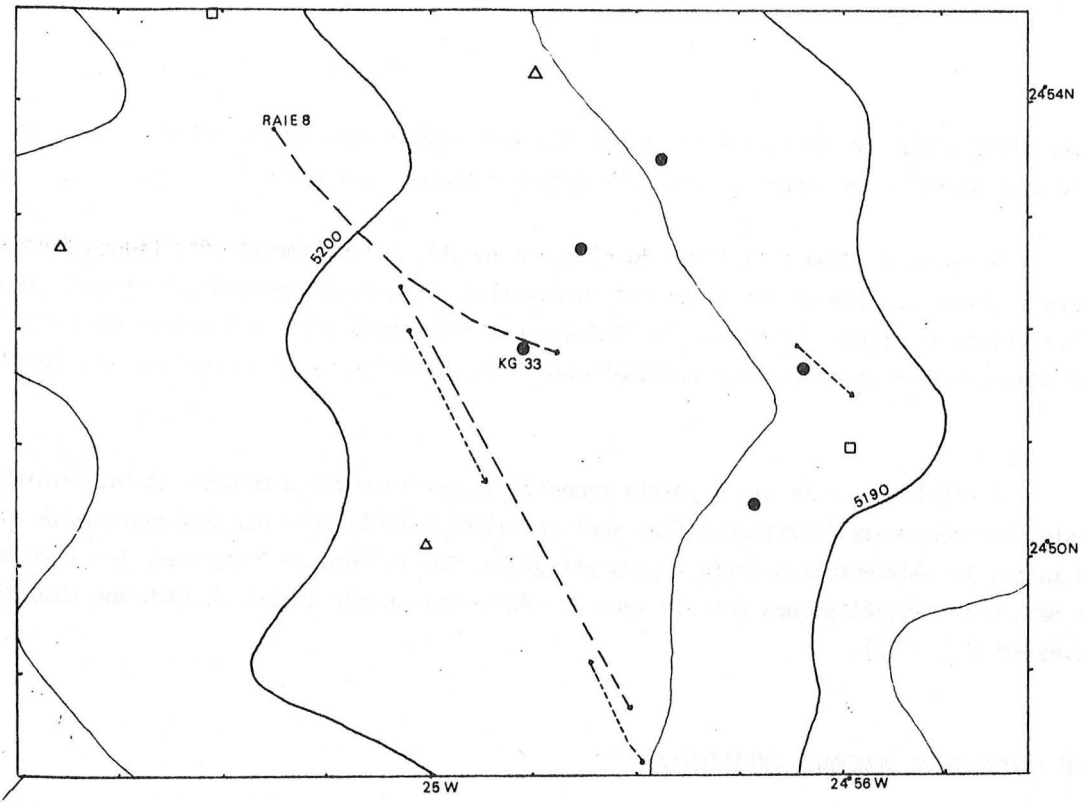
Aucune donnée de courantologie n'est encore publiée. Les premiers résultats des opérations d'hydrologie de la mission Demeraby montrent que cette station est sous l'influence de l'Eau de Fond Antarctique (A. Vangriesheim, comm. pers.). La température au fond est de 1,6°C en moyenne.

Dans ce secteur, la faune est en général deux fois moins abondante que dans la station A. La densité de la meïofaune est de 134 x 10^3 ind./m^2 (277 x 10^3 ind./m^2 à la station A) et celle de la mégafaune est de 10,5 x 10^{-3} ind./m^2 (24,5 x 10^{-3} ind./m^2 dans la station A). En revanche, la faune est plus diversifiée : plusieurs espèces d'holothuries sont observées par photographies alors qu'une seule espèce est reconnue sur les prises de vue faites à la station A.

L'histoire sédimentologique de la Plaine abyssale de Démérara, depuis le Würm est résumée ainsi (Damuth, 1977) :

- *Au cours du Würm* la sédimentation est hémipélagique. Les tests de foraminifères présentent des traces de dissolution. Cette dissolution paraît liée à l'Eau de Fond Antarctique, masse d'eau connue pour son fort pouvoir dissolvant vis à vis des carbonates. Le taux de sédimentation serait de 5 à 18 cm/1000 ans.

- *A l'Holocène* la sédimentation devient pélagique. Le taux de sédimentation est évalué à 1-2 cm/1000 ans (Damuth, 1977).



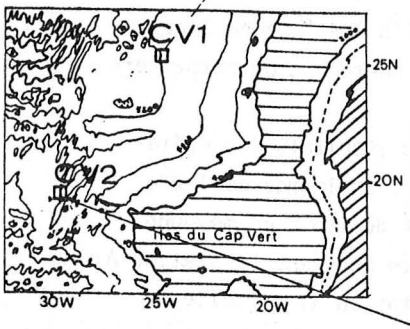


Fig.4: Carte des prélèvements de la station CV1.

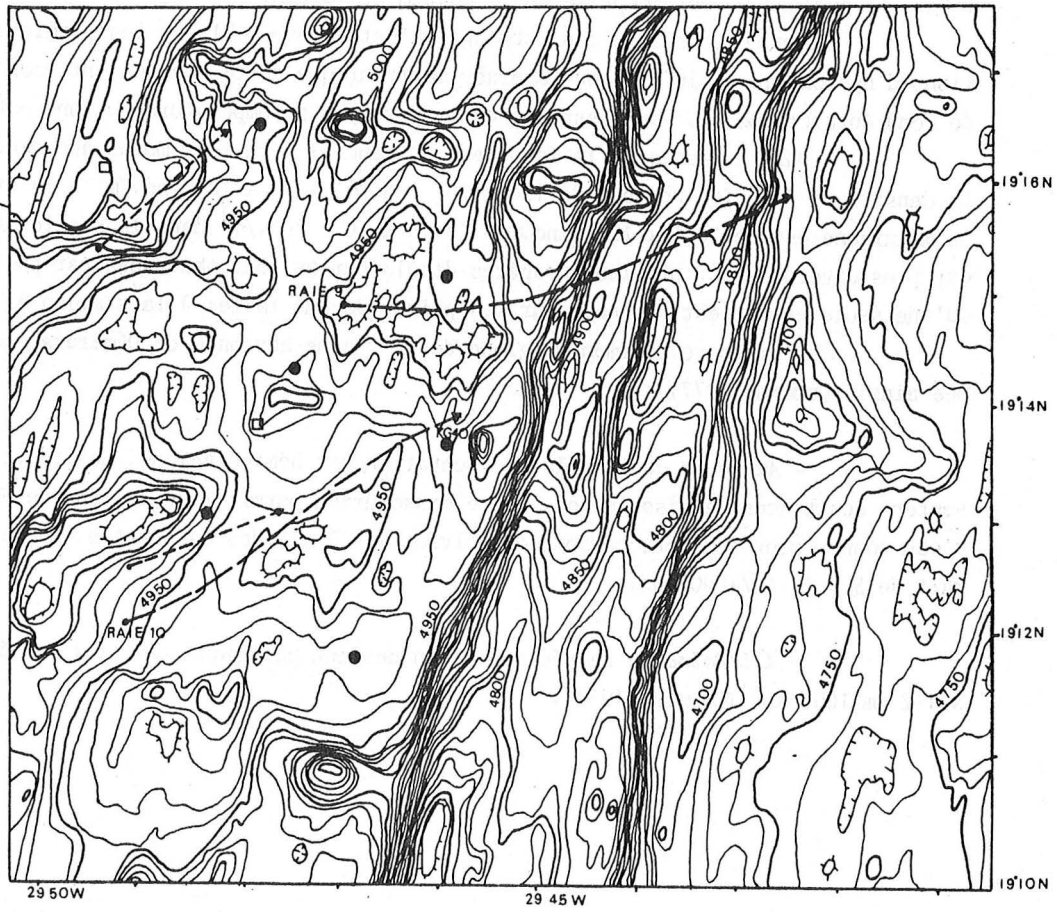


Fig.5: Carte des prélèvements de la station CV2.

C - PLAINE ABYSSALE DU CAP VERT (STATION CV1)

La station CV1 s'étend de 24°48'N à 24°55'N en latitude et de 24°54'W à 25°04'W en longitude (fig. 4). La pente est faible et inclinée vers l'Ouest. La profondeur est comprise entre 5190 et 5205 m.

Pendant sept mois (à partir d'octobre 1980, mission Seabed 1) des courantomètres ont été mouillés à cette station. Les résultats préliminaires donnent une intensité maximale du courant de fond égale à 9 cm/s.

La station est baignée par un mélange de masses d'eau dont l'Eau de Fond Antarctique qui est moins importante que dans la Plaine abyssale de Démérara à la station B (A. Vangriesheim, comm. pers.).

Ce secteur est le plus pauvre des six stations étudiées d'un point de vue faunistique. L'abondance de la meïofaune, évaluée à partir de cinq carottages, est de 66 x 10^3 ind./m^2, respectivement. La mégafaune est dominée par les macroures et est 10 fois moins dense qu'à la station A, soit 2,6 x 10^{-3} ind./m^2.

Peu de travaux sédimentologiques ont été réalisés dans ce secteur du Bassin du Cap Vert. Berger et Von Rad (1972) (à partir des résultats du Leg 14 (D.S.D.P.)) estiment que la sédimentation *quaternaire*, dans cette région de l'Atlantique, est de deux types : soit ce sont des vases calcaires riches en nannofossiles et foraminifères, avec un taux de sédimentation de 1 à 3 cm/1000 ans, soit des argiles brunes avec un taux de sédimentation égal à 0,2-0,4 cm/1000 ans. Dans cette même zone les boues carbonatées présentent des niveaux silteux turbiditiques (Embley, Jacobi, 1977).

D - PLATEAU ABYSSAL DU CAP VERT (STATION CV2)

Sur le "Plateau" abyssal du Cap Vert, le secteur choisi, station CV2, s'étend de 19°10'N à 19°17'N en latitude, et de 29°00'50W à 29°50'W en longitude (fig. 5).

La direction générale des structures (collines abyssales) est NNE-SSW. Les pentes les plus importantes sont de l'ordre de 25 %. La pente de l'ensemble de la station est inclinée vers l'Est. Les profondeurs sont comprises entre 4730 m et 5100 m.

Pendant sept mois (à partir d'octobre 1980, mission Seabed 1) des courantomètres ont été mouillés. Les premiers résultats donnent une intensité maximale du courant de fond de 12 cm/s (A. Vangriesheim, comm. pers.). L'eau du fond prélevée à cette station est une masse d'eau mélangée avec de l'Eau de Fond Antarctique dans des proportions plus faibles que dans la Plaine abyssale de Démérara à la station B.

La faune, dans cette station, est plus abondante qu'à la station CV1, en particulier la mégafaune (7,5 x 10^{-3} ind./m^2), dominée par les bivalves (4,5 x 10^{-3} ind./m^2). Les photographies montrent une certaine richesse en sipunculiens et en macroures.

Les études sédimentologiques de Perterson *et al.* (1972) après le Leg 2 (du Deep Sea Drilling Project, site 12) montrent que les sédiments de "surface",datés *quaternaires*, sont riches en $CaCO_3$ (soit 74 %). Le taux de sédimentation moyen pour l'ensemble Pleistocène-Holocène serait estimé à 0,9 cm/1000 ans (Peterson *et al.*, 1972).

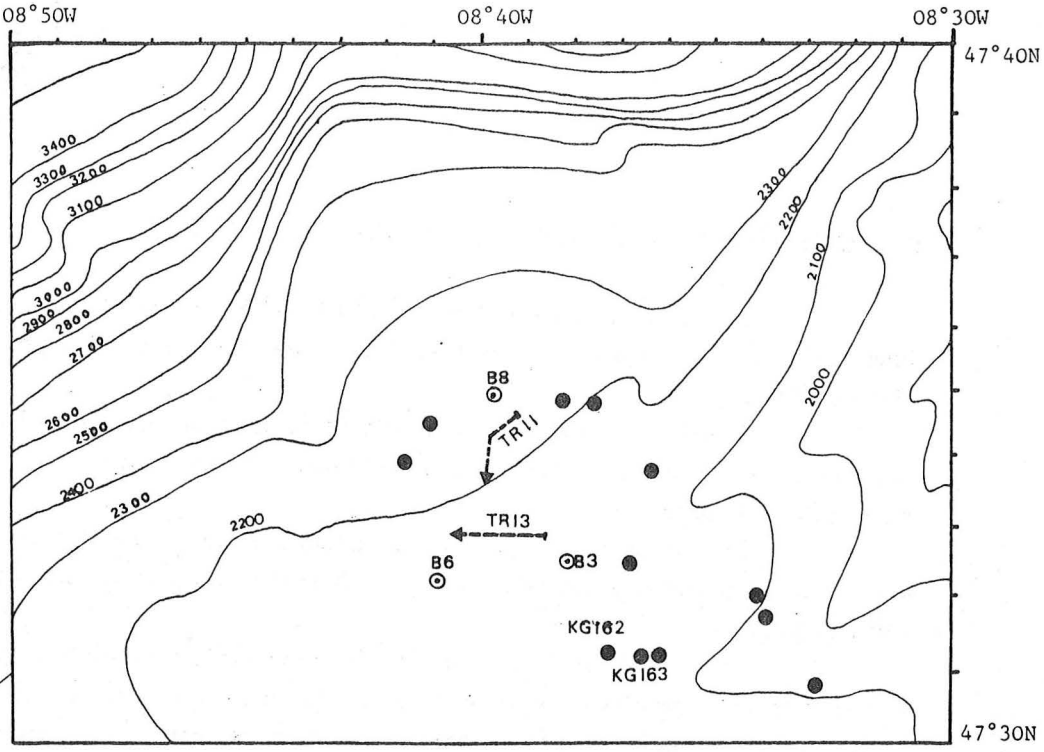
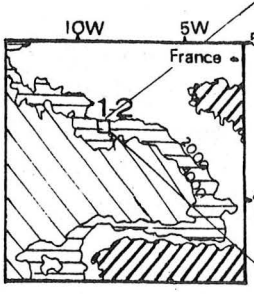


Fig. 6: Carte des prélèvements de la station 1.



0 2km
echelle 1/15800*

⊙ B : BALISE ACOUSTIQUE
● KG:CAROTTIER
TR:TROIKA

d'après G.A.AUFFRET
(thèse en cours)

. Le trait TR 02 est situé plus à l'EST.

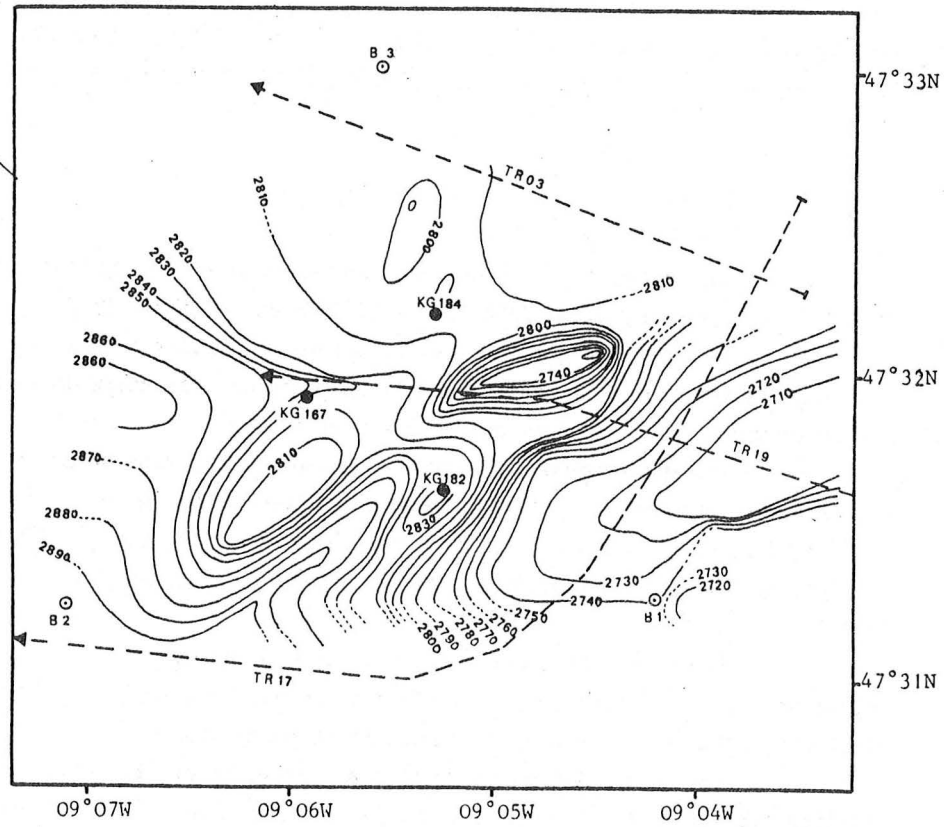


Fig.7: Carte des prélèvements de la station 2.

UNIVERSITE DE LYON
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE

E - *TERRASSE DE MERIADZEK (STATION 1)*

Cette Terrasse se situe sur la Marge Nord du Golfe de Gascogne. Elle est bordée de 2 canyons : canyon de Shamrock (à l'Ouest) et canyon de Blackmud (à l'Est), orientés NE-SW.

La station s'étend de 47°30'N à 47°40'N en latitude et de 8°30'W à 8°50'W en longitude (fig. 6). La topographie fait apparaître une pente douce de 5,5 % environ, inclinée vers le SW. La profondeur moyenne de cette station est de 2100 m.

Cette station est sous l'influence de l'Eau Profonde Nord Atlantique. Cette masse d'eau est affectée par des courants alternatifs d'intensité pouvant atteindre 25 cm/s, d'orientation N-NE, S-SW (Gould, Mac Kee, 1973).

Dans cette station, la faune récoltée ou observée est la plus abondante et la plus riche de l'ensemble des secteurs étudiés. La meïofaune (501 x 10^{-3} ind./m^2) est 7,6 fois plus dense qu'à la station CV1 (station où la faune est la plus pauvre), la mégafaune (106,9 x 10^{-3} ind./m^2) 41 fois plus dense. De nombreux groupes zoologiques sont représentés: 21(4 à la station CV1), et les holothurides dominent la faune observée sur les prises de vues, les ophiures, la faune récoltée par chalutage.

De nombreuses études sédimentologiques ont été menées sur la Marge du Golfe de Gascogne (Auffret *et al.*, 1975 a, 1975 b, 1977, 1978, 1979 ; Grousset, 1977). A l'*Holocène*, la sédimentation de la Terrasse de Meriadzek est carbonatée (60 % de $CaCO_3$) et riche en foraminifères planctoniques. Le taux de sédimentation pour cette période est de 3 à 9 cm/1000 ans (Auffret, 1979).

F - *RIDE AEGIS (STATION 2)*

La ride Aegis se situe à l'Ouest de la Terrasse de Meriadzek, au débouché du canyon de Shamrock. La station 2 s'étend de 47°31'N à 47°33'N de latitude, et de 09°04'W à 09°07'W de longitude. La carte bathymétrique montre une topographie constituée de reliefs et de chenaux, orientés NE-SW. Les profondeurs augmentent vers le Sud-Ouest : 2710 m à 2890 m. La pente moyenne est de 6 % (fig. 7).

Cette station est baignée par l'Eau de Fond Nord Atlantique. Elle est soumise à un régime hydrodynamique important (courant de 30 cm/s). Sur les photographies du fond, l'orientation des rides de courant, de longueur d'ondes égale à 25 cm et d'amplitude égale à 5 cm, suggèrent un courant qui porterait vers le Sud-Ouest (G. Auffret, 1975 a).

A cette station, la faune récoltée est abondante, en particulier la macrofaune (4802 ind./m^2), dominée par les nématodes (74 %). La mégafaune vagile observée est peu abondante, et la mégafaune récoltée est riche en organismes fouisseurs (polychètes, ophiures). Ces deux caractères peuvent être liés à l'importance des courants connus dans ce secteur.

Les données bibliographiques des travaux de sédimentologie sur la Ride Aegis montrent que la sédimentation est plus détritique que celle de la Terrasse de Meriadzek (Auffret *et al.*, 1975 a). La teneur en $CaCO_3$ des sédiments superficiels est comprise entre 50 et 60 %. A cette station, sont observés dans les carottiers et sur les photographies sous-marines, de nombreux blocs, cailloutis, provenant du délestage de glaces flottantes pléistocènes.

IV - IMPORTANCE DE LA FAUNE

L'étude de la bioturbation comprend nécessairement l'analyse des relations entre la faune et les sédiments. Seule la faune mobile, responsable de remaniements sédimentaires, a été considérée dans cette étude. Les données faunistiques disponibles concernent les répartitions des différents groupes zoologiques (embranchements, classes) et leur abondance. Les modes de locomotion des organismes (nageur, rampant, fouisseur) sont attribués à chaque groupe zoologique. Dans les secteurs étudiés, plusieurs types de prélèvements ont été réalisés. Ils permettent de quantifier l'abondance de la faune (densité : nombre d'individus/surface), correspondant à toutes les tailles d'organismes des différents groupes zoologiques. Le tri des groupes zoologiques est effectué par le CENTOB.

A - *DEFINITION DES CATEGORIES FAUNISTIQUES*

La faune est récoltée par chalutage et par carottage. La première technique permet de recueillir la faune de grande taille (supérieure à 1 mm), appelée *mégafaune*. C'est cette catégorie de taille de faune qui est observée sur les prises de vue du fond. Seuls les organismes dont la taille est supérieure au centimètre peuvent être discernés.

Le carottier à grande surface (0,25 m^2) prélève les sédiments superficiels où vivent toutes les catégories de faune : la meïofaune, la macrofaune et la mégafaune. La *meïofaune* représente la faune de petite taille (supérieure à 50 µm et inférieure à 250 µm). La *macrofaune* réunit tous les organismes dont la taille est supérieure à 250 µm. La meïofaune et la macrofaune ne sont pas visibles sur les photographies du fond.

Plusieurs carottages, chalutages et traits photographiques ont été effectués dans les secteurs étudiés. Les densités faunistiques qui ont été retenues comme paramètres nécessaires pour cette analyse, correspondent à l'ensemble des résultats recueillis par des spécialistes des différentes catégories d'organismes mobiles (annexe 1).

B - *DENSITES TOTALES DE LA FAUNE DANS LES SECTEURS PROSPECTES*

Le tableau (fig. 8) indique les résultats obtenus pour les trois grandes catégories d'organismes.

Plusieurs manifestations de la bioturbation étant recherchées dans ce travail, il est nécessaire de distinguer les organismes particulièrement responsables du mélange superficiel des sédiments ou des grandes figures sédimentaires (pistes, terriers...). En effet, l'étude des carottes de sédiments permet d'apprécier par mesures radiochimiques l'intensité d'un mélange. Ce paramètre de la bioturbation, analysé dans le chapitre 3, est surtout le résultat de l'activité de l'endofaune et peut donc être comparé à l'abondance de la meïofaune et de la macrofaune.

Secteur géographique	Terr. de Meriadzek	Ride Aegis	Cône Amazone	Pl. abys. Démérara	Pl. abys. Cap Vert	Plat.abys. Cap Vert
Station	1	2	A	B	CV1	CV2
densité meïofaune (x 10^3 ind./m^2)	501	388	277	134	66	75
densité macrofaune (x ind./m^2)	2793	4802	1793	1198	428	482
densité megafaune récoltée (x 10^{-3} ind./m^2) mobile	107	92	24	11	3	8
nombre groupes zoologiques	21	24	15	16	4	7
densité megafaune observée (x 10^{-3} ind./m^2)	66	39	23	51	-	36
nombre de groupes zoologiques	6	8	6	5	-	6

Fig. 8 - Densités totales (nombre ind./m^2) dans les six secteurs étudiés.

En revanche, les figures sédimentaires observées sur les prises de vue du fond, dont la distribution est étudiée dans le chapitre suivant, sont occasionnées par la mégafaune constituée des grands invertébrés et des vertébrés. L'ensemble des traces ne peut toutefois être relié à la seule faune présente, mais correspond évidemment à l'activité de la faune sur plusieurs décennies. Une certaine prudence doit donc être apportée quant à la responsabilité et à l'abondance des traces observées par rapport à la diversité et la densité des organismes observés ou récoltés au cours des missions. Cependant, l'écosystème benthique profond est considéré comme relativement stable depuis plusieurs centaines d'années. Ainsi, il est vraisemblable que la diversité et la densité de la mégafaune ont peu varié dans le temps. Ceci permet de mettre en relation un ensemble de traces variées avec les données faunistiques actuelles. Une correction reste néanmoins nécessaire pour évaluer la densité de traces réalisées au cours d'une même période de temps dans les six stations.

Les données de la mégafaune obtenues par chalutage et par photographie étant complémentaires (Rice *et al.*, 1982), l'évaluation de la densité est recherchée à partir de ces deux sources d'information. La densité et la diversité obtenues d'après les chalutages sont en général plus élevées (fig. 8). Seules les stations B et CV2 présentent des densités relativement fortes de la mégafaune observée. Ceci s'explique par une éventuelle abondance des sipunculiens (toutefois peu discernables) dans ces secteurs. De plus, les sipunculiens sont des organismes extrêmement fragiles et difficiles à récolter par chalutage.

L'importance et la diversité de la faune récoltée peuvent être expliquées de plusieurs manières. Les organismes de taille inférieure à 1 cm ne pouvant pas être discernés sur les prises de

vue, mais sont récoltés par chalutage. Sur les photographies, seule l'épifaune rampante et nageuse est observée, alors que l'endofaune et les organismes fouisseurs sont également recueillis dans les chaluts. Ces deux techniques sont donc complémentaires puisque, par ailleurs, des organismes nageurs ne peuvent pas être capturés par chalutage, mais observés sur les photographies (Rice *et al.*, 1982).

chapitre 2 :

Photographies

I - TECHNIQUES ET METHODES

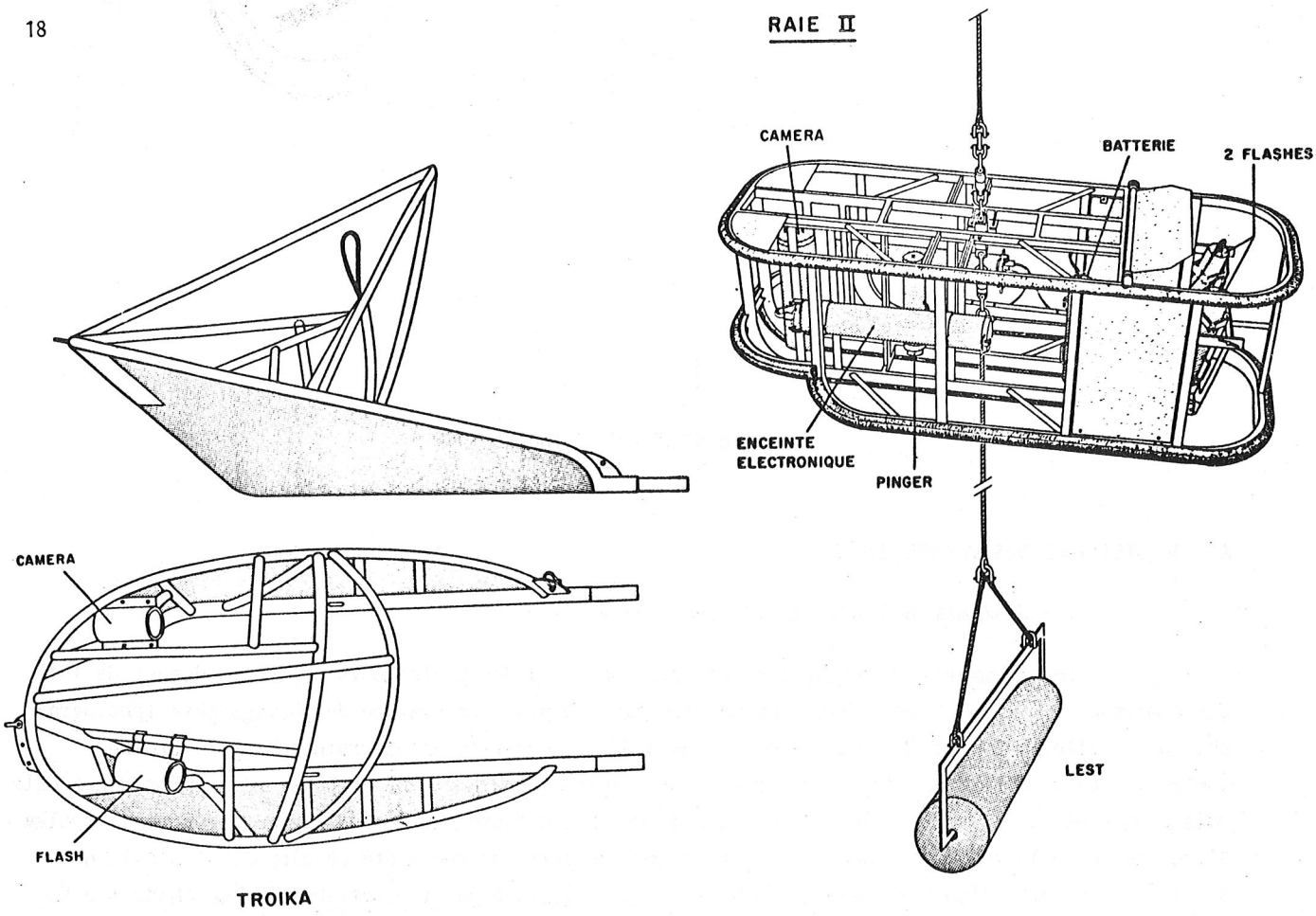
A - *ACQUISITIONS DES DONNEES EN MER*

1 - Systèmes de photographies sous-marines

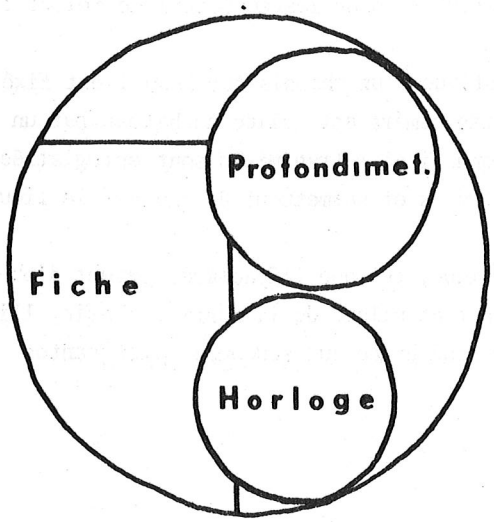
Les premières photographies des fonds marins à des profondeurs abyssales datent de 1947. Une caméra et un flash étaient fixés sur un carottier. Depuis, ce système de photographie (photographie ponctuelle) a évolué. Le chassis est transformé par Cousteau en un traineau appelé troïka (Hersey, 1967). Ce traineau est tiré sur le fond, ainsi la surface photographiée n'est plus ponctuelle mais plus étendue. La surface de chaque prise de vue n'est toutefois pas constante, puisque la troïka s'incline selon le relief du fond. Un autre système de prise de vue a été développé. Il s'agit du R.A.I.E., constitué d'un chassis qui est à 3 ou 5 m d'altitude par rapport au fond. Ce chassis a un lest cylindrique qui roule sur le fond pour le stabiliser (Jarry *et al.*, 1979). Les photographies sont prises plus ou moins à la même hauteur et la surface de chaque photographie est plus ou moins constante. Ces systèmes (Troïka et R.A.I.E.) sont tractés par le navire. Les opérations sont délicates et dépendent des conditions de mer. Ces chassis peuvent "crocher" dans les accidents de relief : faille, "pillow-lava", bloc rocheux...

Le "Deep Tow", développé aux Etats Unis, est constitué d'un chassis sur lequel est fixé un grand nombre d'appareils dont une caméra de télévision. Cette caméra est reliée au bateau par un câble électroporteur (Boegeman *et al.*, 1972). Les images du fond ainsi retransmises sont enregistrées sur le bateau. Les clichés intéressants sont immédiatement extraits et permettent de choisir le lieu exact à prospecter.

Une génération plus récente de système photographique, tel que l'Epaulard, permet d'obtenir des prises de vue à partir d'un engin robotisé indépendant et piloté de la surface. Enfin, l'idéal pour des observations visuelles, reste la vue directe du fond grâce aux soucoupes plongeantes habitées.



ENGINS PHOTOGRAPHIQUES:TROIKA ET R.A.I.E. 2



Chambre des données (troika): fiche (nom de la campagne,du navire, date, n° de trait), profondimètre (en km), horloge (heure, minute et seconde).

N	U	M	E
A	J	H	E
L	O	M	I
T	U	S	E

NUME n° de photographie
ALT altitude
JOU jour
HE heure
MI minute
SE seconde

chambre des données (RAIE 2)

Fig. 9 - Systèmes photographiques utilisés par l'équipe d'écologie abyssale du C.O.B.

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE

2 - Systèmes photographiques utilisés

a) troïka

La troïka est le système utilisé au cours des missions Polygas, Biogas 8 et 10, dans le Golfe de Gascogne. Sur le traîneau sont fixés une caméra (objectif 35 mm), un flash et une balise acoustique, pour suivre la route de l'engin (fig. 9). La vitesse moyenne du bateau pendant le trait est de 1,2 n. La cadence de prises de vues est de 6 à 10 s. Sur chaque photographie, une chambre de données indique le nom de la mission, du bateau, le numéro du film, la date, l'heure, les minutes, les secondes et la profondeur en km (fig. 9).

La prise de vue est oblique, la surface photographiée est de 5 m^2 environ pour les prises de vues faites au cours de la mission Polygas, elle est égale à 2,50 m^2 pour les photographies réalisées au cours des missions Biogas 8 et 10. La différence est due à une inclinaison plus importante de la caméra sur le chassis, recherchée pour obtenir une information plus précise sur les organismes et les figures sédimentaires de petite taille.

La surface totale photographiée a été calculée à partir de la surface approximative de chaque photographie et du nombre de photographies :

Nombre de photographies	surface/photographie	surface totale
500	2,5 m^2	1250 m^2
	5 m^2	2500 m^2
800	2,5 m^2	2000 m^2
	5 m^2	4000 m^2

Toutes ces photographies ne sont pas exploitables. Par exemple à la station 1, dans le Golfe de Gascogne, 2100 photographies ont été prises, 572 sont exploitables.

b) système R.A.I.E. 2 (remorquage abyssal d'instruments pour l'exploration)

Ce système a été utilisé pour les missions Demeraby et Seabed 2. Le principe du système consiste en un chassis ou poisson remorqué à 3 m en moyenne au-dessus du fond, stabilisé par un lest roulant sur le fond (fig. 9). Sur ce chassis sont fixés une caméra (objectif 35 mm), deux flashs, un "pinger" (pour connaître l'altitude du poisson) et une balise acoustique. La vitesse moyenne du bateau pendant le trait est de 1,2 à 1,5 n. La cadence de prise de vue a été programmée à 4 et à 5 s, afin d'avoir une image continue du fond. La chambre de données, apparaissant sur chaque prise de vue, indique le numéro du trait, l'altitude, le jour, l'heure, les minutes et les secondes (fig. 9).

La prise de vue est subverticale car la caméra est inclinée de 10° par rapport à la verticale. A la mission Demeraby, dans le Cône de l'Amazone, l'ensemble du poisson avait un angle de 20°

avec l'horizontale. Cette transformation devait permettre une prise de vue oblique pour une meilleure observation des traces en relief. L'engin n'étant pas adapté à cette configuration, des difficultés pour obtenir une image continue du fond ont conduit à travailler par la suite selon la position originale (horizontale).

Suivant les deux configurations : poisson oblique et poisson horizontal, la surface photographiée est différente. Elle dépend aussi de l'altitude du poisson ainsi :

- poisson oblique : altitude 3,5 m : surface 15,50 m^2/photographie.
  altitude 3 m : surface 10,90 m^2/photographie.
- poisson horizontal : altitude 3 m : surface 7,00 m^2/photographie.
  altitude 2,5 m : surface 3,85 m^2/photographie.

Dans le cas optimal où toute la longueur du film est photographiée au fond, les surfaces photographiées sont les suivantes :

longueur du film	position du poisson	altitude du poisson	surface totale photographiée
90 m (2350 photos)	oblique	3,5 m	36425 m^2
		3 m	25615 m^2
	horizontale	3 m	16450 m^2
		2,5 m	90475 m^2
120 m (3150 photos)	oblique	3,5 m	48825 m^2
		3 m	34335 m^2
	horizontale	3 m	22050 m^2
		2,5 m	12127,5 m^2

En réalité toutes ces photographies ne peuvent être exploitées. Ainsi, dans la station CV2 du Bassin du Cap Vert, 5500 photographies ont été prises, seulement 576 ont pu être étudiées. De même, à la station B du Bassin de Démérara, sur les 6300 photographies réalisées, 530 ont pu être considérées. Ce petit nombre de photographies exploitées est dû à des problèmes techniques. L'ensemble des données techniques de cette étude est donné en annexe 1.

A bord du navire, à la fin de chacune des opérations de photographies sous-marines, quelques mètres de film sont développés, pour s'assurer du bon déroulement du film, de la qualité de la prise de vue, et pour prendre connaissance avec les problèmes techniques éventuels.

B - EXAMEN DES PHOTOGRAPHIES

1 - *Premières observations*

Chaque film est visionné afin de repérer les figures sédimentaires d'un type nouveau. Chaque nouvelle trace est alors décrite et détaillée afin de pouvoir la situer dans la classification.

Ce premier examen permet d'avoir une vue d'ensemble de la station étudiée et d'évaluer le nombre de photographies exploitables. Il est en effet difficile d'exploiter le film en entier. Plusieurs causes expliquent cette irrégularité : dans le cas des photographies prises par le système R.A.I.E., le poisson n'est pas à son altitude optimale. Ceci entraîne, soit un manque de netteté de la photographie, soit un nuage de sédiment lorsque le lest heurte le fond. Dans le cas de photographies prises avec une troïka, le traîneau peut progresser brutalement (changement de pente, reliefs, vitesse de remorquage non régulière) provoquant un nuage de sédiments. Enfin, il arrive parfois que des problèmes techniques (faiblesse de batteries de flash et de caméra, par exemple) interviennent également pour les deux systèmes.

Les photographies exploitables, considérées prises à la bonne altitude, sont examinées une à une. Les observations qualitatives et quantitatives sont reportées sur une fiche. Toutes les fiches sont classées chronologiquement, en suivant le déroulement du trait. Dès l'observation de nouvelles traces, ces fiches sont remises à jour puisqu'elles sont établies suivant la classification.

2 - *Classification des traces organiques*

La première classification des traces organiques, observées sur les roches sédimentaires est de Winkler en 1828. Depuis, plusieurs classifications ont été données, établies selon 4 principes : la morphologie des traces (Lessertisseur, 1955), leur toponomie (Martinson, 1970), l'ethologie qu'elles impliquent (Seilacher, 1953 ; Simpson, 1975), leur origine biologique et leur génétique (Krejci-Graf, 1932, cité par Lessertisseur, 1955).

Une seule classification des traces organiques récentes, observées dans le domaine profond, par photographies sous-marines est connue dans la littérature : celle d'Ewing et Davis, 1967. Ils s'appuient sur la morphologie des figures pour constituer 6 groupes distincts et n'attribuent aucun nom précis à chaque trace. A partir de ce premier classement et de nouvelles observations de prises de vue du fond, une classification a été adoptée (Sibuet *et al.*, 1980). Elle permet de prendre en considération toutes les formes de traces déjà rencontrées et toute nouvelle figure éventuelle.

Elle comprend deux groupes distincts :

- traces superficielles, engendrées par une activité à la surface des sédiments ;
- traces à relief, occasionnées par un remaniement sédimentaire en profondeur.

Cette classification est simple en l'absence de données supplémentaires concernant l'origine et les auteurs de la plupart des traces. Afin de faciliter la présentation des diagrammes des densités de traces, chaque type de trace est identifié par une lettre et un nombre (le code d'identification est donné en annexe 1).

<u>Traces superficielles</u> (S) : il existe trois types de traces superficielles (fig. 10).

- *S1 - les pistes* : elles sont subdivisées en trois : les sillons, les rides et les pistes d'organismes connus.
  . *sillon* *simple (S11)* : droit ou sinueux, 1 à 2 cm de large.
  discontinu (S12) : succession de petites perforations, laissées peut-être par un poisson (Heezen et Hollister, 1971).

double (S13) : deux sillons parallèles séparés par une ride (largeur totale : 5 à 8 cm), souvent parsemés de pelotes fécales. L'organisme responsable serait une holothurie (*Psychoprotes longicauda*) à podia développés, déjà observée à la fin de cette trace, par 4800 m dans le Golfe de Gascogne (Mauviel, 1979).

. *ride* *simple (S14)* : droite ou sinueuse (largeur : 1 à 2 cm).

en épi (S15) : ride principale avec des prolongations latérales, formant un angle avec la ride principale.

bosselée (S16) : ride sinueuse ponctuée de chaque côté par des perforations (largeur totale : 10 à 15 cm). La surface de la ride présente l'aspect "cire d'abeille". L'organisme responsable serait une asterie selon Hollister *et al.* (1975).

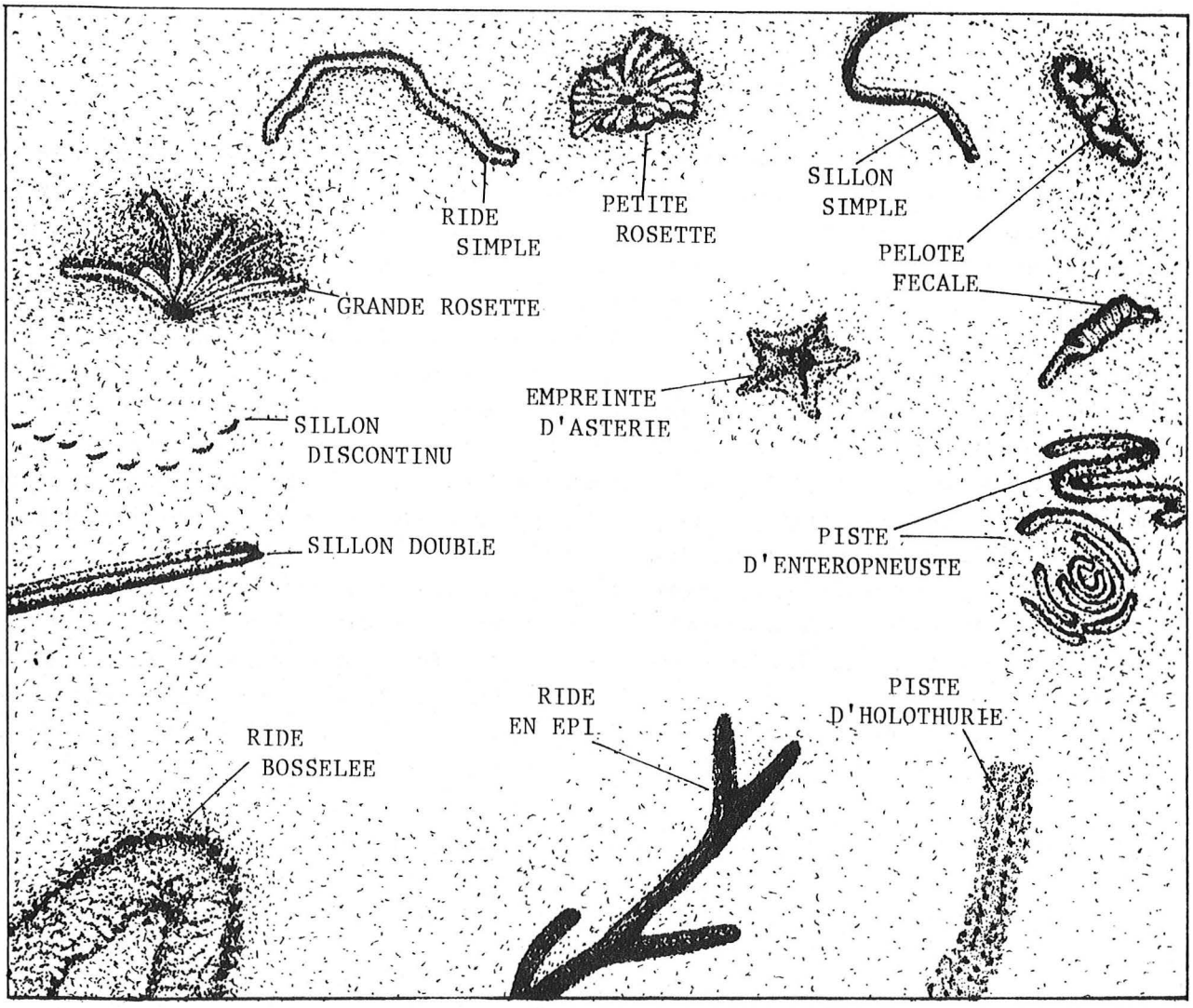


Fig. 10 - Traces superficielles.

0 10 20cm

. *piste d'holothurie (S17)* : quatre rangées de ponctuations peu profondes (largeur totale : 5 à 8 cm). Plusieurs espèces d'holothuries possédant des podia ont été observées sur cette piste (Heezen et Hollister, 1971).

. *piste d'enteropneuste (S18)* : ride en spirale ou à méandres, parfois incomplète (largeur totale : 10 à 20 cm). Un enteropneuste est souvent associé à cette trace (Bourne et Heezen, 1965). Cette trace appelée Spiroraphe en paléoichnologie est caractéristique du milieu abyssal (Ekdale, 1980).

- *S2 - les pelotes fécales - (S21)* : déjections en forme de tortillon ou de boudin, elles proviennent, en général, des holothuries.

- *S3 - les empreintes*

. *rosette petite (S31)* : rayons petits et larges, disposés en cercle autour d'un terrier (diamètre : 10 à 15 cm). Elles sont souvent disposées en essaim.

grande (S32) : les rayons sont plus étroits et peuvent atteindre 30 cm de longueur. Cette rosette est parfois associée à un grand tumulus, un volcan ou à un tumulus crevassé.

Ces deux traces seraient réalisées par un polychète, par un echiurien ou par un lamellibranche, qui lècherait le sédiment de sa trompe (Hollister *et al.*, 1975).

. *d'asterie (S33)* : même forme que l'organisme.

<u>Traces à relief</u> (R). Elles sont de trois types :

- relief convexe (bombement, R1) } fig. 11
- relief concave (dépression, R2) } fig. 11
- relief complexe (bombement et dépression, R3) (fig. 12).

- *R1 - Relief convexe*

. *tumulus petit (R11)* : cône plus ou moins aplani (hauteur : 10 cm environ).

grand (R12) : même forme mais plus important (hauteur : 30 à 40 cm).

. *bourrelet (R13)* : bombement plus long que large, sans ornementation (hauteur : 20 cm environ).

- *R2 - Relief concave*

. *terrier simple (R21)* : les poissons, les crustacés, les holothuries et les mollusques peuvent s'y cacher (Hollister *et al.*, 1925).

à dépôt (R22) : le terrier est comblé par un nuage floconneux (diamètre : 10 à 15 cm environ.

circulaires (R23) : les terriers forment un cercle plus ou moins régulier (diamètre moyen : 30 à 40 cm). La partie centrale est plane. L'organisme responsable serait une asteride (Hollister *et al.*, 1975).

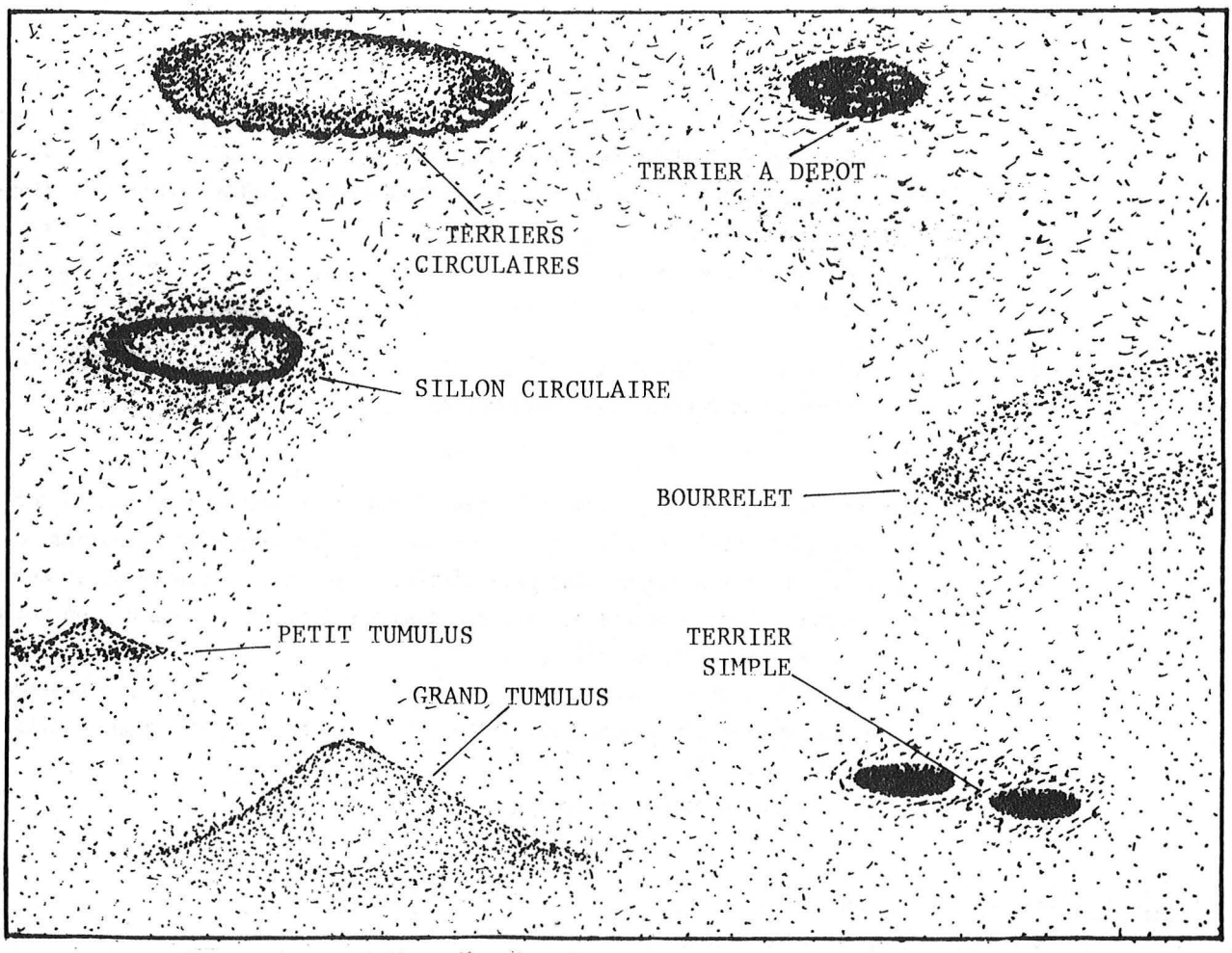


Fig. 11 - Traces à relief convexe et à relief concave. 0 10 20cm

. *sillon circulaire (R24)* : sillon profond, en forme de cercle (diamètre moyen : 10 cm). Un sipunculien est souvent fixé au centre du cercle.

- R3 - *Relief complexe*

. *souille petite (R31)* : dépression bordée d'un bombement de petite taille : 10 à 15 cm.

grande (R32) : même forme, de taille plus importante, allant jusqu'à 1 m environ.

Les organismes responsables de ces deux traces sont des fouisseurs, comme certains poissons.

allongée (R33) : petite souille plus longue que large (longueur : 8 à 10 cm). Un crustacé du genre *Polychèle* a été observé à plusieurs reprises dans cette étude, creusant cette souille.

. *volcan (R34)* : terrier situé au sommet d'un cône (hauteur : 15 à 30 cm). Le tumulus serait, peut-être, un volcan ancien dont la perforation apicale aurait été comblée.

. *cratère double (R35)* : deux terriers proches dans une petite dépression bordée d'une ride (longueur : 10 à 12 cm, largeur : 5 à 7 cm).

. *tumulus crevassé (R36)* : cône dont le sommet se serait lézardé à la sortie de l'organisme responsable (hauteur : 10 à 20 cm).

. *terriers-volcans alignés (R37)* (longueur : 30 à 50 cm).

. *tumulus* entouré de *petits terriers (R38)*
grands terriers (R39)
Les organismes responsables seraient des echiuriens (Heezen et Hollister, 1971) ou des asteries ou des ophiures (Hollister *et al.*, 1975).

. *tumulus et 1 terrier (R310)* : un terrier au pied d'un tumulus (hauteur : 20 à 30 cm). Cette trace pourrait être considérée comme la première phase des deux traces précédentes.

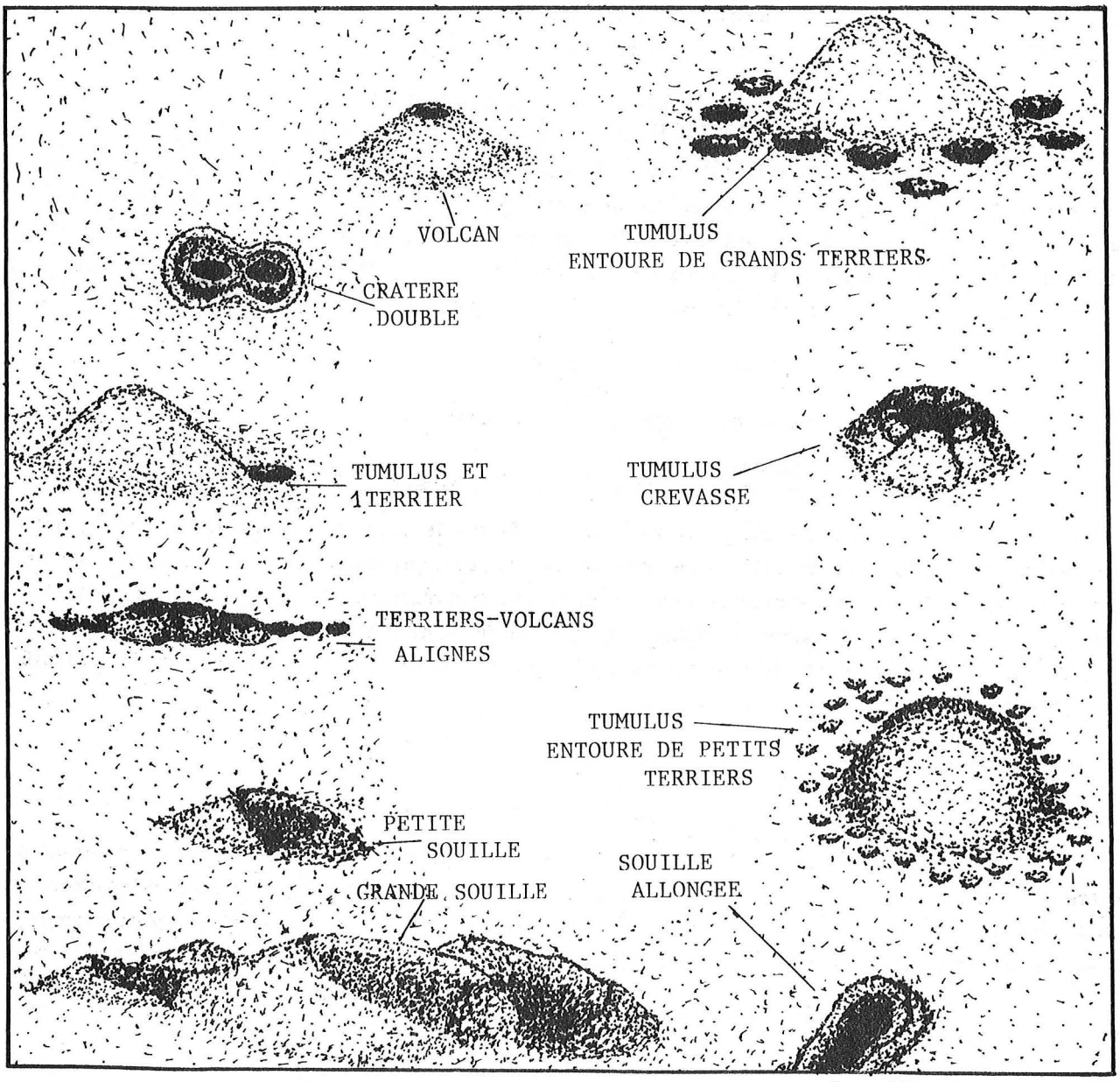


Fig. 12 - Traces à relief complexe.

0 10 20cm

3 - *Traitements des données*

Les traitements des données obtenues à partir des observations des séries de photographies, prises à chaque station, portent sur la densité, la diversité des traces. Une comparaison entre les différentes stations est ensuite proposée.

a) traitements des données dans chaque station

- densité : dans chaque station, ont été réalisés plusieurs traits regroupant un certain nombre de photographies. Pour chaque trait, la densité de chaque type de trace observé est estimée et exprimée en nombre de traces/1000 m^2. La *densité moyenne* de chaque type de trace est calculée pour l'ensemble de la station. Ces densités moyennes sont représentées sur un diagramme : en abscisses, les types de traces et en ordonnées (à l'échelle logaritmique) les densités en nombre de traces/1000 m^2. La *densité totale* des traces est également évaluée :

$$\frac{\text{nombre total de traces}}{\text{surface totale photographiée}} : \text{nombre de traces/1000 m}^2$$

- diversité : un indice de diversité est un paramètre évalué en écologie, qui indique une notion de richesse spécifique tout en tenant compte de la distribution quantitative de chacune des espèces. Cet indice peut être appliqué pour l'analyse des différentes catégories de traces. Il existe plusieurs indices permettant de mesurer la diversité (Peet, 1974 ; Patil et Taillie, 1978). L'indice retenu pour cette analyse est *celui de Shannon* (Shannon et Weaver, 1963) :

$$H(S) = \sum_i - Pi \log_2 Pi$$

avec S = nombre total de traces (dans ce cas : type de traces)

$$Pi = \frac{\text{nombre de traces i}}{\text{nombre total de traces dans le prélèvement}}$$

Peet explique que cette diversité est basée sur le concept de l'hétérogénéité, et que cet indice est sensible aux variations des espèces rares, peu représentées. Fager (1972) précise que cet indice ne considère aucune propriété de distribution, contrairement à l'indice calculé selon le principe de raréfaction (principe de richesse spécifique de Sanders) qui surestime la diversité. L'indice de Shannon est apparu le mieux approprié pour une étude de diversité des traces, et est calculé pour chaque trait et chaque station.

b) méthodes de comparaison entre les stations

- échantillonnage significatif

Il est important avant toute analyse de distribution quantitative et toute comparaison entre les données de plusieurs stations, de tester la valeur de l'échantillonnage et de s'assurer qu'il est représentatif de chaque secteur étudié (Sibuet, 1977). Dans le cas de séries photographiques, il est en effet nécessaire de vérifier l'information concernant la diversité des traces (nom-

UNIVERSITE DE LYON
DEPARTEMENT DE GÉOLOGIE

bre de types de traces reconnus), à partir d'un cumul de relevés photographiques. Lorsque le cumul de données n'apporte plus d'élément nouveau, l'asymptote atteinte confirme la validité de l'échantillonnage.

- indice de similarité

Une comparaison des stations 2 à 2 est envisagée en recherchant la similitude entre les stations. L'*indice de Kulczinski 2* a été choisi pour cette analyse. Il est établi à partir des critères de présence-absence des traces, mais ne tient pas compte des doubles absences (Blanc *et al.*, 1976). Ces auteurs précisent que cet indice est, parmi tous les indices de similarité, le moins influencé par la dissymétrie de taille entre les échantillons :

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{S + u} + \frac{S}{S + v} \right)$$

où S = types de traces communes aux deux échantillons
u = types de traces du premier échantillon
v = types de traces du second échantillon.

- diagramme tridimensionnel (stations, types de traces, densités moyennes)

Ce diagramme permet une comparaison entre toutes les stations. Il se présente sous la forme d'*histogrammes isométriques tridimensionnels* (1 axe = station, 1 axe = types de traces, 1 axe = densités moyennes). Pour faciliter cette représentation une limite inférieure de la densité moyenne a été déterminée : 1 trace/1000 m^2.

II - RESULTATS

A - ANALYSES DES DONNEES PHOTOGRAPHIQUES POUR CHAQUE STATION

1 - Cône inférieur de l'Amazone : station A

A cette station, 2 traits (RAIE 1 - RAIE 2) ont été réalisés (fig. 2), 522 photographies ont été exploitées, représentant une surface totale de 8091 m^2.

a) densités des traces

Les densités moyennes de chaque type de traces pour tous les traits et pour chaque station sont présentées en annexe. Pour la station A, le diagramme des densités moyennes (fig. 13) montre que les traces à relief sont plus abondantes (83 % de toutes les traces) que les traces superficielles. Les *sillons circulaires* (R24) (112 /1000 m^2) dominent l'ensemble des traces. Les *petits tumuli* (R11),

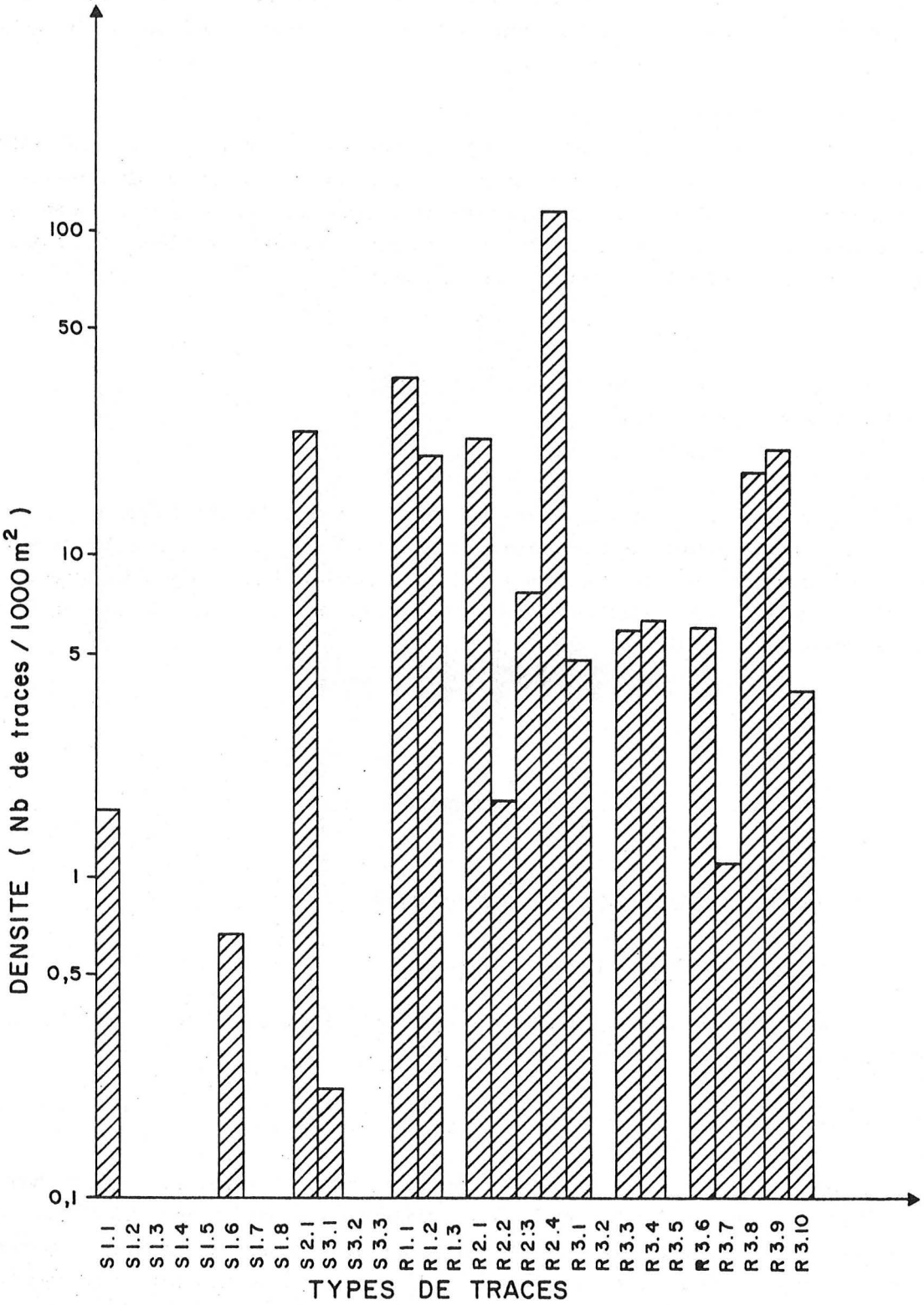


Fig.13- Diagramme des densités des traces observées à la station A.

les *pelotes fécales* (S21) et les *terriers simples* (R21) sont relativement importants.

La densité totale des traces, à cette station est 319 traces/1000 m^2.

b) diversité des traces

18 catégories de traces ont été identifiées et se répartissent dans un ensemble de 2578 traces. L'indice de Shannon obtenu pour cette station est de 0,309 (0,330 pour le RAIE 1, 0,297 pour le RAIE 2).

Cette station se caractérise donc par une prédominance des sillons circulaires et une abondance de pelotes fécales, de petits tumuli et de terriers simples.

2 - *Plaine abyssale de Démérara : station B*

Deux traits (RAIE 3, RAIE 5) ont été retenus (fig. 3). Un ensemble de 530 photographies, soit une surface totale photographiée de 4256 m^2, a été exploitée.

a) densité des traces

Le diagramme des densités moyennes, pour cette station (fig. 14), montre que les traces à relief sont aussi bien représentées (52 %) que les traces superficielles (48 %). Les *petites rosettes* (S31) dominent l'ensemble des traces (505 /1000 m^2). Les terriers simples (R21) sont relativement abondants (141 /1000 m^2).

La densité totale des traces à cette station est de 1196 traces/1000 m^2.

b) diversité des traces

Le nombre de types de traces représentés est de 26, et le nombre total de traces de 5089. L'indice de Shannon obtenu pour la station B est de 0,290. Il est de 0,345 pour le RAIE 3 et de 0,309 pour le RAIE 5.

Cette station est caractérisée par une très grande quantité de traces, dominées par les petites rosettes (disposées en essaim). Tous les autres types de traces sont relativement bien représentés.

3 - *Plaine abyssale du Cap Vert : station CV1*

Deux traits ont été réalisés dans cette station (fig. 4) mais aucune photographie n'a pu être exploitée. Le nombre de bonnes photographies (le poisson étant toujours à une altitude élevée), est trop petit pour permettre des analyses quantitatives correctes. De façon générale, il semble que la faune soit pauvre, et que les traces soient peu abondantes et aplanies.

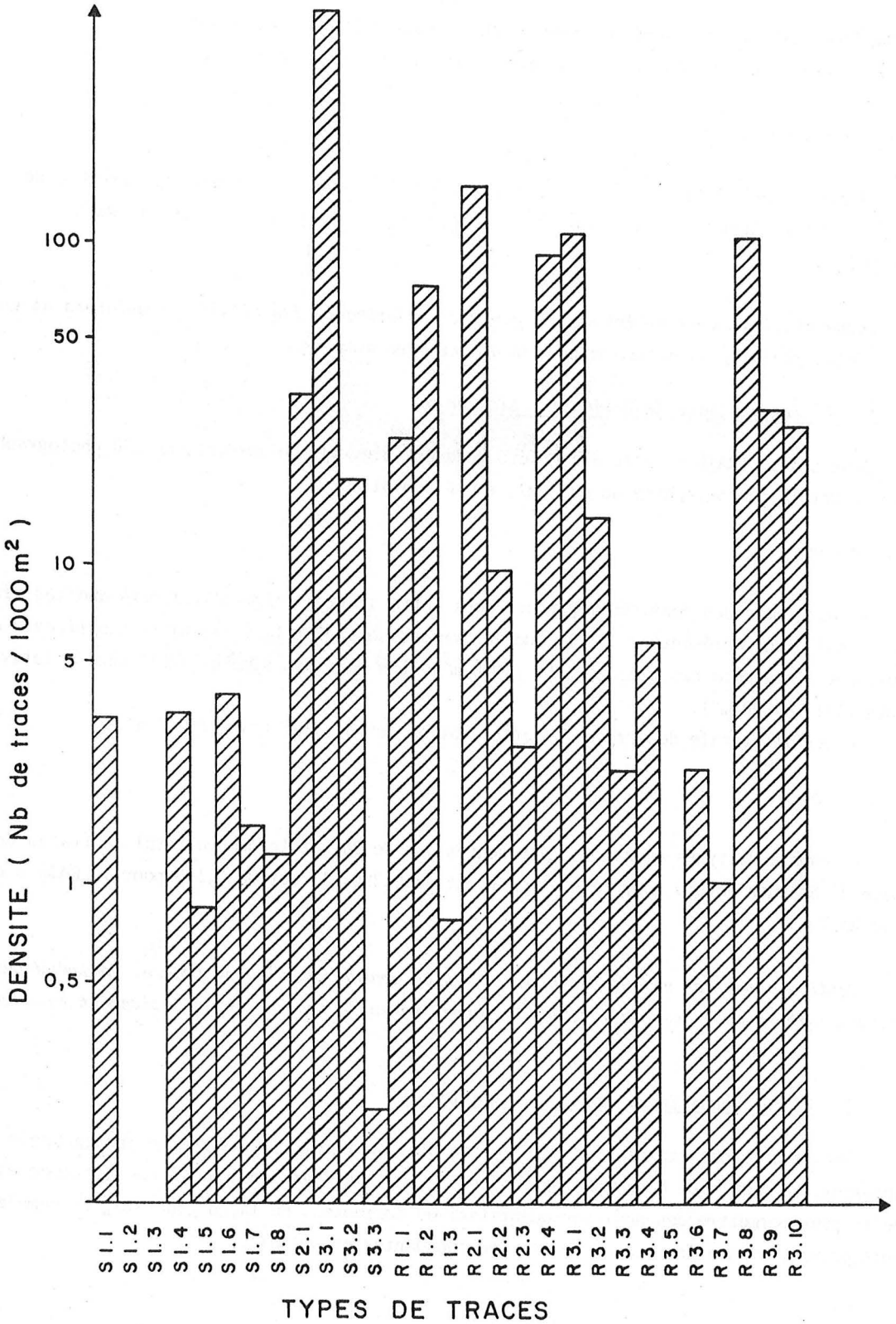


Fig.14- Diagramme des densités des traces observées à la station B.

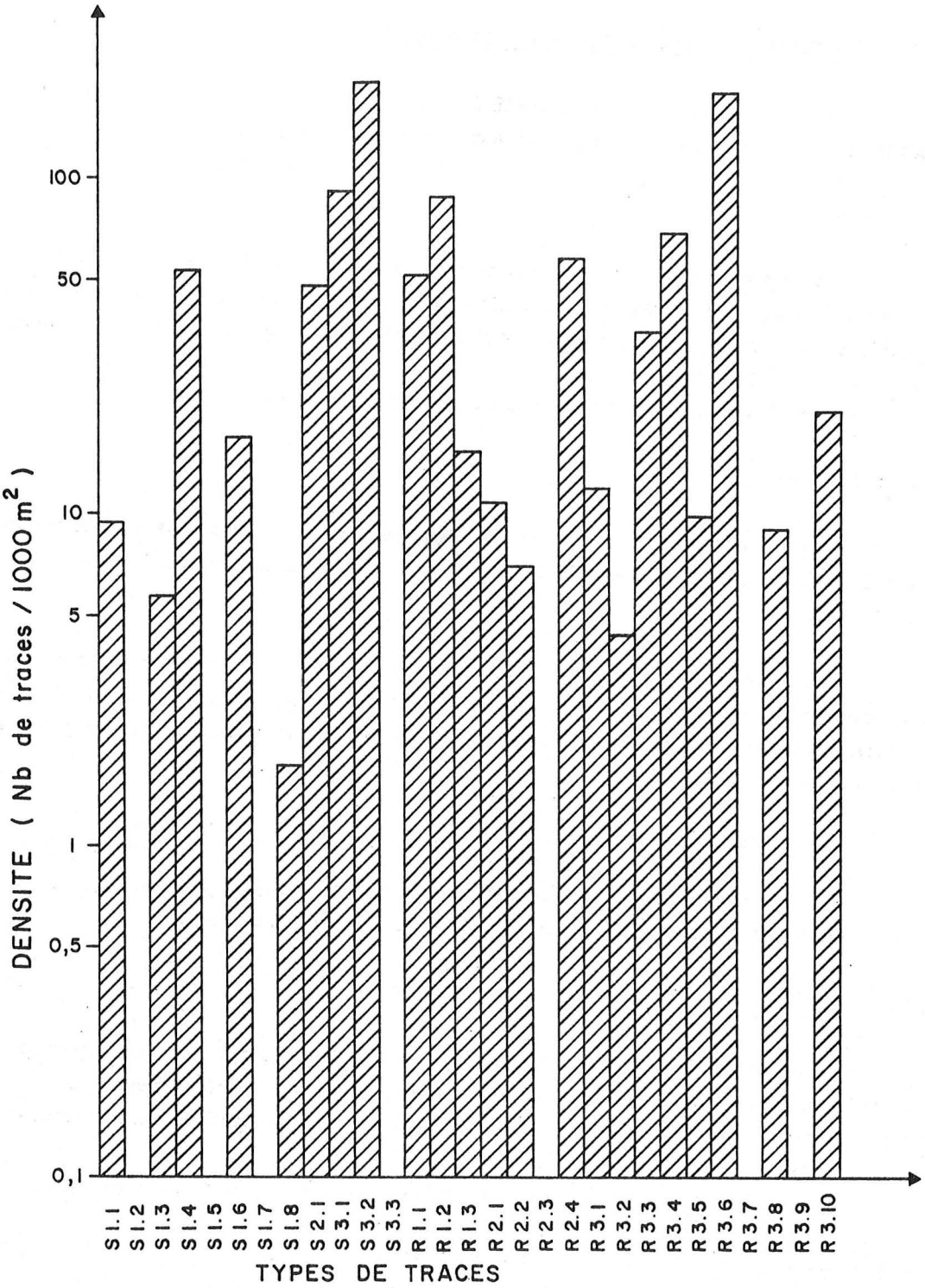


Fig. 15 - Diagramme des densités des traces observées à la station CV 2.

4 - *Plateau abyssal du Cap Vert : station CV2*

A cette station, deux traits (RAIE 9, RAIE 10) (fig. 5) ont été effectués, dont 576 photographies ont pu être exploitées, représentant une surface totale de 2217,6 m^2.

a) densité des traces

Le diagramme des densités moyennes (fig. 15) montre que les traces à relief sont légèrement plus abondantes que les traces superficielles (44 % de toutes les traces observées). Les grandes rosettes (S32) et les tumuli crevassés (R36) sont les traces les plus représentées (respectivement 194 /1000 m^2 et 161 /1000 m^2).

La densité totale des traces est de 943 traces/1000 m^2.

b) diversité des traces

22 types de traces ont été observés à cette station, répartis dans un ensemble de 2093 traces. L'indice de Shannon obtenu est égal à 0,371 pour cette station (de 0,372 pour le RAIE 9 et de 0,348 pour le RAIE 10).

La station CV2 se caractérise par deux catégories de traces : les grandes rosettes et les tumuli crevassés. Les premières sont souvent liées à un volcan, un tumulus crevassé ou un grand tumulus aplani. Les traces à relief apparaissent, en général érodées, et les pelotes fécales sont souvent difficilement reconnaissables.

5 - *Terrasse de Meriadzek : station 1*

Pour cette station, 3 traits ont été retenus : TR 02, TR 11 et TR 13 (fig. 6). 572 photographies, équivalant à une surface totale de 2180 m^2, ont été exploitées.

a) densité des traces

Le diagramme des densités moyennes (fig. 16) montre que les traces superficielles sont proportionnellement plus faibles (19 %) que les traces à relief. Les *petits tumuli* (R11) (233,0/1000 m^2) prédominent l'ensemble des traces. Les pelotes fécales, les grands tumuli et les terriers-volcans alignés sont également bien représentés.

La densité totale des traces pour cette station est 1361 traces/1000 m^2.

b) diversité des traces

Dans cette station, 15 types de traces sont représentés, répartis dans un nombre total de 2876 traces. L'indice de Shannon obtenu est de 0,321 (de 0,298 pour le trait TR 02, de 0,264 pour

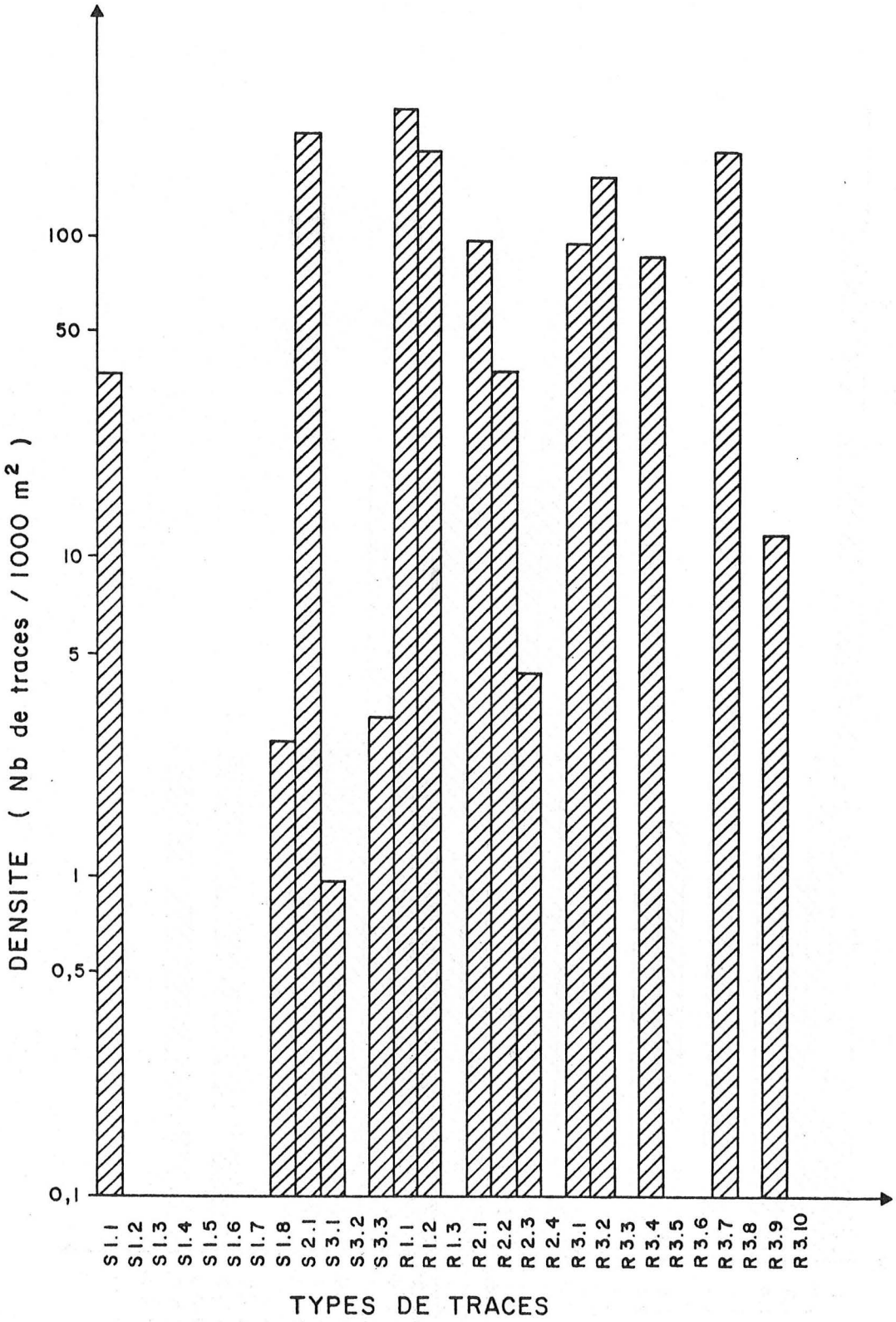


Fig. 16 - Diagramme des densités des traces observées à la station 1.

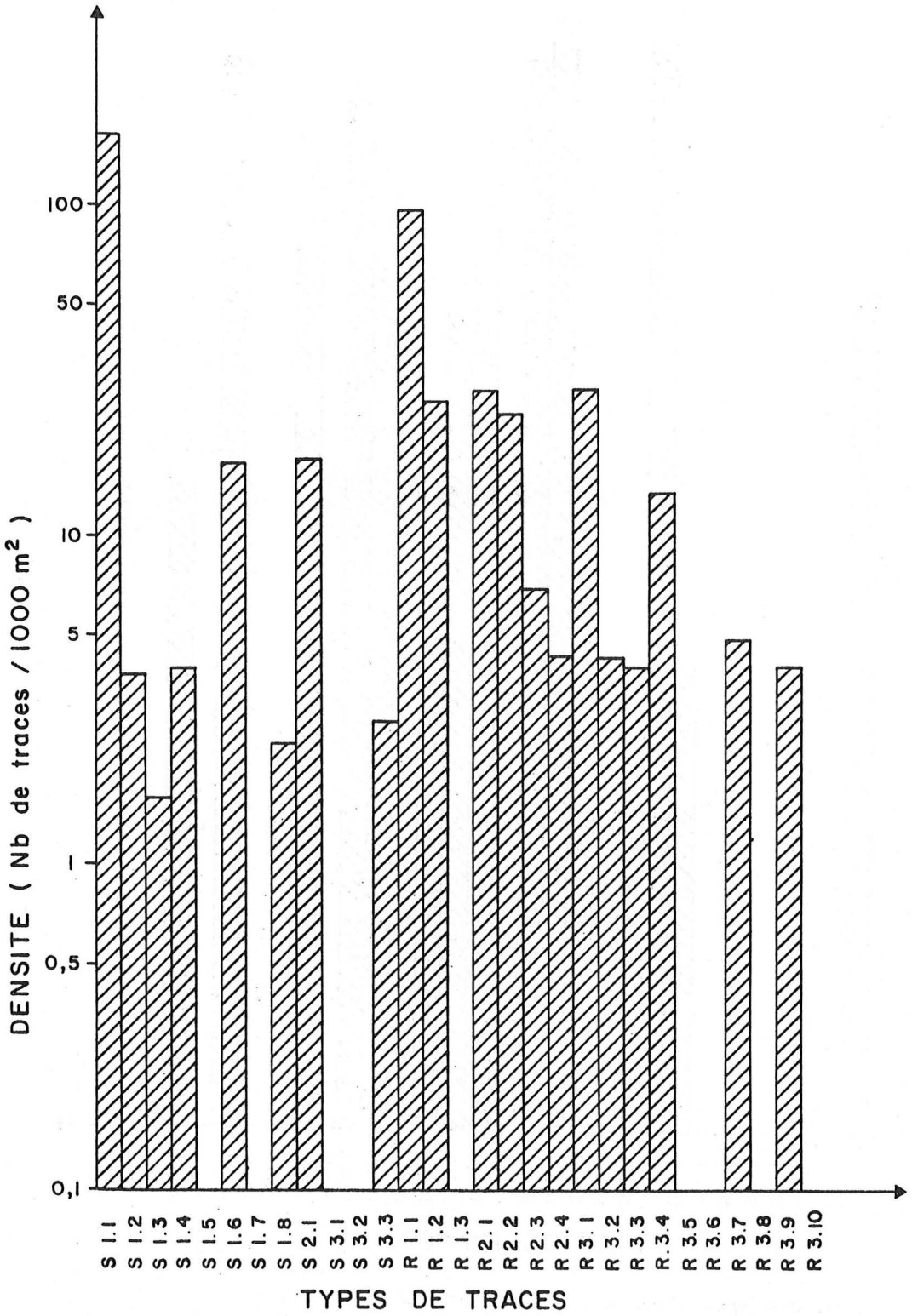


Fig.17 - Diagramme des densités des traces observées à la station 2.

le trait TR 11 et de 0,272 pour le trait TR 13).

La station 1 se caractérise par une dominance de petits tumuli (apparaissant regroupés en général) et une abondance des pelotes fécales, de grands tumuli et de terriers-volcans alignés.

6 - *Ride Aegis : station 2*

Trois traits (TR 03, TR 17 et TR 19) ont été analysés pour cette station (fig. 7). 326 photographies ont été retenues, représentant une surface totale photographiée de 1257,5 m^2.

a) densité des traces

Le diagramme des densités moyennes (fig. 17) montre que les traces superficielles sont aussi abondantes (52 %) que les traces à relief. Les sillons simples (S11) (174 /1000 m^2) dominent l'ensemble des traces de la station. Les petits tumuli (R11) sont également bien représentés : 96/1000 m^2.

La densité totale des traces est de 437 traces/1000 m^2.

b) diversité des traces

A cette station, le nombre total des traces observées est de 550, et le nombre de types de traces représentés est de 20. L'indice de Shannon, obtenu pour cette station, est égal à 0,300. Pour les traits TR 02, TR 17 et TR 19, il est respectivement de 0,326, 0,264 et 0,272.

Les traces organiques les plus caractéristiques de cette station sont les sillons simples et les petits tumuli. De plus, l'ensemble des photographies présentent régulièrement des rides de courants et dans certains cas des étendues de blocs et de cailloutis.

B - ANALYSES INTERSTATIONS

1 - *Qualité de l'échantillonnage*

Pour chaque station, la quantité de données est présentée sous forme de courbe de cumul des types de traces observés, selon les indications du paragraphe : I, A, 3, b de ce chapitre. La surface totale photographiée varie en fonction du nombre de prises de vue exploitées et de la technique utilisée. Quelle que soit cette technique, tous les types de traces peuvent être reconnus.

L'unité de surface photographiée correspond à une petite série de bonnes prises de vue, dont le nombre varie entre 19 et 29 dans le cas de photographies prises par le système RAIE 2, et de 20 à 60 pour celles prises par la troïka. Les surfaces unitaires correspondantes à ces séries sont comprises entre 100 et 300 m^2 environ, tailles de surface considérées comme appropriées pour constituer le "pas" de ce test compte tenu de l'échelle d'observation.

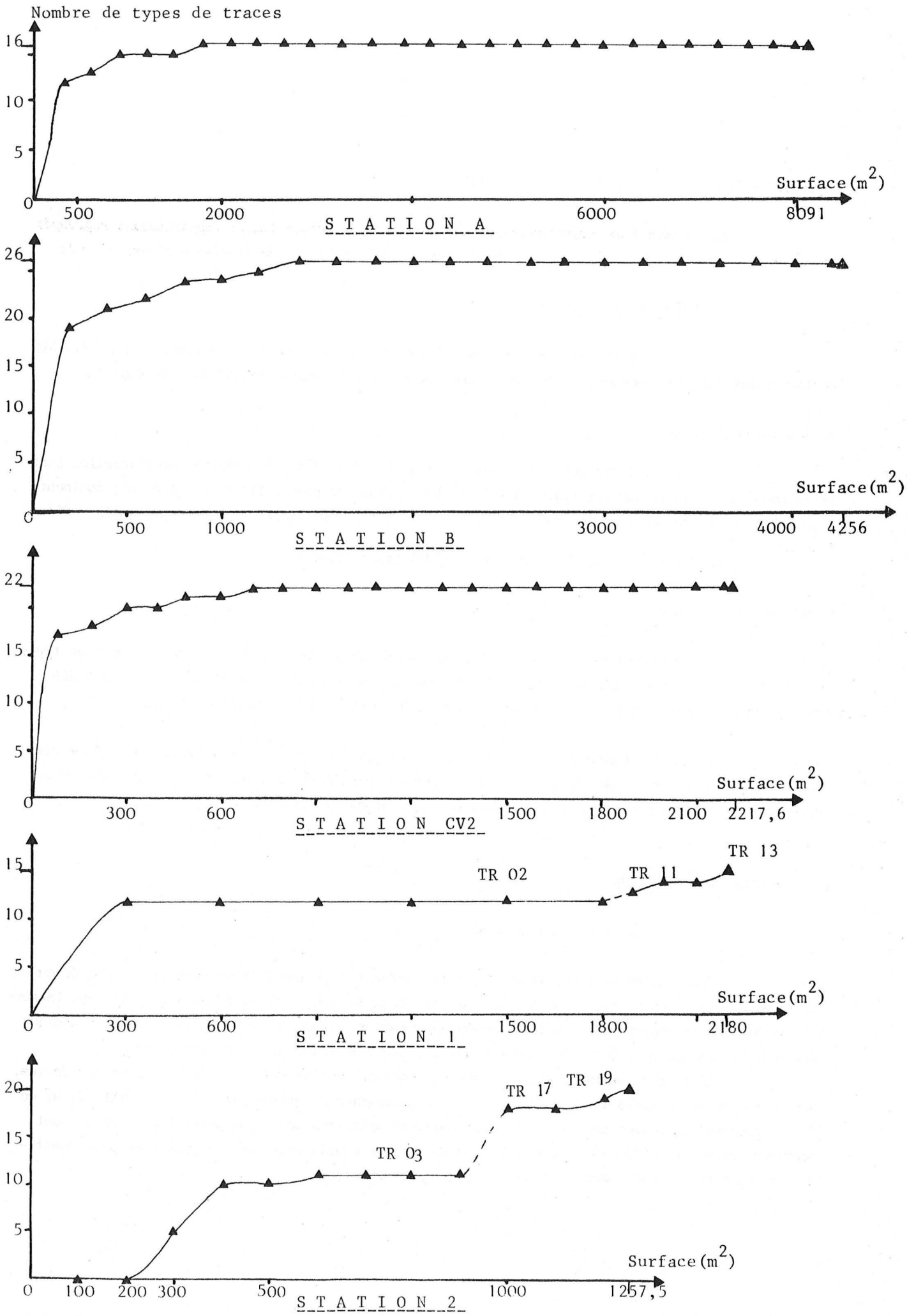


Fig. 18 - Diagramme de qualité de l'échantillonnage photographique pour chaque station.

L'échantillonnage est significatif si le nombre cumulé de types de traces reste constant, quelle que soit la surface totalisée photographiée. Les séries photographiques successives apartiennent à deux ou trois traits dans une même station. Ce test permet, de plus, de mettre en évidence l'existence d'hétérogénéité au sein d'une même station.

- Station A : la surface unitaire, à cette station, est environ de 300 m^2 (surface/photographie : ~ 15,50 m^2) correspondant à une série de 20 prises de vue.

surface photographiée (RAIE 1, RAIE 2) (m^2)	300	600	900	1200	1500	1800	2100	- - →	8091
nombre cumulé de types de traces	12	13	15	15	15	16	16	- - →	16

Il apparaît donc que l'échantillonnage à cette station est suffisant et correct puisqu'il n'y a plus de variation dès l'observation d'une surface de 1800 m^2.

- Station B : la surface unitaire choisie est égale à 200 m^2 environ (surface/photographie : 10,90 m^2 ou 7 m^2) correspondant à des séries de 19 prises de vue (jusqu'à 1526 m^2) et de 29 prises de vue ensuite.

surface photographiée (RAIE 3, RAIE 5) (m^2)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	- - →	4256
nombre cumulé de types de traces	19	21	22	24	24	25	26	26	- - →	26

Pour cette station, l'échantillonnage effectué est suffisant et correct, dès 1400 m^2.

- Station CV2 : la surface unitaire est de 100 m^2 environ (surface/photographie : 3,85 m^2) correspondant, dans ce cas, à des séries de 26 prises de vue.

surface photographiée (RAIE 9, RAIE 10) (m^2)	100	200	300	400	500	600	700	800	- - →	2217,6
nombre cumulé de types de traces	17	18	20	20	21	21	22	22	- - →	22

Comme pour les 2 stations précédentes, l'échantillonnage réalisé à cette station est satisfaisant puisque les données restent constantes à partir de 700 m^2.

- Station 1 : la surface unitaire choisie est égale à 300 m^2, ou 100 m^2 environ (surface/photographie = 5 m^2 ou 2,5 m^2) correspondant à des séries de 60 puis 40 prises de vue.

TR 02 ⟷ TR 11

surface photographiée (TR 02, TR 11, TR 13) (m^2)	300	600	- - →	1500	1800	1900	2000	2100	2180
nombre cumulé de types de traces	12	12	- - →	12	12	13	14	14	15

Les premiers 1800 m^2 représentent le trait TR 02. De 300 à 1800 m^2, le nombre cumulé de types de traces est constant et égal à 12. L'échantillonnage du trait TR 02 peut être considéré comme correct. De 1800 à 2180 m^2 (surface représentant les traits TR 11 et TR 13), les points se répartissent sur une courbe qui ne tend pas vers une asymptote. L'échantillonnage de ces deux traits est incomplet. L'augmentation du nombre de types de traces entre TR 02 et TR 11, TR 13 montre une différence dans la qualité des traces qui s'explique essentiellement par la situation respective de chacun des traits. En effet, le trait TR 02 se situe à 29 km à l'Est des traits TR 11 et TR 13. L'environnement n'est vraisemblablement pas homogène dans ce secteur de marge continentale. L'échantillonnage des traits TR 11 et TR 13 ne permet pas d'utiliser toutes les données dans le cadre de l'étude de la diversité (indice de Shannon et Weaver) et de similitude (indice de Kulczinski 2).

- Station 2 : la surface unitaire choisie est de 100 m environ (surface/photographie = 5 ou 2,5 m) correspondant à des séries de 20 puis 40 prises de vue.

TR 03 ⟷ TR 17

surface photographiée (TR 03, TR 17, TR 19) (m^2)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1257,5
nombre cumulé de types de traces	0	0	5	10	10	11	11	11	14	18	18	19	20

La courbe présente une succession de points alignés pour le trait TR 03 (0 à 800 m^2). L'échantillonnage peut être considéré comme correct pour ce trait. En revanche, les traits TR 17 et TR 19 (de 800 à 1257,5 m^2) révèlent de nouveaux types de traces, mais ne donnent pas une information suffisante pour analyser la répartition de chacun des types de traces. L'augmentation du nombre de types de traces entre le trait TR 03 et les traits TR 17 et TR 19 peut être expliquée par la grande hétérogénéité déjà observée à cette station, à partir de l'analyse de la diversité des échinodermes (Sibuet, 1977) et de la variation du régime sédimentaire (Auffret et Sichler, sous presse).

Remarque : dans les deux stations 1 et 2, prospectées à plusieurs années d'intervalle, les variations des catégories de traces, au cours du cumul des observations des différents traits, sont attribuées à l'hétérogénéité du milieu.

UNIVERSITE DE LYON
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

L'analyse ayant porté sur des séries photographiques obtenues à partir des techniques aboutissant à des surfaces photographiées distinctes, il était important de mettre en évidence les variations rencontrées. L'exemple des traces observées sur les films de même surface (TR 11, TR 13, TR 17 et TR 19) montre bien que les différences permettent de distinguer les stations 1 et 2.

2 - Similitude entre les stations

L'évaluation de la similitude recherchée par l'indice de Kulczinski 2 (indice peu sensible à la dissymétrie des tailles des échantillons) est réalisé en tenant compte de la présence-absence de tous les types de traces rencontrés, pour les cinq stations. Le tableau suivant indique la valeur du degré de similitude :

Station	B	CV2	A	1	2
B		0,92	0,90	0,73	0,71
CV2			0,89	0,77	0,75
A				0,87	0,80
1					0,96
2					

Fig. 19 - Tableau des degrés de similitude entre les stations (indice de Kulczinski 2).

La comparaison entre les stations, par l'indice de similitude, permet de mettre en évidence les convergences suivantes : *les stations 1 et 2, B et CV 2 sont les stations qui se ressemblent le plus*. Leur degré de similitude est élevé (0,96 et 0,92). Les stations 1 et 2 sont situées toutes les deux sur la Marge du Golfe de Gascogne. Les stations B et CV 2 se situent dans les plaines abyssales, à plus de 4000 m de profondeur.

Ayant démontré de grandes ressemblances entre ces stations à partir des types de traces rencontrés, un ensemble de paramètres, susceptibles d'expliquer ces convergences sera recherché au cours de ce travail, notamment en identifiant la faune, les régimes sédimentaire et hydrodynamique.

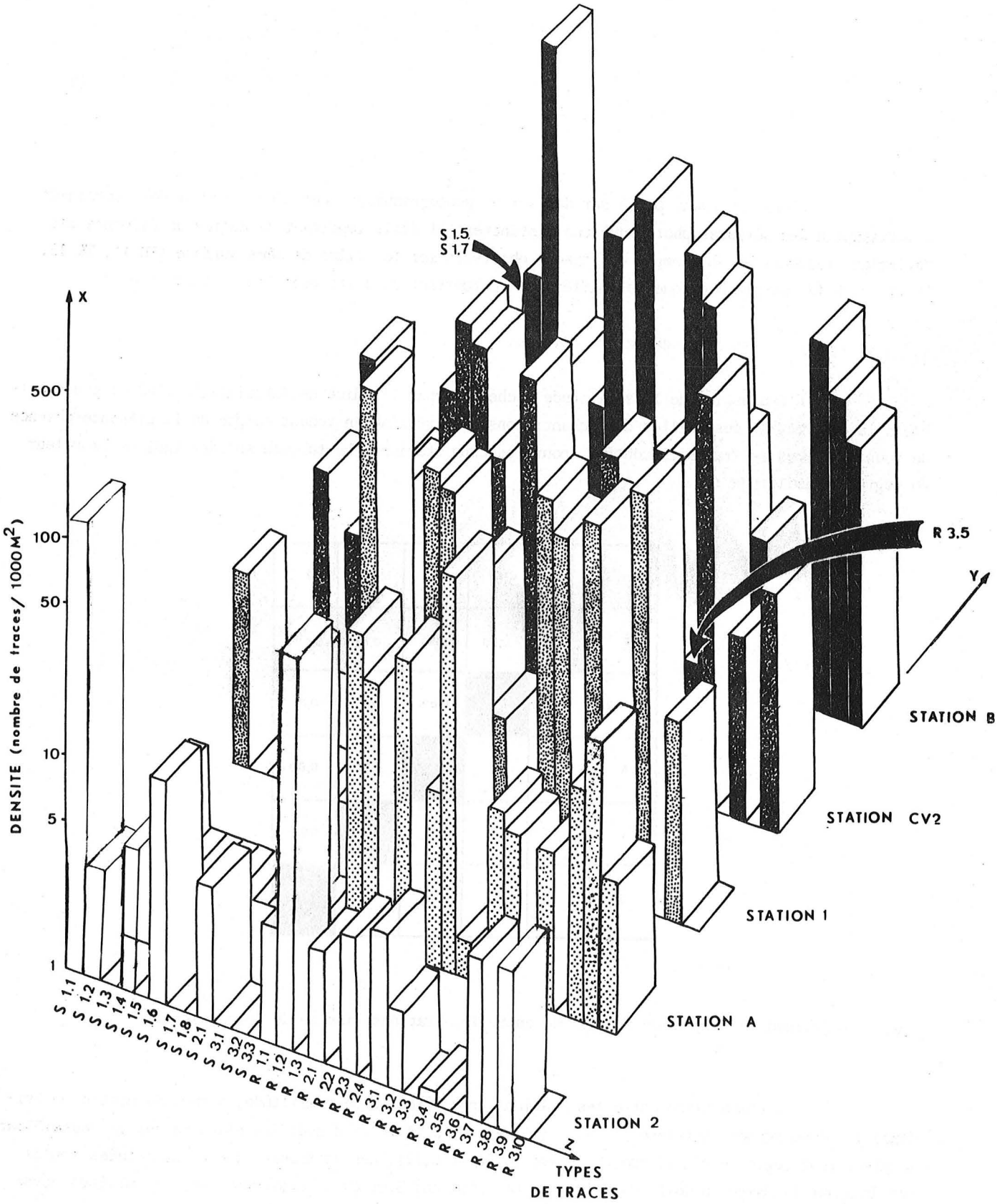


Fig. 20 - Diagramme tridimensionnel des densités moyennes de chaque type de traces dans chacune des stations étudiées (limite inférieure : 1 tr/1000 m^2 ; axe X : échelle logaritmique).

Les stations B et 1, B et 2, CV2 et 1, CV2 et 2 se distinguent car leur indice de similitude est plus faible (respectivement 0,73, 0,71, 0,77 et 0,75). Ces stations ont des situations géographiques et bathymétriques différentes. L'étude d'autres caractéristiques faunistiques et sédimentaires pourront également confirmer la divergence.

La station A, en comparaison avec les trois autres stations, présente un degré de similitude intermédiaire.

3 - Comparaison de la distribution des différents types de traces entre les stations

Cette comparaison fait intervenir des stations étagées entre 2000 et 5000 m de profondeur dans un même océan. Elles appartiennent toutes au domaine abyssal de l'Océan Atlantique Nord.

Dans ces différents secteurs, les conditions de conservation des traces peuvent être distinctes puisqu'elles sont liées à l'intensité des courants de fond, au taux de sédimentation et notamment à l'activité des organismes qui contribuent au mélange et à la disparition des traces dans le temps. Les résultats présentés dans le chapitre suivant, concernant le taux de bioturbation et le taux de sédimentation permettront de déterminer dans chaque site un indice de conservation et de valider la comparaison entre les secteurs explorés.

La représentation graphique (fig. 20) donne, par l'utilisation de trois axes (x = types de traces, y = stations, z = densités moyennes des types de traces) une information globale de la distribution de toutes les catégories de traces.

a) comparaison des densités des traces observées dans l'ensemble des stations

Ce diagramme tridimensionnel permet d'étudier la distribution quantitative de toutes les catégories de traces dans toutes les stations.

Les stations 1, B et CV2 se distinguent par des densités totales de traces élevées (de l'ordre de 1000 traces/1000 m^2). La station B est remarquable par le grand nombre de types de traces représentés (26).

Les traces à relief dominent dans les stations A et 1 et représentent 83 % et 82 % de l'ensemble des traces observées à ces stations. Les petits et grands tumuli, les terriers simples, sont les traces abondantes et communes aux deux stations.

Les traces superficielles constituent 44 %, 48 % et 52 % de la totalité des traces des stations CV2, B et 2. Dans ces deux premières stations, les traces dominantes sont les rosettes (grandes rosettes à la station CV2, petites rosettes à la station B). L'abondance des traces superficielles à la station 2 (52 %) est essentiellement due à la prédominance des sillons simples, qui représentent 40 % de toutes les traces observées. Ces sillons simples sont particulièrement abondants au Sud de la station. Cette distinction souligne le caractère hétérogène de cette station. La présence de rides de courants montrent l'importance du régime hydrodynamique qui contribue sans doute à l'effacement des traces. D'ailleurs les sillons simples apparaissent essentiellement dans le "creux" des rides de courants (zone protégée).

b) observations sur la distribution particulière de certains types de traces

A l'aide du diagramme et des histogrammes de densités moyennes de traces, les distributions particulières de certains types de traces sont mis en évidence et permettent de caractériser chaque station et de souligner les points communs entre certaines stations.

Quelques types de traces particuliers apparaissent dans une station uniquement. Il s'agit, *à la station B*, des *rides en épi (S15)* et des *pistes d'holothuries (S17)*, et *à la station CV2*, des *cratères doubles (S35)*.

En revanche, d'autres types de traces peuvent être qualifiés d'*ubiquistes*, car ils sont présents dans toutes les stations :

- le sillon simple (S11)
- la pelote fécale (S21)
- le petit tumulus (R11)
- le grand tumulus (R12)
- le terrier simple (R21)
- le terrier à dépôt (R22)
- la petite souille (R31)
- le volcan (R34)

Les stations A, B et CV2, toutes situées à plus de 4000 m de profondeur, ont en commun *trois types de traces*, absents dans les stations 1 et 2. Ces cinq types sont les suivants :

- le tumulus crevassé (R36)
- le tumulus entouré de petits terriers (R38)
- le tumulus et un terrier (R310)

Il n'y a aucun type de trace caractéristique commun aux stations 1 et 2, situées entre 2000 et 3000 m de profondeur, en particulier.

Après avoir réalisé les analyses des données photographiques, deux groupes de stations se distinguent : les stations A et 1 où les traces à relief prédominent l'ensemble des traces et les stations B et CV2 où les traces à relief sont aussi abondantes que les traces superficielles. La station 2 se distingue par une abondance remarquable d'un seul type de traces : le sillon simple.

Les convergences ou divergences, qui ont pu être mises en évidence par l'analyse de la distribution qualitative et quantitative des traces, trouvent vraisemblablement leur explication dans la répartition de la faune, et sont liées aux facteurs de l'environnement. Les relations éventuelles entre la faune récoltée ou observée à chacune des stations et l'ensemble des traces représentées dans chaque station sont recherchées dans la prochaine analyse.

4 - Comparaison de la répartition faunistique et de la distribution des traces dans l'ensemble des stations

L'ensemble des densités faunistiques considérées dans cette comparaison figurent en annexe 1.

Le degré d'importance de la densité des traces à relief a permis de distinguer deux ensembles de stations.

- *le premier ensemble* regroupe les stations A et 1. Il est caractérisé par la dominance des traces à relief ; ceci suggère un certain remaniement des sédiments en profondeur dû aux activités fouisseuses des organismes.

A la station A, les echinides et les asterides récoltées sont des formes fouisseuses principalement, et sont abondantes. Les holothurides, qui dominent la faune récoltée et qui sont fréquentes sur les prises de vue, appartiennent à l'espèce *Benthodytes typica*, espèce rampante. Cette abondance est à relier avec la richesse en pelotes fécales, trace superficielle la plus dense à cette station. Sur les photographies, les sipunculiens sont les plus nombreux et sont, en général, au centre de sillons circulaires, trace dominante.

A la station 1, les holothurides et les ophiurides prédominent l'ensemble de la faune. L'abondance des holothurides explique l'importance du nombre de pelotes fécales observées, également ici la trace superficielle la mieux représentée. Certaines espèces d'holothurides reconnues à cette station sont des formes fouisseuses. D'autres groupes zoologiques comprennent des espèces principalement fouisseuses : les polychètes, les mollusques et les crustacés. La grande richesse d'organismes fouisseurs, à cette station, peut expliquer la dominance des traces à relief (81 %). Mais les organismes responsables des grands et petits tumuli (traces les plus fréquentes) ne sont pas encore identifiés.

- *le deuxième ensemble* regroupe les stations B et CV2, caractérisées par une certaine abondance des traces superficielles. Ces traces superficielles sont dues aux organismes rampants, principalement. A la station B, la faune récoltée ou observée est peu abondante mais relativement variée. Les organismes rampants et fouisseurs sont les plus fréquents et certains groupes zoologiques, tels que les polychètes et les bivalves sont même plus abondants qu'en station A. L'abondance de ces catégories d'organismes, explique, en partie, l'importance égale des traces à relief et des traces superficielles, notée à la station B. Les traces intitulées "piste d'holothurie" sont typiques de cette station, où il a été même possible d'observer un des rares cas montrant une holothurie (famille Deimatidae) suivie de sa trace. La piste d'holothurie, observée sur une photographie du RAIE 3, est marquée par une ponctuation relative due sans doute à la morphologie de la sole ventrale munie de très gros podia. Les petites rosettes, traces dominantes de la station B, semblent pouvoir être occasionnées par des protozoaires (xénophyophores, du genre *Cerelasma*, d'après Tendal (1980), par des échiuriens (Hollister *et al.*, 1975).

A la station CV2, la faune observée est plus diversifiée mais moins abondante qu'à la station B. Les sipunculiens sont les organismes prédominants, puis viennent les macroures et les holothurides. Certains macroures, du genre *Polychèles*, sont observés à plusieurs reprises à cette station. Cet animal creuse le sédiment et forme une souille allongée. Les holothurides récoltées ou observées à cette station appartiennent à l'espèce *Psychoprotes longicauda*. Plusieurs individus de cette espèce ont déjà été rencontrés à la fin d'une trace double-sillons, trace reconnue à cette station.

La faune récoltée par chalutage est moins abondante et moins diversifiée qu'à la station B. Mais les organismes récoltés sont des formes fouisseuses ou rampantes, permettant d'expliquer l'égalité entre les traces à relief (56 %) et les traces superficielles.

A la station 2, caractérisée par un hydrodynamisme important, la faune récoltée est riche en organismes filtreurs et fixés. La faune mobile est essentiellement fouisseuse (polychètes, mollusques) expliquant l'origine de l'abondance des traces à relief (plus de 40 % de la totalité des traces). Les sillons simples représentent 40 % des traces, les différents organismes responsables de ce type de traces ne sont pas encore reconnus.

La distinction des stations, établie à partir de l'analyse de la répartition des traces, et de l'importance des traces en relief plus particulièrement, est confirmée par les données relatives à la faune. En effet, dans les stations prospectées, où les traces à relief dominent, la faune récoltée ou observée est principalement fouisseuse. En revanche, là où les traces à relief et les traces superficielles sont d'égale importance, la faune est rampante autant que fouisseuse.

III - DISCUSSIONS

Les photographies sous-marines permettent l'étude des différentes traces organiques, occasionnées par les organismes de grande taille. L'analyse de la distribution des traces à la surface des sédiments est effectuée dans les limites des échelles d'observation allant du cm au km. Plusieurs études sur les traces organiques observées dans les grands fonds, ont été menées mais se sont surtout attachées aux aspects descriptifs et qualitatifs des figures sédimentaires (Dangeard, 1967 ; Ewing et Davis, 1967 ; Hollister *et al.*, 1975). Certains auteurs (Bourne *et al.*, 1965 ; Lemche *et al.*, 1976 ; Ekdale, 1980) ont plus particulièrement cherché à identifier les organismes responsables de traces. Au cours de ces travaux, aucune classification ne nous a semblé satisfaisante. Une nouvelle classification est établie à partir du grand nombre d'observations réalisées. Elle tient compte, en outre, de l'importance du remaniement des sédiments. Le petit nombre d'analyses quantitatives de traces organiques observées en grande profondeur (principalement Kitchell *et al.*, 1978 a et b, 1979), est sans doute lié aux limites de la technique photographique (mauvaise qualité de l'image, insuffisance du nombre de photographies exploitables ou insuffisance de données complémentaires). Les analyses de densités, de fréquences et de diversité des traces par Kitchell *et al.* (1978 b) sont faites à partir d'un ensemble de 505 photographies prises en Arctique et en Antarctique, et représente une surface totale de 2650 m^2. Notre étude bénéficie d'un nombre 4 fois plus grand de prises de vue, et d'une surface totale photographiée dans 5 secteurs de l'Océan Atlantique Nord 6 fois supérieure (18190 m^2). Les données obtenues à partir de ce grand nombre de photographies peuvent être considé-

rées comme significatives et sont présentées dans le tableau suivant et discutées ci-dessous.

Secteur géographique	Terrasse Mériadzek	Ride Aegis	Cône Amazone	Pl. abys. Démérara	Plat. ab. Cap Vert
Station	1	2	A	B	CV2
Profondeur (m)	2100	2800	4400	4800	4900
Traits photographiques	TR 02 TR 11 TR 13	TR 03 TR 17 TR 19	RAIE 1 RAIE 2	RAIE 3 RAIE 5	RAIE 9 RAIE 10
Nombre de photo. exploitées	572	364	522	530	576
Surface totale photo.	2180	1258	8091	4256	2218
% tr. superficielles	19	52	17	48	44
% tr. à relief	81	48	83	52	56
Densité totale des traces (tr./1000m^2)	1361	437	318	1196	944
Nombre de types de traces observés	12 +	11 +	18	26	22
Indice de diversité	0,298 +	0,323 +	0,309	0,290	0,371
Densité de la méga-faune.récoltée .observée (ind./1000m^2)	107 66	92 39	24 23	11 51	8 36
Nombre de groupes faunist. récoltés . observés	21 6	24 8	15 6	16 5	7 6

Fig. 21 - Tableau récapitulatif des données photographiques de chaque station. + : données obtenues à partir des observations des traits TR 02 et TR 03.

- Les densités totales des traces varient inversement aux densités faunistiques. Cette relation a déjà été observée dans les Océans Arctique et Antarctique aux mêmes profondeurs (Kitchell *et al.*, 1978 b). Ces auteurs considèrent que les organismes peu nombreux, se trouvant dans les grands fonds où les apports nutritifs sont faibles, peuvent subvenir à leurs besoins nutritionnels en fouillant davantage les sédiments, ce qui engendre un remaniement conséquent. Cette explication semble assez satisfaisante, mais ne tient pas compte, par exemple, de la dépense énergétique de l'organisme, liée à son déplacement, et il est encore difficile, à l'heure actuelle, de comprendre le comportement des organismes abyssaux vivant dans des conditions trophiques très faibles. Il est évident, par ailleurs, que l'abondance des traces observées dans les grands fonds, soit due à des conditions plus favorables de conservation dans le temps (régime hydrodynamique, taux de sédimentation et taux de mélange faibles). L'influence de ces différents paramètres sera considérée en conclusion de ce travail.

- L'indice de diversité des traces est indépendant de plusieurs paramètres évalués (densité totale des traces, abondance des traces à relief, densité de la faune et profondeur). Cet indice de diversité ne présente pas de variations très importantes. Il est surprenant de noter si peu d'influence de la profondeur sur ce dernier paramètre, d'autant plus qu'en écologie abyssale, de nombreuses études ont démontré la variation de la diversité spécifique en fonction de la profondeur. La diversité spécifique augmente dans les grands fonds pour certains groupes zoologiques de petite taille (bivalves, polychètes...) (Sanders, 1968) mais diminue, au contraire, pour certains organismes de grande taille tels que les Gastéropodes (Rex, 1973) et les échinodermes (Sibuet, 1977). Aucune relation n'apparaît donc entre la diversité des traces et la diversité spécifique, en fonction de la profondeur.

L'augmentation notable du nombre de types de traces en fonction de la profondeur, due vraisemblablement à différentes espèces animales, ne peut pas être expliquée par les résultats du tri zoologique, réalisé, ici, uniquement au niveau des classes d'organismes. Ces données sont insuffisantes et imprécises. La richesse en catégories de traces est à relier, éventuellement, à l'idée d'une certaine spéciation zoologique apparaissant au-delà de 4000 m de profondeur, démontré, par exemple, pour le cas des échinodermes (Sibuet, 1977).

A la surface des sédiments, l'intensité du remaniement se traduit par l'abondance relative des traces à relief et des traces superficielles. En considérant la quantité des différentes catégories de traces, 2 ensembles de stations se distinguent. L'un comprend des stations sous influences continentales. Ces stations sont essentiellement caractérisées par la dominance des traces à relief et par une faune relativement riche, principalement fouisseuse, remaniant le sédiment en profondeur. Le deuxième ensemble est déterminé par des stations où les traces sont dues à l'activité des organismes aussi bien fouisseurs que rampants. Cette activité entraîne un remaniement sédimentaire, moins important et moins profond.

Deux stations présentent des caractéristiques particulières de par leur situation. La station 2, située au débouché d'un canyon montre une densité de traces relativement faible, compte tenu de la profondeur et de la densité faunistique. Ceci s'explique par l'existence de courants de fond qui balaient la surface des sédiments, érodent et font disparaître rapidement les traces organi-

ques éventuelles (Giresse *et al.*, 1969). D'ailleurs, les traces organiques sont observées dans les zones protégées des courants : la partie creuse des courants. La station A, située à 4400 m de profondeur, au pied du Cône de déjection de l'Amazone est sous l'influence continentale. Cette influence continentale permet d'expliquer l'abondance de la faune à cette profondeur qui occasionne un remaniement sédimentaire important et profond, observé sur les photographies. L'importance de ce remaniement (à cette station à plus de 4400 m de profondeur) pourrait expliquer la faible densité totale des traces. En effet, l'activité intense des organismes fouisseurs entraîne la destruction rapide des traces organiques existant auparavant, comme le montrent Ekdale et Berger (1978).

Cette étude a donc confirmé que les différentes figures de bioturbation observées à la surface des sédiments dépendent des paramètres de l'environnement. L'importance du remaniement est évidemment lié à l'abondance de la faune, mais les ressources nutritives, qui conditionnent la vie et l'activité des organismes sont variables quelle que soit la profondeur. Il est important de noter qu'à grande profondeur, ces traces sont abondantes, et que les catégories de traces sont très diversifiées. L'influence de la profondeur n'est pas aisée à expliquer, si ce n'est par un comportement différent de la faune et par la diversification d'une faune typique des grands fonds. Le régime hydrodynamique, le taux de sédimentation et l'importance de l'activité fouisseuse influencent la conservation des traces organiques. En effet, dans un milieu calme (comme certaines plaines abyssales) les traces organiques observées représentent l'activité animale de plusieurs centaines d'années.

Les analyses ont montré que, dans le Golfe de Gascogne, et au pied du Cône de l'Amazone, les organismes remanient le sédiment en profondeur. En revanche, dans les plaines abyssales le remaniement semble être plus superficiel. Cette étude a permis d'estimer l'importance de la bioturbation, sur de grandes surfaces, occasionnée par la faune de grande taille. Une étude complémentaire, réalisée à partir des sédiments prélevés, permet de quantifier avec précision l'intensité et la profondeur du remaniement sédimentaire (existant depuis les 100 dernières années) à l'échelle centimétrique. Le remaniement, considéré dans ce cas, tient compte de l'activité des organismes de petite taille (macrofaune ou meïofaune).

chapitre 3

Sediments

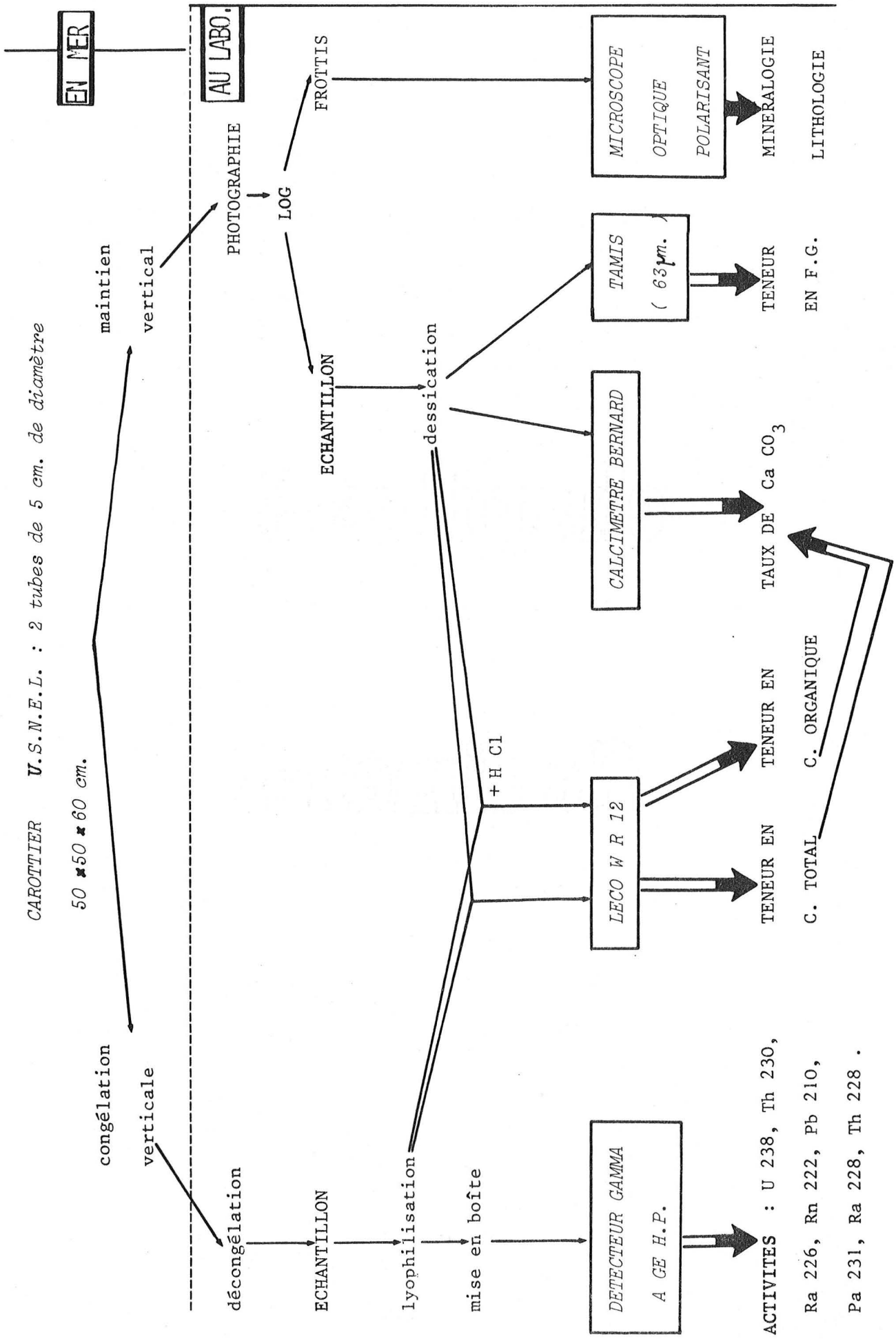


Fig.23 - Schéma d'organisation des analyses de sédimentologie et de spectrométrie gamma.

I - TECHNIQUES ET METHODES

A - ACQUISITIONS DES DONNEES EN MER

Le prélèvement des sédiments

Les sédiments ont été prélevés à l'aide d'un carottier "grande surface" (0,25 m^2) d'ouverture, de type "U.S.N.E.L. box corer", décrit par Hessler et Jumars (1974) (fig. 22).

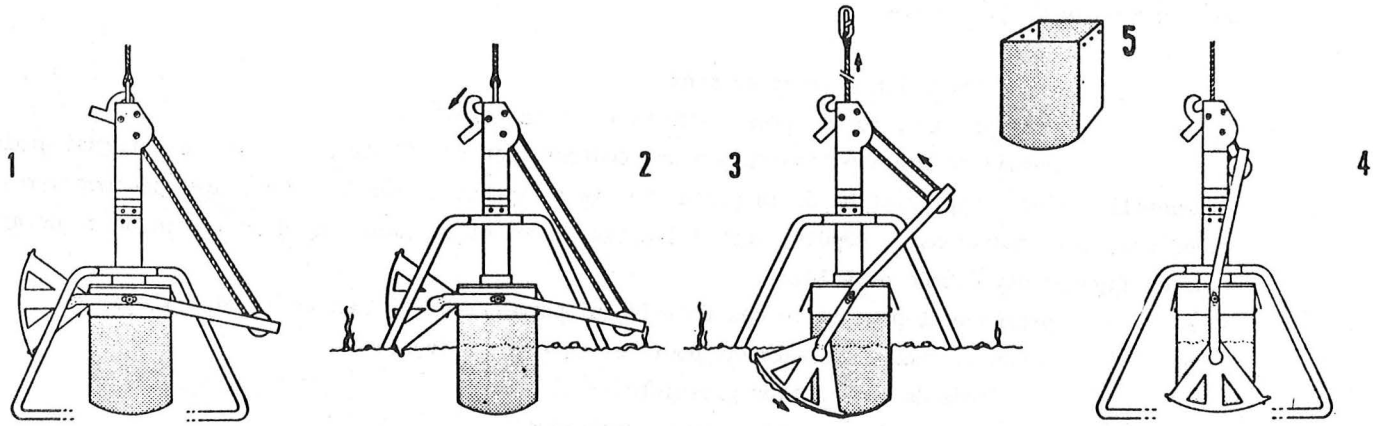


Fig. 22 - Carottier U.S.N.E.L. 1 : avant le déclenchement. 2 : pénétration dans les sédiments. 3 : fermeture de la porte, début de remontée à la surface. 4 : arrivée sur le pont. 5 : boîtier (0,5 x 0,5 x 0,6 m).

Une amélioration a été apportée au système de déclenchement, transformé suivant le principe du carottier "Reineck". Les dimensions de la boîte "U.S.N.E.L." sont les suivantes : longueur 0,50 m, largeur 0,50 m, hauteur 0,60 m. Cette boîte est de taille assez grande et permet de prélever les sédiments superficiels, avec des perturbations minimes. Ainsi, on peut observer sur la surface du sédiment récolté, des figures sédimentaires et les organismes vivant sur le fond. Ce type de ca-

rottier est utilisé par les biologistes intéressés par les premiers centimètres de sédiments où vit la faune. Un tri des organismes et plusieurs analyses sont réalisées pour estimer la biomasse, les densités faunistiques, densités calculées par rapport à la surface du carottier. Dans chaque station est réalisé un grand nombre de carottages, dont un est réservé à l'étude des paramètres de l'environnement. Dans ce cas, la boîte du carottier est légèrement différente. Un des côtés s'ouvre pour permettre l'observation des sédiments sur un plan vertical.

Dans cette boîte, deux tubes plastiques de 5 cm de diamètre sont enfoncés. Un tube est maintenu vertical jusqu'à l'arrivée au laboratoire (fig. 23). Il est destiné aux analyses sédimentologiques. L'autre tube est immédiatement congelé verticalement à bord et est acheminé congelé au laboratoire. Ce deuxième tube est prévu pour les analyses de spectrométrie gamma.

B - ANALYSES AU LABORATOIRE

1 - *Techniques d'étude lithologique*

Les carottes destinées aux études sédimentologiques sont découpées longitudinalement en deux parties. Une partie reste en archives, l'autre est utilisée pour plusieurs analyses.

a) description de la carotte

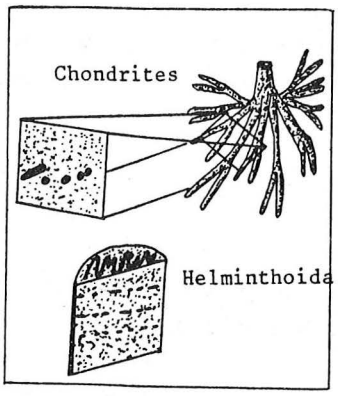
Cette description s'effectue ainsi :

- photographie, juste après l'ouverture de la carotte ;
- dessin du log avec indication des couleurs, en se référant à la Charte Internationale de Munsell (1954) ; appréciation de la granulométrie ; représentation des structures sédimentaires liées soit aux conditions de dépôts, soit à l'activité des organismes. Une description de ce dernier type de figures est donnée plus loin ;
- prélèvement pour faire des frottis qui permettront l'étude de la minéralogie ;
- échantillonnage du sédiment pour les analyses suivantes :
  . étude de la fraction grossière,
  . calcimétrie et analyse du C. organique.

- *description des structures sédimentaires*

Les figures sédimentaires liées à l'activité organique ont été décrites par de nombreux auteurs, en particulier Chamberlain (1973, 1975) et Ekdale (1977, 1978). Ces auteurs se sont appuyés sur les observations faites à partir des carottes du D.S.D.P. (Deep Sea Drilling Project) pour établir une liste des figures communément rencontrées (fig. 24).

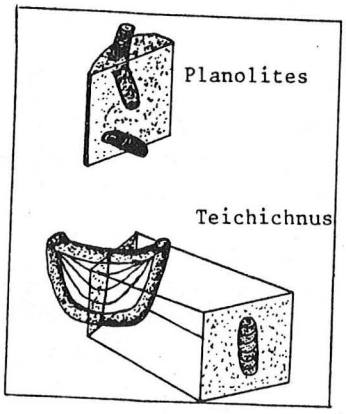
UNIVERSITÉ DE LYON
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE



. Chondrites : systèmes de fins canaux réguliers, de diamètres uniformes. Il apparaît, en section verticale, en un ensemble de terriers ronds, ovales ou allongés. L'auteur de ce terrier n'est pas déterminé.

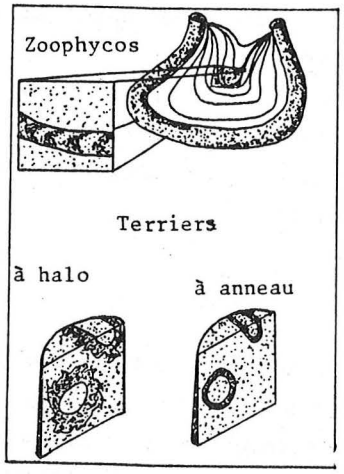
. Helminthoïda : traces horizontales à méandres parallèles et réguliers, peu espacés. L'organisme responsable n'est pas encore reconnu.

Ces deux premiers types de terriers sont appelés terriers composés, en opposition aux terriers suivants :



. Planolites : simple tube dont les méandres traversent les couches sédimentaires. En section verticale, on observe un terrier rond, ovale ou allongé. Il semble être réalisé par un coprophage.

. Teichichnus : un terrier en U avec des traverses ("spreite"), vertical à subvertical. Il apparaît en section verticale un ensemble de fines lamines incurvées, la face concave orientée vers le haut de la surface. L'organisme auteur est inconnu.



. Zoophycos : un canal en U ou en vrille avec de nombreuses traverses. En section verticale, il apparaît en une série de croissants imbriqués les uns dans les autres. L'orientation des croissants donne le sens de progression de l'organisme qui laisse derrière lui ses déjections. On suppose que les polychètes ou des vers sont les auteurs de ce type de terrier.

. Terriers à halo ou à anneaux : terrier simple à l'intérieur d'un halo ou d'une enveloppe de matériel de couleur différente. Les variations de couleurs pourraient être en relation avec des phénomènes physico-chimiques. La présence de larges terriers pyritisés pourrait également être liée à ces phénomènes.

Fig. 24 - Terriers reconnus dans les carottes prélevées en domaine profond.

Les terriers les plus abondants dans les sédiments profonds sont les Chondrites, Planolites, Zoophycos et Teichichnus.

- *conservation des figures sédimentaires*

La conservation des terriers a été étudiée par Berger *et al.* (1979), dans des sédiments profonds (3500-4850 m) du Pacifique, riches en carbonates. Ils ont établi un modèle stratigraphique de la bioturbation dans les sédiments, qui tient compte de la conservation des figures organiques (fig. 25).

couche mélangée	. mou au toucher . couleur uniforme . intensément fouillé par de petits organismes . nombreux petits terriers verticaux . nombreux canaux vides
5-8 cm	
couche mélangée de transition enregistrement partiel	. semblable mais plus compact . figures rondes de couleur claire apparaissant dans la matrice de la couche mélangée . canaux vides moins abondants
10-13 cm	
couche de transition enregistrement maximal	. compact . plus d'organismes vivants, mais intensément fouillés . contraste de couleur maximal . nombreux terriers larges de générations différentes
20-35 cm	
couche historique enregistrement décoloré	. tassé . contraste de couleur moins intense . terriers associés à des halos, évoluant en marbrure ("mottling") dus aux phénomènes physico-chimiques.

Fig. 25 - Modèle stratigraphique de conservation des terriers, de Berger *et al.* (1979).

Les figures sédimentaires commencent à apparaître sous la couche mélangée, deviennent distinctes dans la couche de transition et tendent à s'effacer dans la couche historique, ceci suivant l'évolution des contrastes de couleurs entre la matrice et le terrier.

Berger *et al.* précisent d'autres facteurs importants pour la conservation : la cohésion des sédiments, l'épaisseur de la couche mélangée et la profondeur de pénétration des terriers.

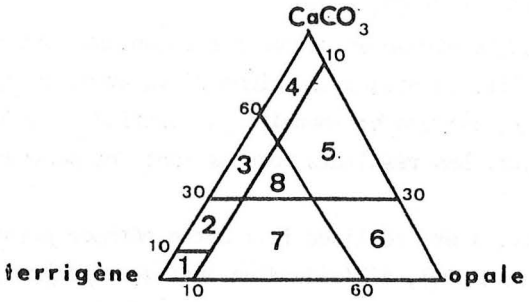
Dans la mesure du possible, nous signalons sur le log la couleur des sédiments contenus dans le terrier, puis sur le log lithologique, la nature de ces sédiments.

b) examen de la minéralogie

Cette étude consiste à reconnaître, puis à évaluer en terme de pourcentages, les constituants minéraux du sédiment. Pour effectuer un frottis, on prélève quelques mm^3 de sédiment, au même endroit que l'échantillon utilisé pour les analyses de $CaCO_3$, de C organique et de fraction grossière. Dans certains cas, le sédiment est prélevé dans un terrier. Ce sédiment est posé sur une lame,

délayé dans l'eau, séché, imprégné de baume de Canada, puis recouvert par une lamelle.

Ce frottis est examiné ensuite au microscope optique polarisant. Suivant leur pourcentage en $CaCO_3$, en minéraux terrigènes et en opale, les sédiments sont classés en fonction du tableau lithologique suivant (fig. 26) :



1 : vase. Vase sableuse, vase argilo-sableuse, vase argileuse, vase argilo-silteuse, vase silteuse.

2 : vase carbonatée.

3 : boue marneuse. 10 à 25 % de foraminifères : boue marneuse à nannofossiles et à foraminifères. 25 à 50 % de foraminifères : boue marneuse à foraminifères et à nannofossiles. + de 50 % de foraminifères : boue marneuse à foraminifères.

4 : boue calcaire.

5 : boue silico-calcaire.

6 : boue siliceuse. Boue à diatomées, boue à radiolaires.

7 : vase siliceuse.

8 : boue marno-siliceuse.

Fig. 26 - Classification des sédiments meubles utilisée pour l'Océan Atlantique (d'après Auffret et Pastouret, 1978 ; Auffret, thèse en cours).

c) analyse de la fraction grossière

L'échantillon est séché à l'étuve pendant 24 h. Il est subdivisé en plusieurs parties. Une partie sert à mesurer la teneur en $CaCO_3$ et en C organique, l'autre partie est pesée puis remise en solution dans l'eau. La maille du tamis est de 63 µm. La fraction grossière et la fraction fine sont mises à l'étuve, puis pesées :

$$\frac{\text{poids sec de la fraction grossière (F.G.)}}{\text{poids sec du sédiment}} \times 100 = \%\ \text{F.G.}$$

Un examen rapide de la fraction grossière est fait pour évaluer le pourcentage d'éléments terrigènes, et pour reconnaître les microfossiles et estimer, éventuellement, l'importance de la fragmentation des tests des organismes.

d) calcimétrie et analyse du C organique

Pour mesurer la teneur en $CaCO_3$ dans les sédiments, on utilise une technique simple : le calcimètre Bernard. Les échantillons sont, au préalable, séchés, broyés et pesés à 250 mg, puis attaqués au HCl (3 N), ce qui entraîne un dégagement de CO_2 :

$$CaCO_3 + 2\ HCl \rightarrow CaCl_2 + \overrightarrow{CO_2} + H_2O$$

Ce dégagement de CO_2 déplace le niveau du volume d'eau contenu dans un tube, le long d'une réglette graduée. Il suffit donc de lire le niveau du volume d'eau avant et après l'attaque à l'acide. Le volume de gaz dégagé, ainsi évalué, est proportionnel à la quantité de $CaCO_3$ contenue dans les sédiments. On étalonne avec du $CaCO_3$ pur. Les résultats obtenus sont des pourcentages, avec une précision de 0,5 %.

Une autre méthode, indirecte, a été réalisée ici. Cette méthode permet de connaître la teneur en C organique et en C total (puis en $CaCO_3$), à l'aide d'un analyseur automatique Leco W.R.12. Cet analyseur mesure la teneur en C, en dosant la quantité de CO_2 dégagée lors de la combustion de l'échantillon en milieu oxygéné. L'échantillon est soit séché et broyé, soit lyophilisé et réduit en poudre. Une partie est pesée (250 mg), mise dans un creuset à l'étuve (24 h) puis analysée. On obtient la teneur en C total du sédiment. L'autre partie est pesée (250 mg), mise dans un creuset, attaquée à l'HCl (2N), puis déposée à l'étuve (24 h), enfin analysée. Par cette attaque à l'acide, le C minéral (ou $CaCO_3$) disparaît totalement et on mesure le C organique contenu dans le sédiment. Par différence, des résultats entre ces deux types d'analyses on obtient la teneur en C minéral (ou $CaCO_3$). Avant toute analyse, on étalonne l'appareil à l'aide d'anneaux métalliques, contenant un certain taux de carbone. Les résultats obtenus en pourcentage ont une précision de 0,05 %.

L'ensemble des observations et des analyses ainsi réalisées pour chaque station, permet de définir des niveaux distincts par leur lithologie (même minéralogie, même microfaune, même ordre de grandeur des taux de $CaCO_3$, de C organique et de fraction grossière). La représentation schématique de toutes ces données est faite selon le modèle (fig. 27).

Le taux de sédimentation et le taux de mélange, correspondant au remaniement des sédiments par les organismes, sont évalués par d'autres méthodes d'étude.

2 - Technique d'étude par spectrométrie gamma

a) buts de l'étude par spectrométrie gamma

Les analyses des sédiments par la spectrométrie gamma ont été réalisées afin d'estimer le taux de mélange de ces sédiments et leur taux de sédimentation.

- *Le taux de sédimentation (S)* est l'épaisseur de sédiments déposés en un temps donné (exprimé en cm/1000 ans pour des sédiments profonds).

Il existe de nombreuses techniques de détermination, certaines plus appropriées pour les sédiments récents ou quaternaires. Cette période géologique est marquée par de grandes fluctuations cli-

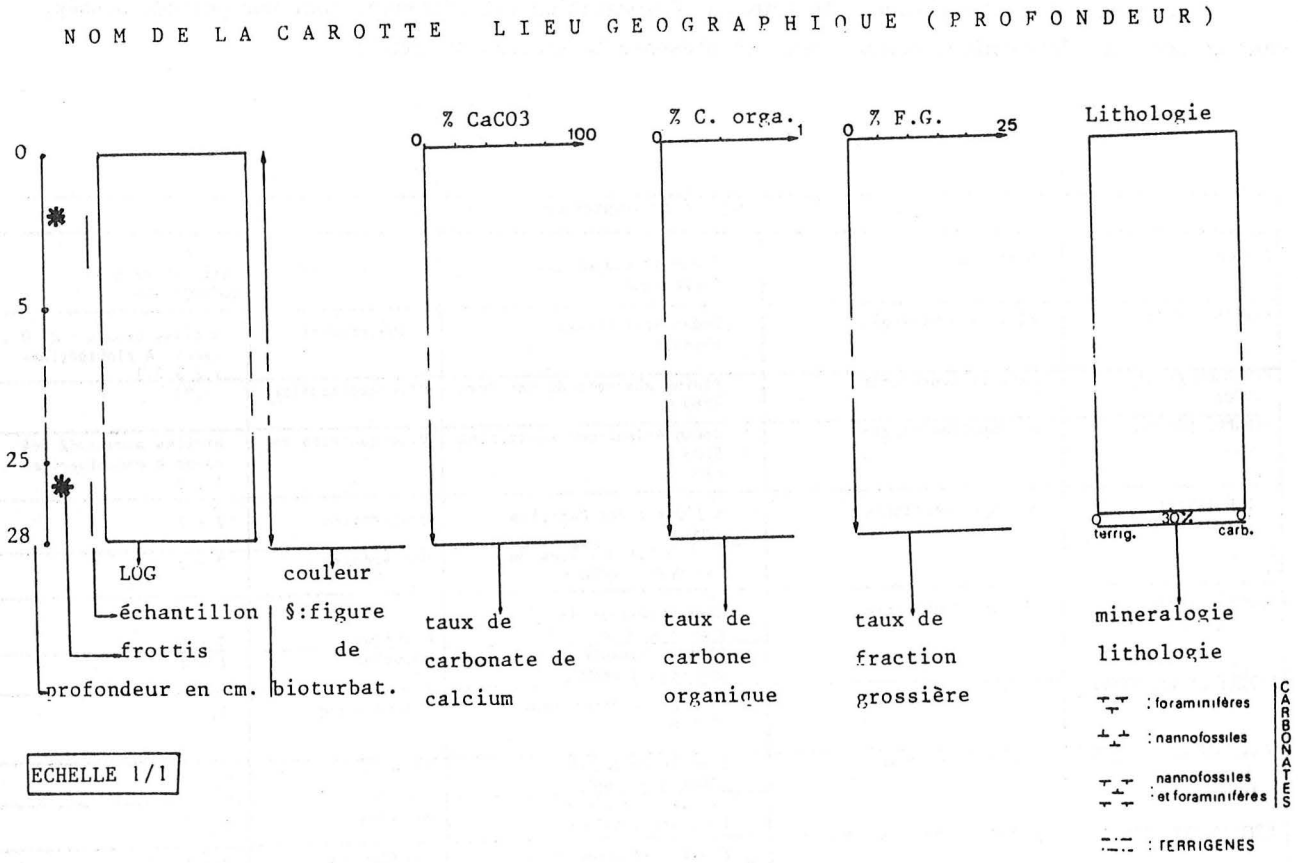


Fig. 27 - Représentation schématique des données sédimentologiques pour chaque carotte étudiée.

matiques, qui entraînent des variations importantes dans le niveau marin et donc, dans la sédimentation. En étudiant les variations du pourcentage de $CaCO_3$ ou du rapport 0-18/0-16, ou l'évolution de certains microfossiles, le taux de sédimentation peut être évalué pour le Quaternaire.

D'autres méthodes s'appuient sur le phénomène de désintégration des éléments radioactifs et sur leur période : analyse du C.14, analyses du rapport Th-230 en excès/Th-232 ou de la décroissance du Th-230 en excès, mesurés par la spectrométrie alpha (Goldberg et Koïde, 1962) ou par la spectrométrie gamma (Yokoyama *et al.*, 1968 ; Yokoyama et Nguyen, 1979).

A partir de ces techniques le taux de sédimentation est déterminé pour une période donnée, dans un secteur géographique connu, comme le présente le tableau suivant :

TAUX DE SEDIMENTATION				
Auteurs	Méthodes	Zones géographiques. Profondeur	Epoques	Sédimentation en cm/1000 ans
KUENEN (1964)	micropaléontologie	Océan Atlantique abyssal	quaternaire	argiles brunes < 0,9 vases à globigérines 1,2 à 2,1
PETERSON et al (1970)	micropaléontologie	Plaine abyssale du Cap Vert 4560 m	Plio-quaternaire	0,93
BERGER, VON RAD (1972)	micropaléontologie	Océan Atlantique Equatorial 5700 m 4100 m	Plio-quaternaire	argiles brunes:0,2 à0,4 boues à nannofossiles : 1 à 3
ROTHE (1973)	micropaléontologie	A l'Ouest des Canaries 4200 m	Quaternaire	2 - 3
		Au Sud Est des îles du Cap Vert : 4000 m	Quaternaire	2 - 3
DAMUTH (1977)	micropaléontologie	Cône inférieur de l'Amazone : 4400 m	Holocène	2 - 4
		Plaine abyssale de Demerara : 4850 m	Holocène	1 - 2
NOZAKI et al.(1977)	C 14	Ride Médio Atlantique 2500 m	Holocène Sup.	2,9
MOYES et al. (1977)	micropaléontologie	Cône inférieur de l'Amazone : 4400 m	Holocène	3
		Plaine abyssale de Demerara : 4800 m	Holocène	1 - 2
REYSS et al. (1978)	Th 230 ex./Th 232	Bassin Est Equatorial 3000 à 3900 m	200 000 ans	2,4 à 5,2
JONES et al (1979)	$CaCO_3$	Océan Atlantique Equatorial abyssal	75 000 ans	2,3

- *Le taux de mélange*. Les sédiments superficiels sont mélangés par les organismes vivant sur le fond ou à l'intérieur des sédiments. Ce mélange peut être quantifié à l'aide d'un modèle mathématique qui sera développé dans un prochain chapitre. Le mélange est assimilable à un mouvement des particules sédimentaires qui contiennent un grand nombre de radionuclides. Certains, de période longue ($\approx 10^4$ ans) comme le Pa-231, le Th-230, permettent de connaître le taux de sédimentation. Ils représentent l'enregistrement du temps écoulé entre le dépôt et la mesure. D'autres, de période plus courte (quelques années), comme le Pb-210, le Th-228, devraient disparaître sous les tous premiers millimètres de sédiments, compte tenu des taux de sédimentation (cf le tableau précédent). Or, ces derniers radionuclides sont souvent mesurés jusqu'à 7 ou 8 cm de profondeur. Les particules sédimentaires sont donc entraînées par les organismes. A l'aide du Pb-210 et du Th-228, on peut donc caractériser l'importance du mélange des particules dans une couche superficielle de quelques centimètres d'épaisseur et exprimer le taux de mélange actuel.

Ces radionuclides peuvent être dosés par la spectrométrie alpha. Cette technique est longue et demande de longues préparations chimiques, incluant la possibilité de nombreuses erreurs. Une autre technique, la spectrométrie gamma était peu développée jusqu'à présent. Les détecteurs de rayonnements gamma ne permettaient la mesure que d'un petit nombre de radionuclides. Récemment, au Centre des Faibles Radioactivités de Gif/Yvette, un détecteur semi-conducteur à Germanium de haute pureté (Ge(H.P.)) a été utilisé pour déterminer quantitativement les déséquilibres des familles de l'Uranium et du Thorium. Il offre la possibilité de mesurer plusieurs radionuclides simultanément, rapidement, avec une précision qui est uniquement d'origine statistique (Yokoyama, Nguyen, 1980). De plus, la préparation des échantillons est simple, facile et demande peu de temps. Cette méthode a, en outre, l'avantage d'être non destructrice, ce qui permet de rentabiliser les échantillons pour d'autres analyses.

Avant de présenter le principe de cette méthode, quelques notions de physique nucléaire concernant le rayonnement et la spectrométrie gamma sont rappelées. Puis, une liste descriptive des radionuclides choisis pour cette étude est fournie.

b) rayonnements et spectrométrie gamma (rappels)

L'émission du rayonnement gamma est un mécanisme de désexcitation nucléaire. Quand le noyau d'un nuclide instable est excité, il est porté à un niveau d'énergie élevé. Pour atteindre un niveau plus faible ou normal, et devenir stable, il y a émission d'un ou plusieurs photons, successivement, d'énergie $h\nu$ (h : constante de Planck ; ν : fréquence du rayonnement électromagnétique), évaluée en électro-volt (eV). Ces émissions sont spontanées, elles s'effectuent soit instantanément, soit pendant un temps mesurable. Le passage au niveau d'énergie plus faible peut être direct ou par étapes. Dans le premier cas, on observe un spectre d'énergie comportant une seule raie, dans le second cas, le spectre comprend plusieurs raies. Chaque énergie gamma ou chaque raie est caractéristique du radionuclide qui subit la transition nucléaire ou désintégration. A la lecture du spectre, il est donc possible de répertorier le ou les radionuclides présents ou d'évaluer leurs activités. Les radionuclides présents dans les sédiments ne sont pas tous intéressants pour cette étude : 8 radionuclides ont été choisis en considérant leur période, les exigences et le but des mesures.

c) description des radionuclides choisis

Pour déterminer le taux de sédimentation et celui de mélange dans les sédiments profonds, supposés quaternaires, le choix s'est porté sur 8 radionuclides appartenant à 3 séries distinctes (fig. 28).

- *La première série* est celle de l'U-238 : 4 éléments ont été mesurés :

- U-238 : sa période est de $4.49.10^9$ ans. L'intensité du rayonnement gamma émise par ce nuclide est très faible. On mesure son descendant direct, le Th-234, de période plus courte : 24 jours, en supposant l'équilibre établi entre ces deux radionuclides. Sur le spectre, la raie Th-234 se situe à 63 keV d'énergie (fig. 29-30).

	SERIE U 238							SERIE Th 232					SERIE U 235				
Np																	
U	U-238 4,49x10⁹a		U-234 2,49x10⁵a										U-235 7,13x10⁸a				
Pa		Pa-234 1,18m												Pa-231 3,25x10⁴a			
Th	Th-234 24,1j		Th-230 7,5x10⁴a					Th-232 1,39x10¹⁰a		Th-228 1,90a			Th-231 25,6h		Th-227 18,6j		
Ac									Ac-228 6,13h					Ac-227 22,0a			
Ra			Ra-226 1622a					Ra-228 6,7a		Ra-224 3,64j					Ra-223 11,1j		
Fr																	
Rn			Rn-222 3,825j							Rn-220 54,5s					Rn-219 3,92s		
At																	
Po			Po-218 3,05m		Po-214 1,6x10⁻⁴s		Po-210 138,4j			Po-216 0,158s	65%	Po-212 3,0x10⁻⁷s			Po-215 1,83x10⁻¹s		
Bi				Bi-214 19,7m		Bi-210 50j					Bi-212 60,5m					Bi-211 2,16m	
Pb			Pb-214 26,8m		Pb-210 21,4a		Pb-206 Plomb stable (isotope)			Pb-212 10,6h	35%	Pb-208 Plomb stable (isotope)			Pb-211 36,1m		Pb-207 Plomb stable (isotope)
Tl											Tl-208 3,1m					Tl-207 4,79m	

Fig. 28 - Tableau des séries de l'U-238, du Th-232 et de l'U-235.

- le Th-230 : ou l'Ionium, descendant de l'U-238, précipite au fond de l'océan comme le Thorium contrairement à l'Uranium, restant soluble dans l'océan pour être complexé par les ions carbonates. Par conséquent, les sédiments superficiels récents contiennent une activité du Th-230 en excès. Cet excès décroît en fonction du temps, selon la période (7.52×10^4 ans) du Th-230. En mesurant cette décroissance, le taux de sédimentation peut être déduit.

Pour évaluer l'activité du Th-230 en excès, il faut donc soustraire de l'activité totale du Th-230, une activité de Th-230 en équilibre avec l'U-238 existant dans le sédiment :

Th-230 excès = Th-230 total - U-238

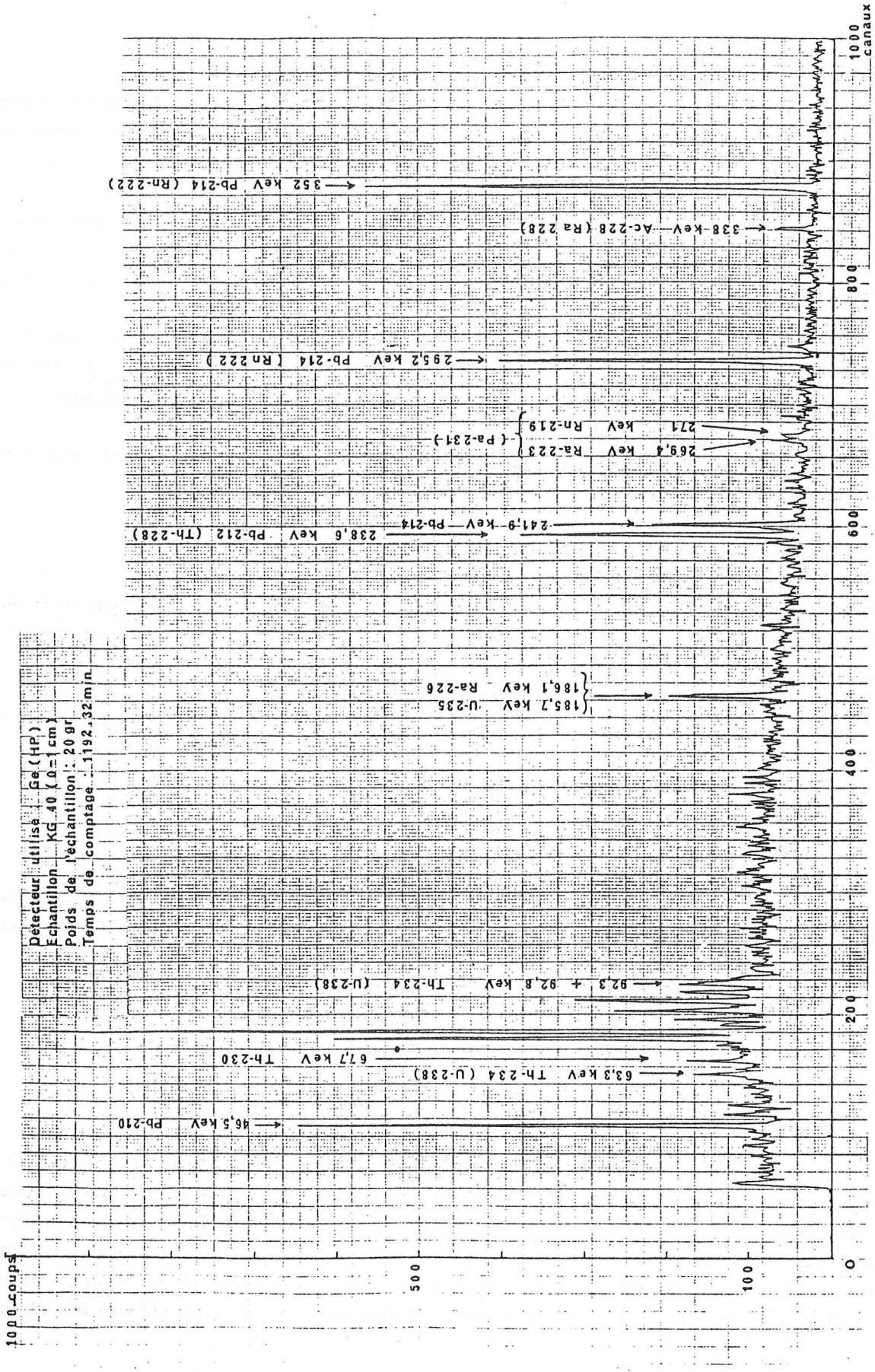


Fig. 29 Spectre gamma de 40à 400 keV d'un échantillon (0-1cm) d'une carotte de sédiments abyssaux (KG 40).

- Le Pb-210, le Ra-226 et le Rn-222 : le Pb-210 a une période de 21,4 ans. Il est mesuré directement et son énergie est de 46 keV. Il est le descendant du Rn-222 qui provient de la désintégration du Ra-226, ayant une période de 1622 ans. Ce radionuclide est mesuré directement et son énergie est de 186 keV.

Le Pb-210 mesuré (c'est-à-dire le Pb-210 total) est issu de deux origines : atmosphérique et sédimentaire. D'une part, le Pb-210 provient du Rn-222 qui se désintègre dans l'atmosphère. Ce Pb-210 pénètre dans l'océan et précipite au fond, car il est insoluble dans l'eau de mer. D'autre part, les sédiments contiennent déjà du Pb-210. Ce Pb-210 est en équilibre avec le Ra-226 des sédiments. Seul, le Pb-210 d'origine atmosphérique intéresse cette étude, et est considéré comme Pb-210 en excès. Pour évaluer son activité, il faut soustraire de l'activité du Pb-210 total (Pb-210 mesuré) une activité égale à celle de Pb-210 en équilibre avec le Ra-226, existant dans le sédiment :

Pb-210 excès = Pb-210 total - Ra-226

La période du Pb-210 est de 22 ans environ, le mélange observé peut être daté entre 0 et 100 ans, environ.

- *La deuxième série* est celle du Th-232, dans laquelle on mesure 2 éléments :

- le Th-228 et Ra-228. Le Th-228 a une période de 1,9 ans, soit 10 fois plus courte que celle du Pb-210. Comme le Pb-210, il permet l'estimation du taux de mélange des sédiments. Il est mesuré par son ascendant, le Pb-212. Son énergie est de 238 keV. Il provient du Ra-228, de période égale à 5,7 ans, mesuré par l'Ac-228 d'énergie 338 keV. Ainsi, pour calculer l'activité du Th-228 en excès, il faut soustraire de l'activité totale de Th-228, une activité de Th-228 en équilibre avec le Ra-228 existant dans le sédiment :

Th-228 excès = Th-228 total - Ra-228

- *La dernière série* est la série de l'U-235 : un seul élément a été mesuré :

- Le Pa-231 : le Pa-231 (protactinium), descendant de l'U-235, précipite au fond de l'océan, comme le Th-230. Le Pa-231 en excès décroît en fonction du temps selon une période de $3,25 \times 10^4$ ans, permettant ainsi l'estimation du taux de sédimentation.

Pour évaluer l'excès de Pa-231, le calcul à effectuer est le suivant :

Pa-231 excès = Pa-231 total - U-235

d) méthode de mesures des radionuclides

- Technique

La mesure des radionuclides est faite par une toute nouvelle technique de détection de rayonnements gamma : le détecteur à Ge (H.P.) (Germanium à haute pureté), mis au point par Y. Yokoyama et H.V. Nguyen, au Centre des Faibles Radioactivités à Gif/Yvette. Cette technique suffisamment précise est adéquate pour étudier la répartition des radionuclides choisis. En effet, des études préliminaires (Yokoyama et Nguyen, 1980), ont montré que le détecteur Ge(H.P.) fabriqué par une nouvelle technique de l'implantation ionique, ayant une couche morte extrêmement mince (0,3 µm), possède des efficacités

UNIVERSITE DE LYON
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE

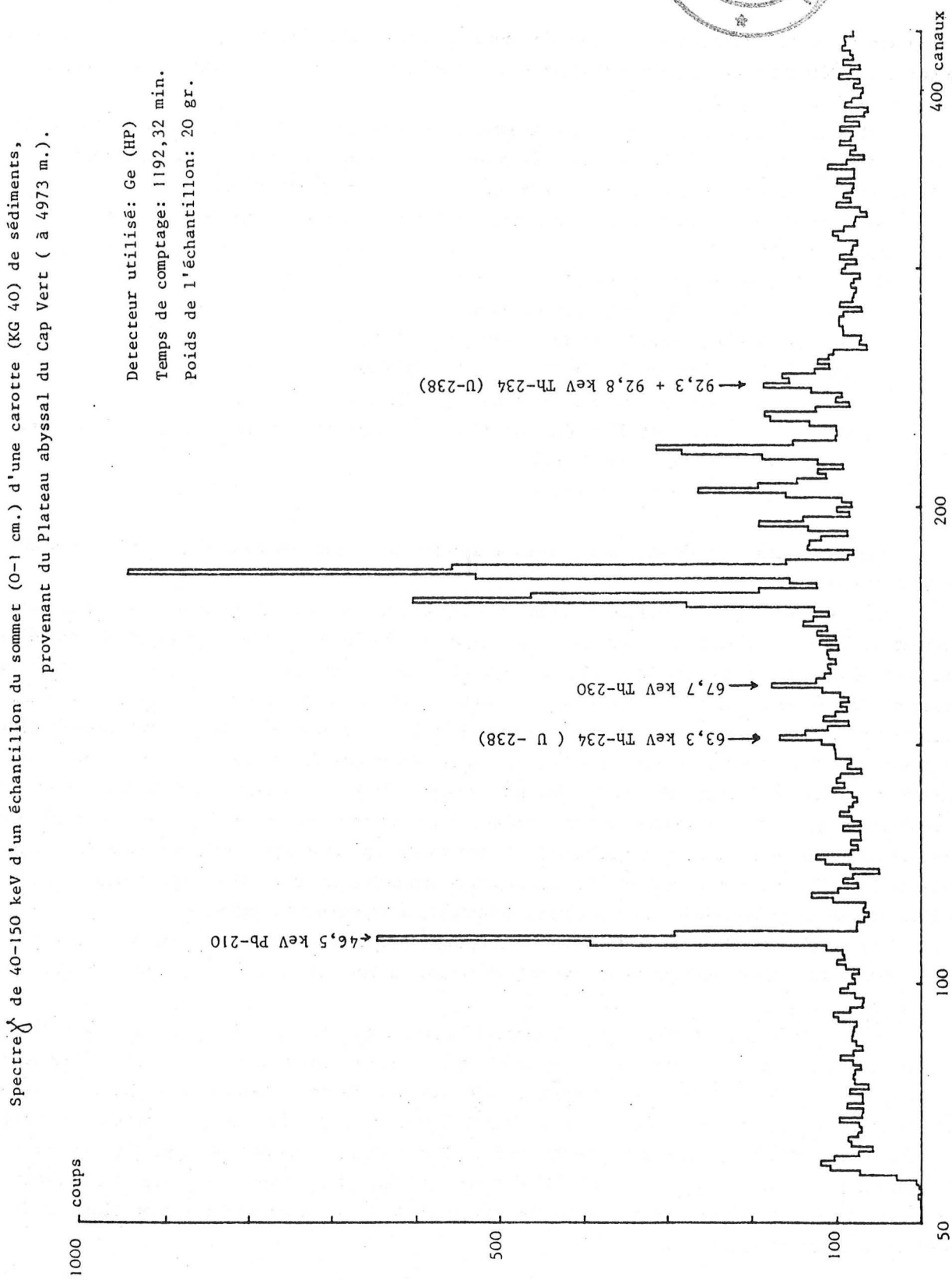


Fig. 30: Spectre gamma de 40 à 150 keV d'un échantillon (0-1cm) d'une carotte de sédiments abyssaux (KG 40).

de comptage nettement supérieures à celles des détecteurs GeLi classiques : ceci a pour conséquence une meilleure détection des rayonnements gamma de basse énergie (<100 keV), émis par le Pb-210, le Th-230 et le Th-234 (fig. 30).

Grâce à cette technique, nous pouvons mesurer directement le Pb-210 (21,4 ans), le Th-230 ($7,15.10^4$ ans) et le Ra-226 (1622 ans) par les rayonnements gamma émis par ces radionuclides : Pb-210 par E = 46,5 keV, Th-230 par E = 67,8 keV, et Ra-226 par E = 186 keV.

Les autres radionuclides sont déterminés par des rayonnements gamma émis par leurs descendants de courte période (<25 jours) :

U-238 est déterminé par l'intermédiaire de :

Th-234 (24,1 j ; E_γ = 63,3 keV et 93 keV)
Rn-222 (3,825 j) par Pb-214 (26,8 min ; E_γ = 352 keV)
Ra-228 (5,76 ans) par Ac-228 (6,13 h ; E_γ = 338 keV)
Rh-228 (1,91 ans) par Pb-212 (10,6 h ; E_γ = 238 keV)

Pa 231-($3,25.10^4$ ans) est déterminé par l'intermédiaire de l'ensemble de 2 radionuclides :

Ra-223 (11,1 j ; E_γ = 269,4 keV)
Rn-219 (3,92 sec ; E_γ = 271 keV)

Les résultats sont obtenus sous forme de spectre indiquant les taux d'activité de chaque radionuclide (fig. 29-30).

Les mesures (une soixantaine environ) ont été effectuées dans un délai de 2 à 4 mois après l'obtention des échantillons, au cours des missions à la mer. Ce nouveau détecteur permet donc d'obtenir des résultats rapidement. En effet, la préparation des échantillons est simple et facile ; la mesure de chaque échantillon est d'environ 24 h, pour avoir une bonne précision. Toutefois, certains échantillons, en particulier ceux situés au niveau le plus profond de la carotte, sont laissés plus longtemps : 48 h en général. Ainsi, la précision de la mesure des activités des radionuclides, présents à une telle profondeur, est améliorée. Par exemple : le Pa-231 qui permet de connaître le taux de sédimentation, doit être mesuré au plus profond de la carotte. Or, le Pa-231, comme tous les éléments de la série de l'U-235, a une activité 20 fois moins importante que celle des éléments de la série de l'U-238. Grâce au détecteur à Ge(H.P.), très sensible, on peut, maintenant, mesurer le Pa-231, ce que ne permettaient pas les autres détecteurs à rayonnements gamma.

La précision (l'erreur statistique de comptage) est de l'ordre de 3 % pour un comptage de 1000 minutes pour un échantillon ayant une activité égale à 500 dpm, et de l'ordre de 10 % pour un échantillon de 100 dpm.

Avant d'effectuer les mesures, il faut étalonner l'appareil. Les étalons sont des sédiments, de poids variable, dont la concentration en différents radionuclides est connue. Trois boîtes de 10,1 g, 14,1 g et 30 g ont servi ici d'étalon. Elles ont été analysées pendant 24 h chacune. Les résultats obtenus nous ont permis de tracer la droite d'efficacité du détecteur, en fonction du poids, pour chaque radionuclide intéressant. Cette efficacité est exprimée en pourcentage. Plus le poids de l'étalon est important, plus l'efficacité diminue. Au cours des mesures, le poids de l'échantillon a été fixé à 20 g (poids sec), compte tenu des exigences de la préparation des échantillons et de la quantité de sédiment disponible.

- Préparation des échantillons

La carotte, destinée aux études de spectrométrie est décongelée verticalement, ouverte en 2 parties et prélevée jusqu'à 10 cm de profondeur, vers 15 cm et à la base même. Les 10 premiers centimètres sont échantillonnés, le plus finement possible, sachant que l'échantillon doit peser 20 g, sec. Les prélèvements sont préparés pour être lyophilisés. La lyophilisation est une dessication par sublimation et permet une bonne conservation. Cette lyophilisation dure, en général, 12 h. Puis, les échantillons sont mis en boîte cylindrique standard adaptée à ce détecteur (diamètre : 40 mm ; hauteur : 10 mm). Avant d'être posée sur le détecteur, chaque boîte est mise sous plastique, afin d'éviter toute contamination du détecteur par des poussières.

- Mesures

Les échantillons préparés sont mesurés tour à tour, pendant 24 h. Les résultats sont enregistrés et traités, comme expliqué précédemment. Les calculs tiennent compte du temps de la mesure, du poids de l'échantillon, de l'efficacité calculée pour chaque radionuclide et du bruit de fond de l'appareil.

Les résultats obtenus (en dpm/g) sont réunis dans un tableau, ainsi que les activités du Th-230 en excès, du Pa-231 en excès, du Pb-210 en excès et du Th-228 en excès, puis sont reportés sur un diagramme à échelle semi-logaritmique représentant en abscisse la profondeur (en cm) dans le sédiment et en ordonnée les activités du radionuclide (en dpm/g).

e) calcul du taux de sédimentation

Les activités des radionuclides diminuent en fonction du temps (de moitié pour une durée de temps égale à la période du radionuclide). Cette durée correspond à une certaine épaisseur de sédiment.

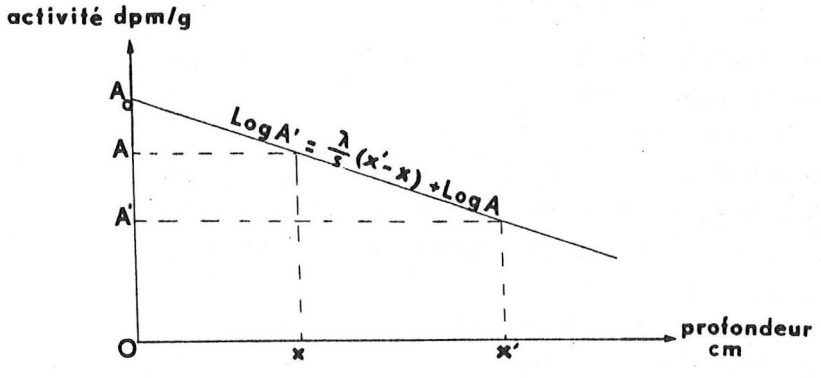


Fig. 31 - Droite de décroissance de l'activité d'un radionuclide en fonction de la profondeur dans les sédiments.

La pente de cette droite permet de calculer la vitesse de sédimentation.

Connaissant la période du radionuclide et l'épaisseur de sédiment, on peut déterminer la vitesse de sédimentation :

$$S = \frac{\text{épaisseur}}{\text{période}} = \frac{x'-x}{T}$$

Ici, les activités du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès sont mesurées à différentes profondeurs dans les sédiments, puis reportées sur le diagramme, à échelle semi-logaritmique. Les points obtenus s'alignent sur une droite d'équation :

$$\text{Log } A' = \frac{\lambda}{S} (x'-x) + \text{Log } A$$

avec A = activité du radionuclide à la profondeur x, λ = constante de désintégration.

f) calcul du taux de mélange

Plusieurs modèles mathématiques traduisant le mélange des sédiments superficiels ont été proposés par Goldberg et Koïde (1962), Berger et Heath (1968), Guinasso et Schink (1975) et Aller (1977). Goldberg et Koïde (1962) devaient estimer le taux de sédimentation de sédiments profonds par la méthode I/Th. Ce rapport doit décroître en fonction de la profondeur dans les sédiments. Or, il restait constant dans les premiers centimètres. Goldberg et Koïde ont conclu que les sédiments avaient subi un mélange. Ce mélange est assimilable à un transport de particules sédimentaires de type diffusion turbulente. Ils écrivent alors un premier modèle mathématique qui comprend 3 termes. Le premier terme exprime le transport de type diffusion (Loi de Fick), le deuxième terme, l'apport lié à la sédimentation et le troisième terme, la perte due à la désintégration du radionuclide. Guinasso et Schink (1975) reprennent ce modèle et ajoutent des conditions spatiales et temporelles. Le mélange n'existe que dans la couche superficielle des sédiments, appelée couche mélangée. Enfin Aller (1977) redéveloppe ce modèle pour les radionuclides, de la façon suivante :

$$\frac{\delta A}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(D \frac{\delta A}{\delta x}\right) - v \frac{\delta A}{\delta x} - \lambda A \qquad (1)$$

avec : A = activité du radionuclide (dpm/g)
x = profondeur dans le sédiment (cm)
λ = constante de désintégration
D = coefficient de diffusion
= coefficient de diffusion liée à l'activité biologique (D_B)
+ coefficient de diffusion chimique (D_c négligeable) (en cm^2/s)
v = coefficient d'advection
= coefficient d'advection liée à l'activité biologique (v_B)
+ taux de sédimentation net (S) (cm/s).

Aller suppose que la distribution des activités est stationnaire $\frac{\delta A}{\delta x} = 0$ et que le coefficient $D = D_B$ est constant dans toute la couche mélangée, en fonction de la profondeur. Puis il estime que le transport de type *diffusion est dominant* par rapport à celui d'advection, si on a $S^2 << 4 \lambda D_B$. Dans le domaine abyssal, S est de l'ordre de 1 cm/1000 ans ou de $0,3.10^{-10}$ cm/s, la constante de désintégration du Pb-210 est égale à $1,0.10^{-9}s^{-1}$, celle du Th-228 est de $1,1.10^{-10}s^{-1}$ et D_B est de l'ordre

de 10^{-8} cm^2/s, selon la littérature (tableau suivant). Donc, dans le domaine abyssal la condition $S^2 << 4 \lambda D_B$ est réalisée, l'équation devient :

$$D_B \frac{\delta^2 A}{\delta x^2} - \lambda A = 0 \qquad (2)$$

Pour résoudre cette dernière équation, on peut adopter deux modèles de mélange :

1) Pour le modèle de mélange à l'infini (infinite mixing model), D_B peut s'écrire :

$$D_B \quad \lambda \left(\frac{L_B}{\ln A_o - \ln A_{L_B}} \right)^2 \qquad (3)$$

2) Pour le modèle de couche limitée de mélange (finite mixed layer model), D_B peut s'écrire :

$$D_B = \lambda \left(\frac{L_B}{\ln 2A_o - \ln A_{L_B}} \right)^2 \qquad (4)$$

La valeur D_B obtenue par (4) est une valeur minimale.

Dans notre étude, cette dernière équation est utilisée pour calculer D_B, estimant qu'il est préférable de connaître sa valeur minimale. Et pour s'assurer de la validité de cette valeur, le calcul de la valeur maximale est effectué, par l'équation(3), et a montré à plusieurs reprises que la différence entre les deux valeurs obtenues est faible, voire négligeable.

Quelques auteurs en employant le modèle de Goldberg et Koïde (1962), ont obtenu les coefficients de mélange figurant dans le tableau suivant (pour des sédiments profonds) :

Auteurs	Secteurs géographiques	Profondeur (en m)	S ($cm/10^3$ans)	L (en cm)	D_B (10^{-8} cm^2/S)
De Master, Cochran (1977)	Atlantique Pacifique Antartique	4080-5050	0,15 - 3	8 - 15	0,1 - 0,8
Schink, Guinasso (1977)	Atlantique N	4810	?	?	0,32 - 1,0
Nozaki et al. (1978)	Zone Famous	2800	2,9	8	0,6
Schink et al (1978)	G.du Mexique	abyssal	2	9 - 12	0,32 - 2
Dayal et al (1979)	Atlantique NW	2800	?	8	0,36
De Master (1979)	Antartique	4000-5000	0,4 - 1,5	7 - 11	0,1 - 0,5

Ces valeurs de coefficients de mélange D_B, obtenus pour des sédiments abyssaux pourront être comparées aux résultats de cette étude, en tenant compte des profondeurs de mélange L et des taux de sédimentation S.

II - RESULTATS

A - LE CONE DE L'AMAZONE (STATION A)

Parmi les 15 carottes, KG 01 fut choisi pour les études de sédimentologie et de spectrométrie gamma. Elle se situe à 08°08'17N, 49°03'14W et à 4460 m de profondeur (fig. 2).

1 - *Résultats sédimentologiques*

L'ensemble des résultats sédimentologiques pour cette carotte et pour toutes les autres carottes étudiées sont données en annexe 1.

Deux niveaux lithologiques sont distingués (fig. 32).

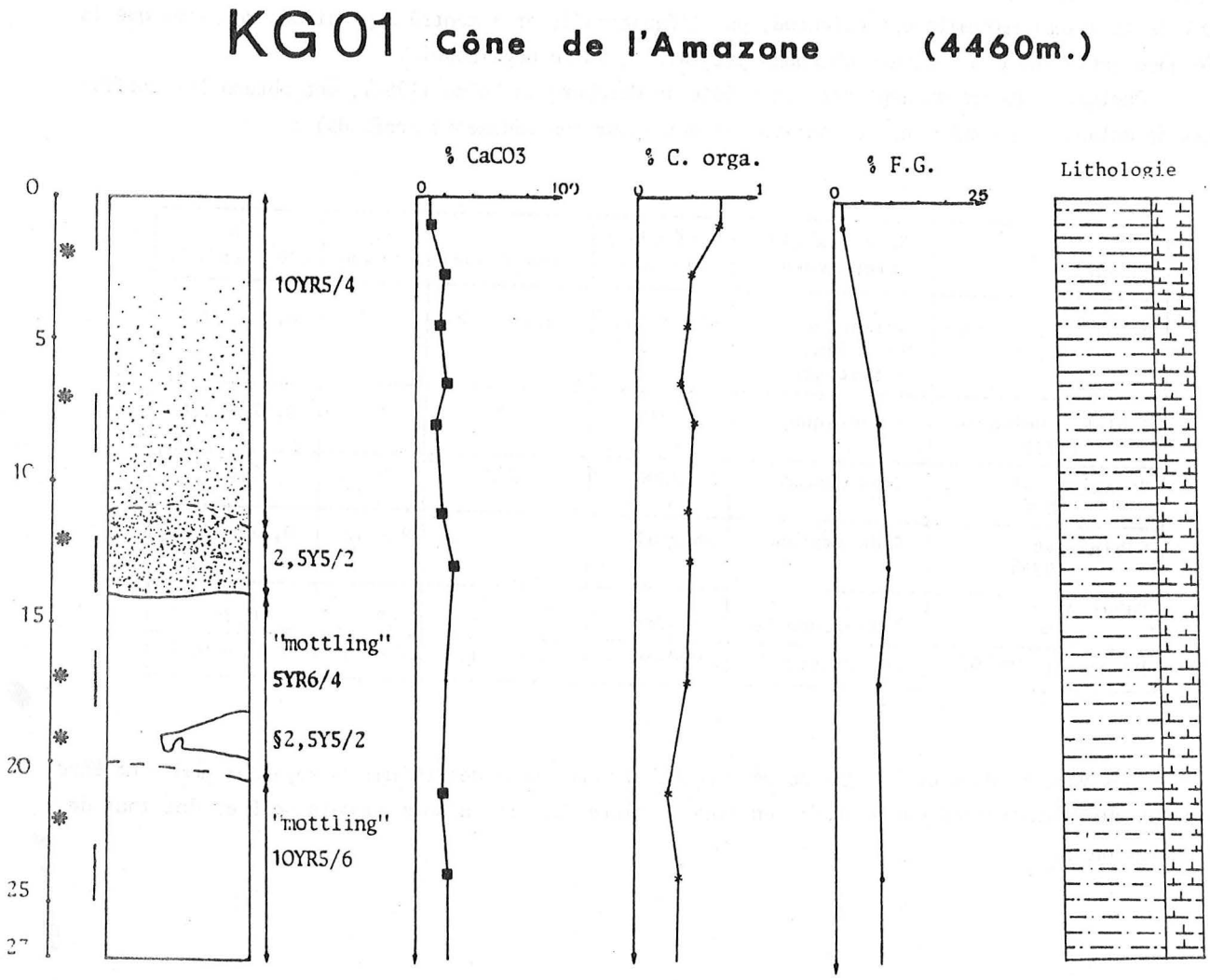


Fig. 32 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 01.

- Niveau 1 : 0-14 cm : ce premier niveau peut être subdivisé en deux :

. 0-2 cm. Les sédiments sont des vases à nannofossiles brunes jaunâtres (10 YR 5/4). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 10 %, le taux de C organique de 0,75 %.

La teneur en fraction grossière est de 1,8 %. Elle est principalement constituée d'éléments terrigènes (70 %) surtout des grains de quartz détritique. Les rares foraminifères (*G. menardii*) observés ont des tests très fragmentés.

Pas de figure sédimentaire.

. 2-14 cm. Les sédiments sont des vases à nannofossiles, brunes jaunâtres (10 YR 5/4) et brunes grisâtres (2,5 Y 5/2). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de l'ordre de 20 %. Le taux de C organique est moins élevé (0,41 à 0,53 %).

La teneur moyenne en fraction grossière est de 9 %. Cette fraction grossière est composée à 60 % d'éléments terrigènes. Les foraminifères (*G. menardii, G. truncatulinoïdes*) sont plus abondants et leurs tests moins fragmentés.

Pas de figure sédimentaire.

- Niveau 2 : 14-27 cm. Les sédiments sont toujours des vases à nannofossiles jaunes rougeâtres (5 YR 6/4), ou brunes jaunâtres (10 YR 5/6). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 20 % en moyenne. Le taux de C organique varie entre 0,50 et 0,30 %.

La teneur en fraction grossière est de 8 %. Elle est composée de 70 % d'éléments terrigènes. Les espèces de foraminifères pélagiques reconnues sont : *G. crassaformis, G. truncatulinoïdes, G. menardii.*

Il faut noter l'existence d'un terrier dont les sédiments sont des vases à nannofossiles, brunes grisâtres (2,5 Y 5/2). L'ensemble de ce niveau présente le faciès de marbrure ("mottling").

2 - *Résultats des mesures par spectrométrie gamma*

Six échantillons, prélevés dans une carotte KG 01, ont été mesurés par le détecteur Ge(H.P.). Les résultats de ce type d'analyse pour cette carotte comme pour toutes les carottes de l'étude sont donnés en annexe 1.

Les activités du Pb-210 en excès sont détectées jusqu'à 7,5 cm de profondeur dans les sédiments. Elles diminuent en fonction de la profondeur : une droite a pu être tracée et le coefficient D_B calculé (fig. 33).

$$D_B = 0,94 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Aucun excès de Th-228 n'est constaté.

Le Th-230 en excès et le Pa-231 en excès sont mesurés mais ne présentent aucune décroissance notable avec la profondeur. Il est donc impossible d'estimer le taux de sédimentation.

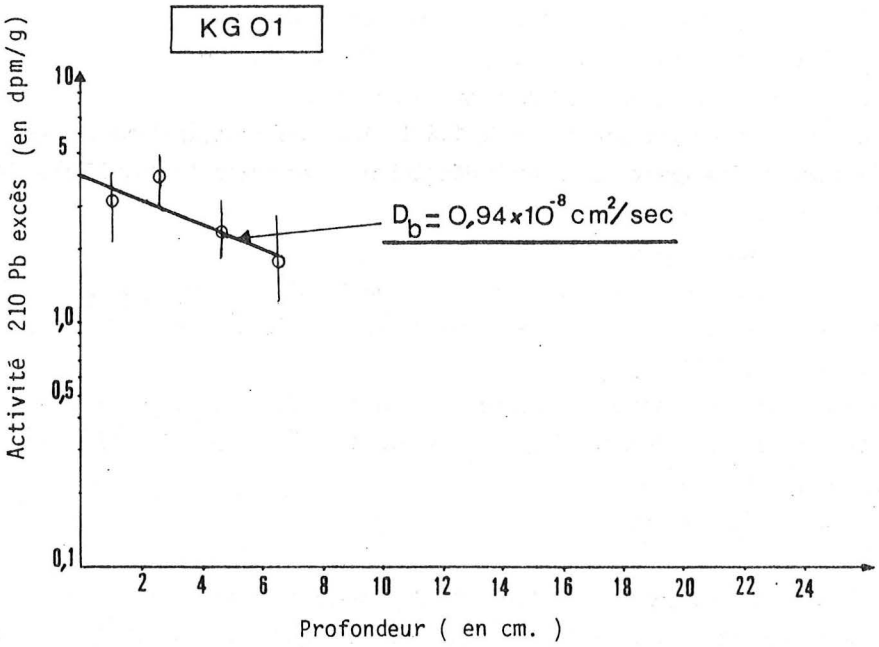


Fig. 33 - Droite de décroissance du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 01.

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

Seule la micropaléontologie permet d'évaluer le taux de sédimentation de cette carotte.

Dans le niveau 2, deux espèces de foraminifères pélagiques sont présentes : *G. crassaformis*, *G. truncatulinoïdes* qui, selon Moyes *et al.* (1978) sont, dans ce secteur, des marqueurs de la limite Holocène inférieur - Holocène supérieur, soit 7500 ans. *G. crassaformis* tend à disparaître à l'Holocène supérieur. Ici, cette même espèce est moins abondante dans le niveau 1 que dans le niveau 2. *G. truncatulinoïdes* présente un changement de sens préférentiel de son test à cette même limite. Malheureusement, cette espèce est en quantité trop restreinte, pour permettre une conclusion sur ce phénomène d'enroulement.

Il est donc vraisemblable que la limite de 7500 ans se situe à 14 cm de profondeur, d'où un taux de sédimentation de 1,8 cm/1000 ans, pour l'Holocène supérieur. Ce taux est en accord avec les résultats de Damuth (1977).

Le niveau 2 (14-27 cm) est d'âge Pléistocène - Holocène inférieur. Il s'est déposé sous un régime sédimentaire détritique. Moyes *et al.* (1978) décrivent le même type de sédimentation dans ce secteur.

Le terrier, observé à 20 cm de profondeur, contient le même type de sédiment (même nature, même couleur) que le niveau immédiatement sus-jacent. Il y aurait alors une "descente" de ces sédiments par un organisme fouisseur, auteur du terrier.

Le niveau 1 (0-14 cm) ne montre pas de changement de régime sédimentaire. Les sédiments sont d'âge Holocène supérieur. Les tous premiers centimètres de sédiments sont marqués par la dissolution des éléments carbonatés qui pourrait expliquer la diminution de la teneur en $CaCO_3$ et du pourcentage de fraction grossière. Cette dissolution serait due, selon Moyes *et al.* (1978), à l'agressivité de l'Eau de Fond Antarctique, qui remonte en suivant les bassins Est de l'Océan Atlantique.

Le mélange.

La couche mélangée a une épaisseur de 7,5 cm et se situe donc dans le niveau 1. Connaissant la teneur en C organique dans cette couche, une estimation du taux d'accumulation de C organique (S_C) est évalué ainsi :

S_C = taux de sédimentation x % C organique dans la couche mélangée

Ici, S_C est égal à $9,0 \times 10^{-3}$ cm/1000 ans. Ce taux est particulièrement élevé pour des sédiments profonds, mais la teneur en C organique et le taux de sédimentation sont importants, et caractéristiques d'un secteur soumis à l'influence d'apports terrigènes.

La faune est relativement riche, en particulier en polychètes et en échinodermes (annexe 1).

La présence et la décroissance du Pb-210 en excès jusqu'à 7,5 cm de profondeur montre que les sédiments superficiels sont soumis à un mélange profond et assez intense, compte tenu de la valeur élevée de D_B. Cette intensité de mélange est à mettre en relation avec la grande abondance de la faune et l'importance des apports contenant des ressources nutritives.

B - LA PLAINE DE DEMERARA (STATION B)

Une carotte a été prélevée pour les études sédimentologiques et radiochimiques : KG 16, qui se situe à 10°23'07N, 46°46'54W, à 4650 m de profondeur (fig. 3).

1 - Résultats sédimentologiques

Trois niveaux lithologiques peuvent être distingués (fig. 34).

- Niveau 1 : 0-2 cm. Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles, brunes jaunâtres (10 YR 5/4) dont le pourcentage en $CaCO_3$ est de 30 %. La teneur en C organique est de 0,38 %.

Le taux de fraction grossière est égal à 12 %, dont 50 % sont constitués par des éléments détritiques. Les foraminifères sont très fragmentés. On note, toutefois, la présence de *G. menardii*.

Pas de figure sédimentaire.

- Niveau 2 : 2-16 cm. Les sédiments sont des vases à nannofossiles, toujours brunes jaunâtres (10 YR 5/4). Le pourcentage moyen de $CaCO_3$ est de 25 %. La teneur en C organique varie de 0,33 à 0,22 %.

Le taux de fraction grossière est : 10-7 %. On reconnaît parmi les foraminifères (50 % de la fraction grossière) : *G. crassaformis, G. menardii* (moins abondants que dans le niveau 1).

KG16 Plaine abyssale de Demerara (4850m.)

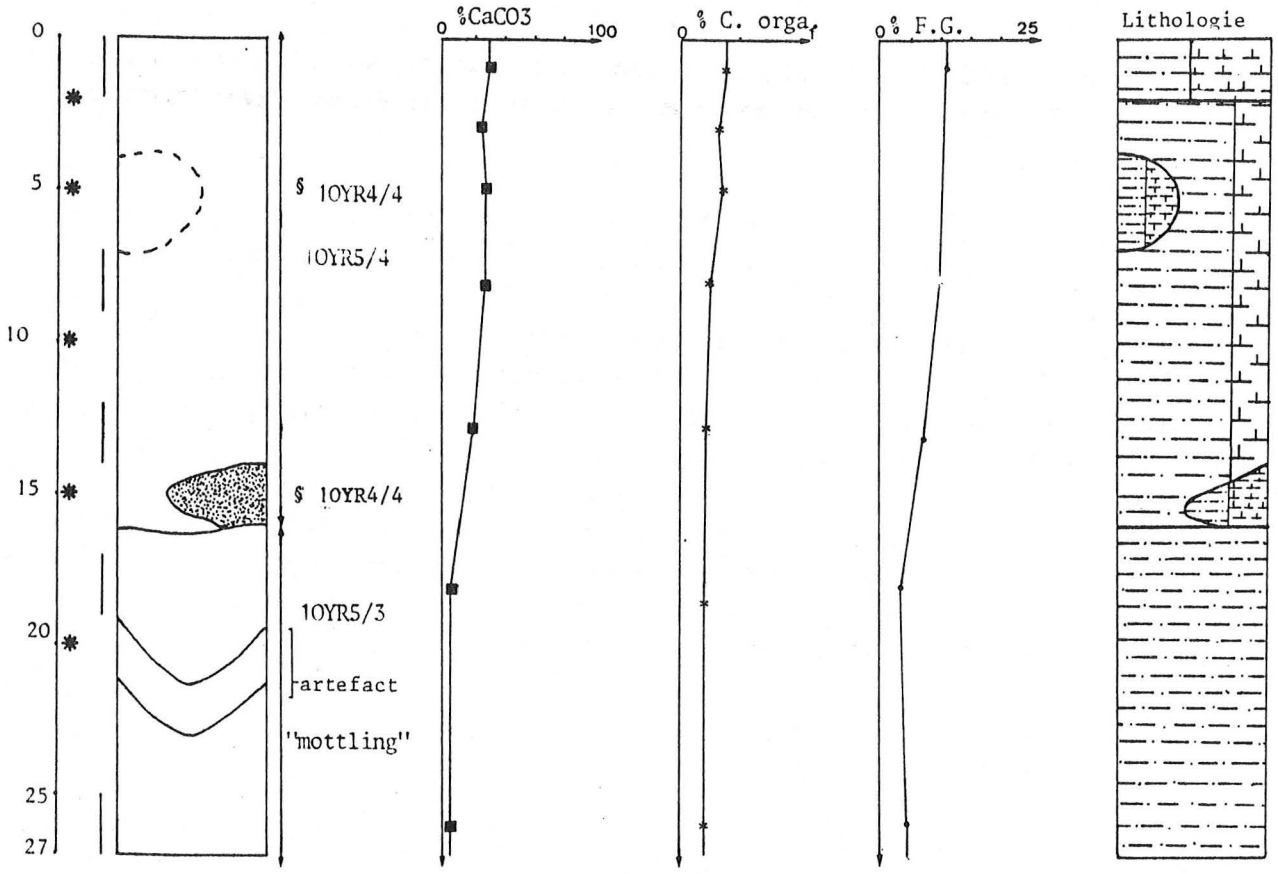


Fig. 34 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 16.

A 4 cm de profondeur, on observe un terrier dont les sédiments sont des vases à foraminifères et à nannofossiles, brunes jaunâtres foncées (10 YR 4/4). A 15 cm, un autre terrier est observé, contenant des vases à nannofossiles brunes jaunâtres très foncées (10 YR 4/4).

- Niveau 3 : 16-27 cm. Les sédiments sont des vases argileuses ou argiles pélagiques, brunes (10 YR 5/3). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 7 % en moyenne. La teneur en C organique est de 0,21 %.

La fraction grossière est égale à 3,6 % en moyenne et se compose à 80 % d'éléments terrigènes, le reste étant des débris de microfossiles non identifiables.

On n'observe aucune forme nette de figures sédimentaires, mais une certaine marbrure.

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma

Cinq échantillons ont été prélevés d'une deuxième carotte du boitier KG 16, jusqu'à 18 cm de profondeur.

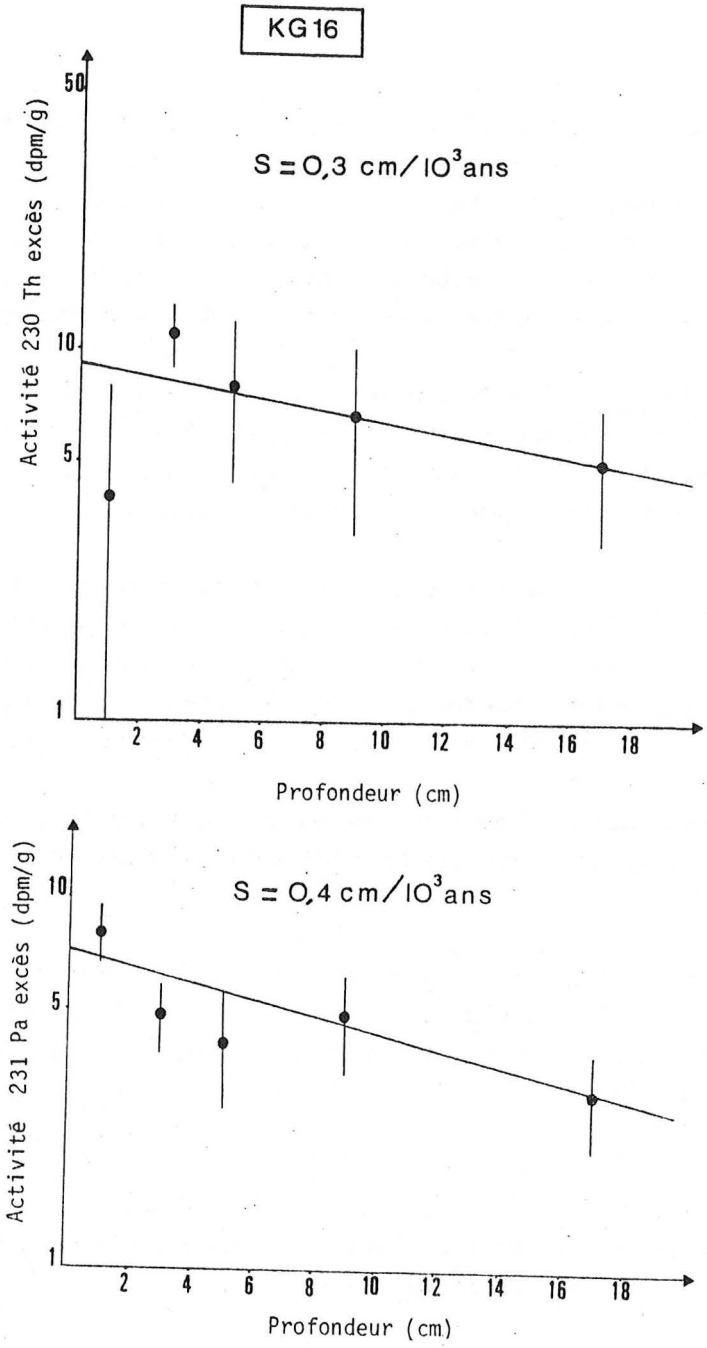


Fig. 35 - Droites de décroissance du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 16.

- Aucune activité du Pb-210 en excès ni de Th-228 en excès n'est détectée au-delà de 2 cm de profondeur. Aucun coefficient de mélange (D_B) n'a été calculé.

- Le Th-230 en excès et le Pa-231 en excès diminuent avec la profondeur (18 cm) (fig. 35). Les taux de sédimentation (S) obtenus sont :

S = 0,3 cm/1000 ans (Th-230 en excès)

S = 0,4 cm/1000 ans (Pa-231 en excès).

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

Le taux de sédimentation (0,3-0,4 cm/1000 ans) est obtenu par spectrométrie gamma, pour les 18 premiers centimètres de sédiments, qui correspondent à la période comprise entre 0 et 45800 ans B.P. Pendant cette période, des variations climatiques se sont succédées, influençant la sédimentation. Les valeurs obtenues sont donc les taux moyens de sédimentation pour la période 0-45800 ans B.P. Dans le niveau 1 (0-2 cm) *G. crassaformis* est moins abondante, ce qui caractérise le passage à l'Holocène supérieur, d'où un taux de sédimentation holocène supérieur de 0,3 cm/1000 ans.

- Le niveau 3 (16-27 cm) est d'âge Pléistocène. Les sédiments ont été déposés sous un régime sédimentaire terrigène. Cette sédimentation est liée aux apports de l'Amazone lors des baisses du niveau marin. Les microfossiles sont très fragmentés. Ce phénomène serait dû à la présence de l'Eau de Fond Antarctique, à fort pouvoir dissolvant vis-à-vis des carbonates.

- Le niveau 2 (2-16 cm). Les sédiments se sont déposés sous un régime sédimentaire terrigène au cours du Pléistocène et de l'Holocène inférieur. La dissolution est moins marquée que précédemment (tests de foraminifères moins fragmentés, pourcentages de $CaCO_3$ et de fraction grossière plus importants). A ces époques (fin Pléistocène - Holocène inférieur) la sédimentation devient moins terrigène. Les apports de l'Amazone sont entraînés plus au Nord-Ouest sur la plateforme qui est, alors, recouverte, puisque le niveau marin a remonté.

Les terriers, observés dans ce niveau, ont des sédiments plus grossiers que ceux de l'ensemble du niveau. L'organisme responsable aurait sélectionné les éléments les plus grossiers des sédiments.

- Le niveau 1 (0-2 cm) est daté Holocène supérieur. Le régime sédimentaire devient hémipélagique. Ainsi le pourcentage de $CaCO_3$ est plus élevé, et la fraction grossière contient moins d'éléments détritiques. Les tests de foraminifères sont toutefois fragmentés. Ce phénomène de fragmentation est lié à l'Eau de Fond Antarctique.

Le mélange.

Le taux d'accumulation (S_C) de C organique dans la couche mélangée (0-2 cm) est de $1,1 \times 10^{-3}$ cm/1000 ans. La faune est peu abondante (annexe 1). Ces deux caractères expliquent l'absence d'un remaniement des sédiments en profondeur (au-delà de 2 cm).

C - PLAINE ABYSSALE DU CAP VERT (STATION CV_1)

KG 33, parmi les 6 carottes prélevées, fut choisi pour les analyses sédimentologiques et de spectrométrie gamma. KG 33 se situe à 24°51'84N, 24°59'12W et à 5198 m de profondeur (fig. 4).

1 - Résultats sédimentologiques

Dans cette carotte, trois niveaux lithologiques sont reconnus (fig. 36).

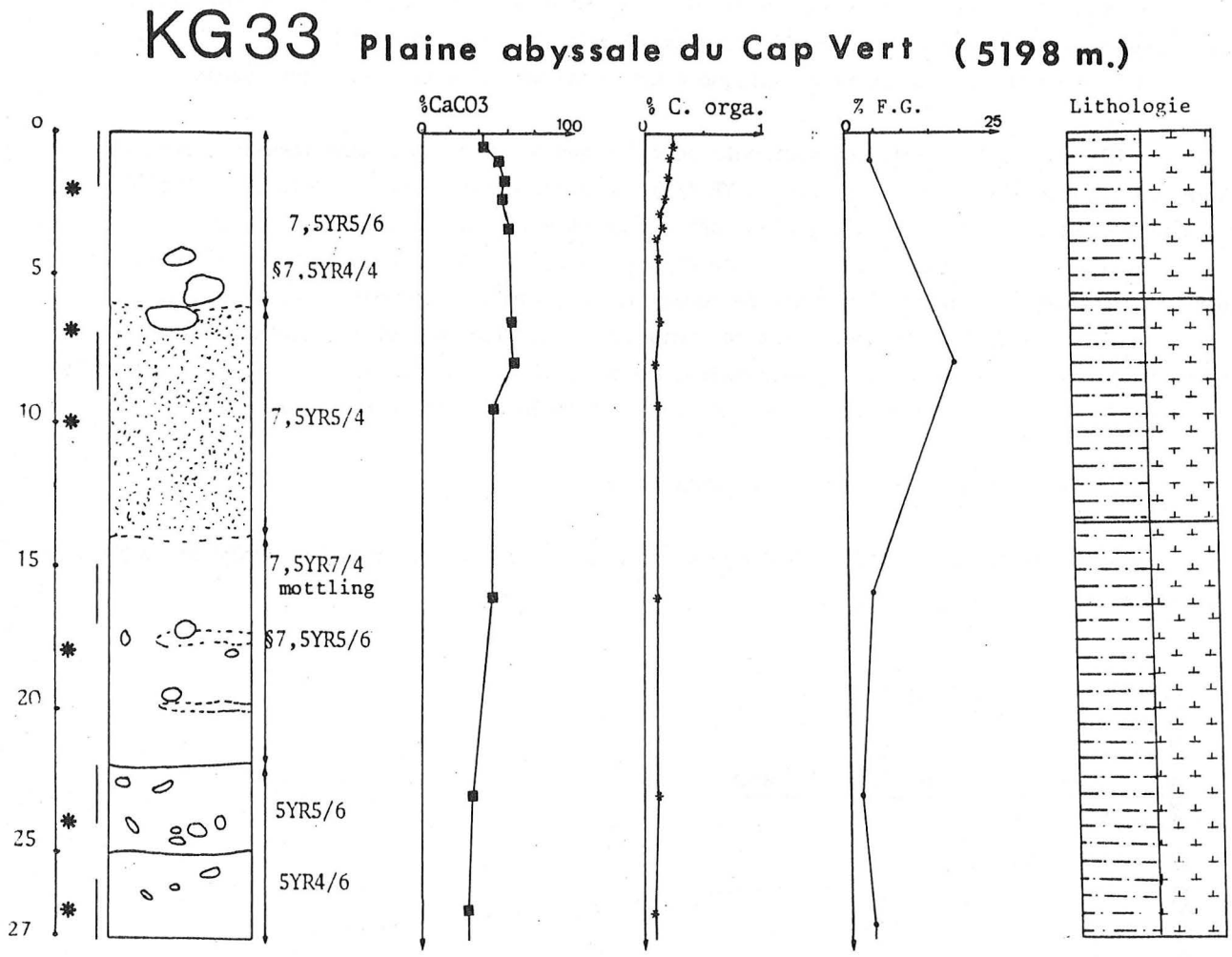


Fig. 36 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 33

- Niveau 1 (0-6 cm). Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles brunes (7,5 YR 5/6). Le pourcentage de $CaCO_3$ oscille entre 45 et 60 % avec la profondeur. La teneur en C organique diminue en profondeur : de 0,24 à 0,12 %.

Le taux de la fraction grossière est de 4,7 %. 90 % de cette fraction grossière sont des débris de foraminifères, difficilement identifiables.

A 5 cm de profondeur, on observe deux terriers (Planolites) contenant des boues marneuses à foraminifères et nannofossiles, brunes foncées (7,5 YR 4/4).

- Niveau 2 (6-14 cm). Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères, brunes (7,5 YR 5/4). Le pourcentage en $CaCO_3$ est de 65 %, il diminue avec la profondeur à 50 %. La teneur en C organique est de 0,11 % en moyenne.

Le taux de la fraction grossière est de 19 %. Elle est composée de 90 % de foraminifères, parmi lesquels on distingue : *G. menardii, G. crassaformis, G. truncatulinoïdes.*

A 6 cm on observe un terrier analogue à ceux observés dans le niveau sus-jacent.

- Niveau 3 (14-27 cm). Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles, rosâtres (7,5 YR 5/4), rouges jaunâtres (5 YR 5/6, 5 YR 4/6). Le pourcentage de $CaCO_3$ décroît de 50 à 35 % avec la profondeur. La teneur en C organique est stable et est égale à 0,12 %.

Le taux de fraction grossière est en moyenne de 3,7 %. Elle comprend 30 % d'éléments détritiques. On reconnaît, parmi les fragments de foraminifères, quelques carènes de *G. menardii.*

A 18 et 20 cm de profondeur, les terriers simples horizontaux et verticaux contiennent des boues marneuses à foraminifères et nannofossiles, brunes (7,5 YR 5/6). Entre 24 et 25 cm, l'assemblage de terriers rappelle le type Planolites. Le reste des sédiments présente l'aspect marbré.

2 - *Résultats des mesures de spectrométrie gamma*

Six échantillons ont été prélevés jusqu'à 28 cm de profondeur, pour les analyses de spectrométrie gamma.

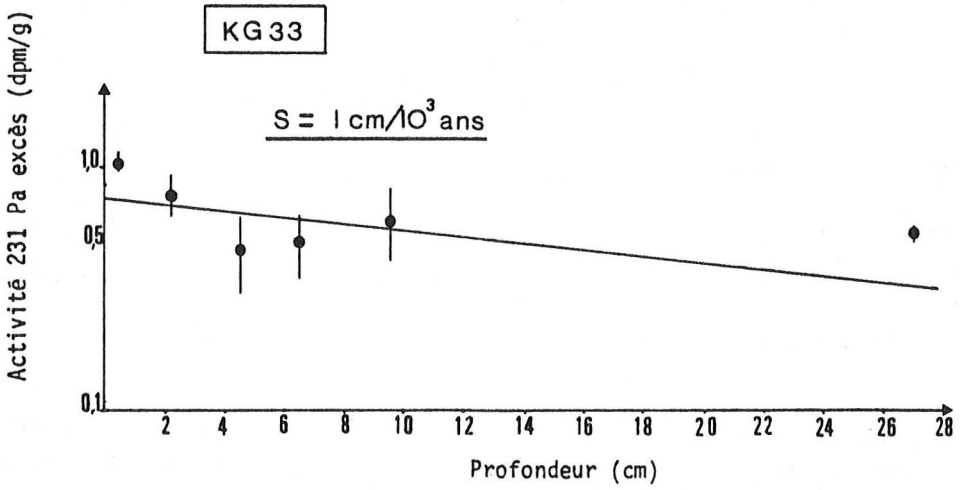


Fig. 37 - Droite de décroissance du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 33.

UNIVERSITE DE LA MER
LABORATOIRE DE GEOLOGIE

Les activités de Pb-210 en excès ne présentent aucune décroissance suivie, en fonction de la profondeur. Aucun excès de Th-228 n'est détecté.

Le Th-230 en excès ne montre aucune décroissance. Mais les activités du Pa-231 en excès diminuent de la surface à 28 cm de profondeur (fig. 37). Le taux de sédimentation (S), obtenu pour cette épaisseur de sédiment, est de 1 cm/1000 ans.

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

Le taux de sédimentation obtenu, par spectrométrie gamma (S = 1 cm/1000 ans) est une valeur moyenne pour les 28 premiers centimètres. La limite de 7500 ans serait à 7,5 cm de profondeur. Les critères micropaléontologiques, liés aux variations de la microfaune (foraminifères planctoniques) ne sont pas utilisables ici (Pujol, 1980). Les pourcentages en $CaCO_3$ augmentent au-dessus de 8 cm. Cette variation peut correspondre au passage Pléistocène - Holocène (11000 ans B.P.). Le taux de sédimentation pour l'Holocène serait alors de 0,7 cm/1000 ans. Ces estimations sont de même ordre de grandeur que celles données par Berger et vonRad (1972) pour le Quaternaire. Les valeurs, obtenues à partir de l'examen des nannofossiles, sont, au contraire, plus faibles : 0-0,18 cm/1000 ans pour les 270000 dernières années (zone NN 21, C. Muller, comm. pers.).

- Le niveau 3 (14-27 cm) s'est déposé au cours du Pléistocène, sous un régime sédimentaire hémipélagique. Les tests de foraminifères fragmentés, le pourcentage de $CaCO_3$ faible et l'importance des éléments détritiques dans la fraction grossière sont vraisemblablement en rapport avec les fluctuations climatiques, connues au Pléistocène.

Les terriers, observés entre 18 et 20 cm, contiennent le même type de sédiments que ceux du niveau 2 : l'organisme fouisseur aurait descendu les sédiments du niveau sus-jacent dans ce niveau 3.

- Le niveau 2 (6-14 cm) serait daté Pléistocène - Holocène et s'est déposé sous un régime sédimentaire hémipélagique, tendant à devenir pélagique. En effet, les tests de foraminifères constituent 90 % de la fraction grossière, les pourcentages de $CaCO_3$ sont plus élevés.

- Le niveau 1 (0-6 cm) est d'âge Holocène et hémipélagique. Dans le tout premier centimètre de sédiments, le pourcentage en $CaCO_3$ est particulièrement faible et les tests de foraminifères sont fragmentés. Ces deux caractéristiques sont, sans doute, dues à la dissolution, liée à la présence, même en proportions faibles, de l'Eau de Fond Antarctique.

Les terriers à la base de ce niveau contiennent les mêmes sédiments que ceux du niveau 2. L'organisme responsable aurait pénétré dans le niveau 2, puis aurait remonté du matériel dans le niveau 1.

Le mélange.

Aucun mélange significatif n'a pu être mis en évidence. Le taux d'accumulation de C organique dans la couche mélangée (0-1 cm) est de $1,7 \times 10^{-3}$ cm/1000 ans et la rareté de la faune permettent d'expliquer l'inexistence de mélange au-delà du premier centimètre de profondeur.

D - "PLATEAU" ABYSSAL DU CAP VERT (STATION CV_2)

KG 40 fut choisie à la fois pour les études de sédimentologie et par spectrométrie gamma. Elle se situe à 19°13'75N, 29°49'94W et à 4973 m de profondeur (fig. 5).

1 - Résultats sédimentologiques

Dans cette carotte, 4 niveaux lithologiques sont distingués (fig. 38).

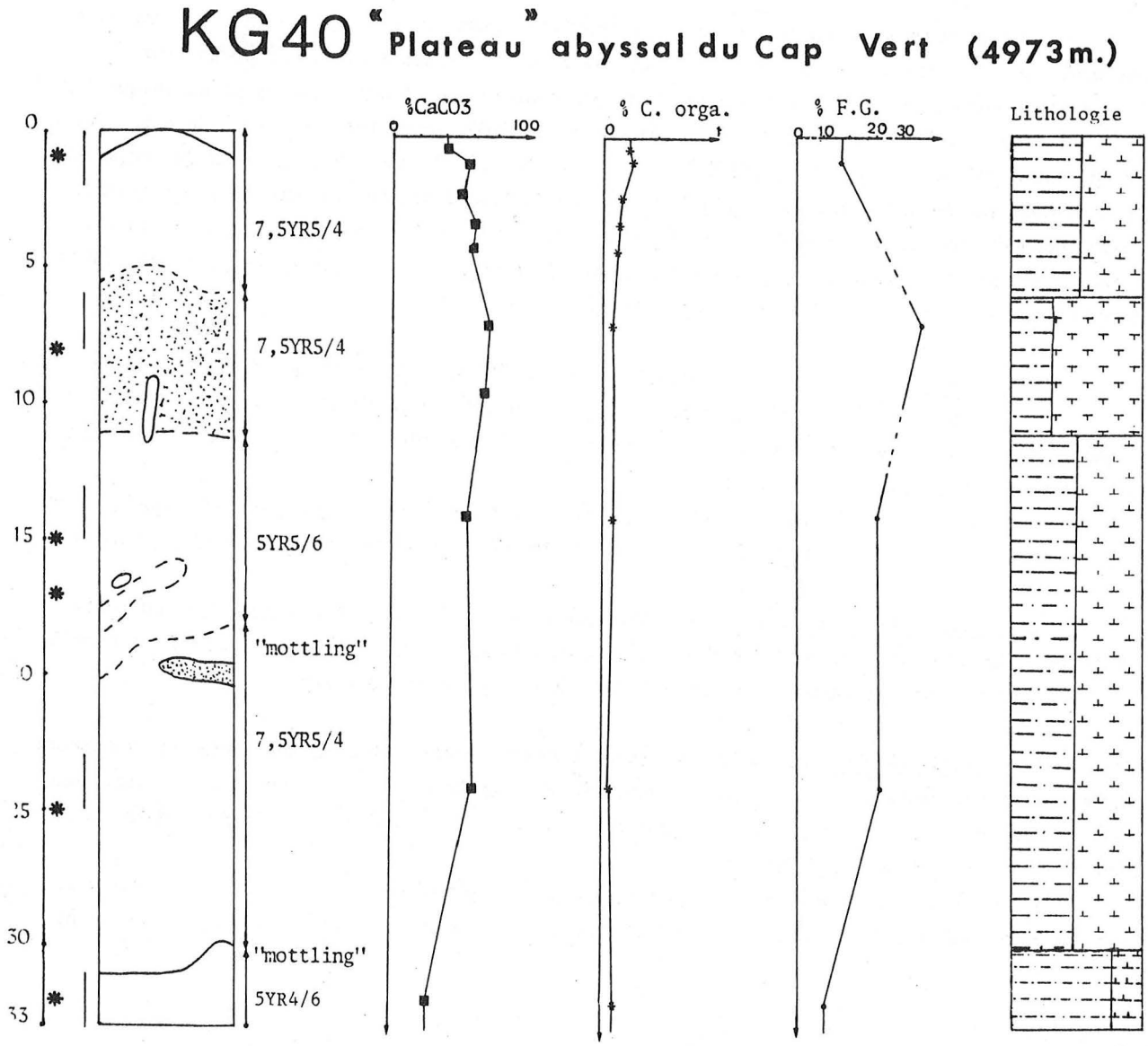


Fig. 38 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 40.

- Niveau 1 : 0-6 cm. Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles, brunes (7,5 YR 5/4). Le pourcentage de $CaCO_3$ varie : en surface, il est égal à 40 % ; il augmente avec la profondeur (60 %). La teneur en C organique diminue avec la profondeur, de 0,24 à 0,11 %.

Le taux de fraction grossière est de 14 %, dont 80 % sont constitués de débris de tests de foraminifères.

Pas de figure sédimentaire.

- Niveau 2 : 6-11 cm. Les sédiments sont des boues à foraminifères, brunes (7,5 YR 5/4). Le pourcentage de $CaCO_3$ est égal à 70 % en moyenne. La teneur en C organique est de 0,10 %.

Le taux de fraction grossière est de 33 %. Elle est composée à 80 % de foraminifères dont *G. menardii*, *G. crassaformis*.

Entre 9 et 11 cm on reconnaît un terrier allongé verticalement sans aucune structure interne (Planolites).

- Niveau 3 : 11-30 cm. Ce sont des boues marneuses à nannofossiles et foraminifères, rouges jaunâtres (5 YR 5/6) ou brunes (7,5 YR 5/4). Le pourcentage moyen de $CaCO_3$ est de 60 %. La teneur en C organique est de 0,09 % en moyenne.

Le taux de fraction grossière est de 21 %, constituée à 80 % de foraminifères, dont *G. menardii* (qui tend à disparaître). Les tests sont à nouveau fragmentés.

On observe surtout l'aspect marbré et, à 17 cm, un terrier contenant des boues marneuses à nannofossiles et foraminifères.

- Niveau 4 : 30-33 cm. Les sédiments sont des vases à nannofossiles, rouges jaunâtres (5 YR 4/6). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 25 %. La teneur en C organique est de 0,12 %.

Le taux de fraction grossière est de 10 %. Elle se compose de débris de foraminifères, à 70 %.

Pas de figure sédimentaire.

2 - Résultats des mesures de spectrométrie gamma

12 échantillons ont été prélevés dans une carotte KG 40, pour être analysés par le détecteur Ge(H.P.).

Les activités de Pb-210 en excès ne montrent pas de décroissance suivie. Aucun excès de Th-228 n'est détecté. Aucun coefficient D_B n'a donc pu être calculé.

Les activités du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès diminuent avec la profondeur (fig. 39). Les taux de sédimentation, calculés pour les 26 premiers centimètres, sont :

S = 0,5 cm/1000 ans (Th-230 excès)

S = 0,7 cm/1000 ans (Pa-231 excès).

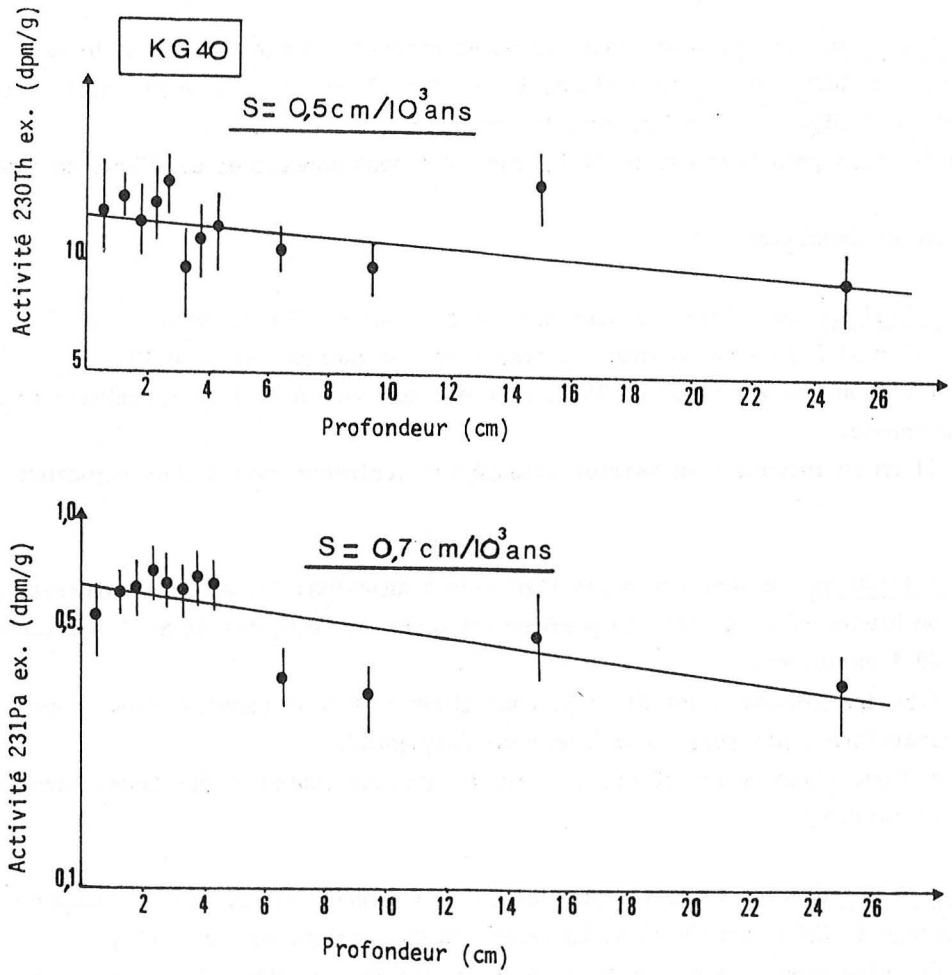


Fig. 39 - Droites de décroissance des activités du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 40.

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

Le taux de sédimentation obtenu par spectrométrie gamma (0,5-0,7 cm/1000 ans) est une valeur moyenne pour les 26 premiers centimètres de sédiments. La limite Pléistocène - Holocène (11000 ans) se situerait à 6,6 cm, environ. Aucun critère micropaléontologique ne peut être utilisé ici. Toutefois, l'augmentation du pourcentage de $CaCO_3$, vers 10 cm, est, sans doute, liée au changement climatique du passage Pléistocène - Holocène. Ainsi, le taux de sédimentation, pour l'Holocène, serait de 0,9 cm/1000 ans. Cette estimation est en accord avec celle donnée par Peterson *et al.* (1972) qui obtiennent un taux de 0,93 cm/1000 ans, pour l'ensemble du Quaternaire. Les taux obtenus par l'examen des nannofossiles sont plus faibles : 0-0,5 cm/1000 ans, valeur moyenne pour les 270000 dernières années (NN 21, C. Müller, comm. pers.).

- Le niveau 4 (30-33 cm). Ce niveau est d'âge Pléistocène déposé sous un régime sédimentaire détritique. Les tests de foraminifères sont en débris. La dissolution des carbonates est donc importante, ce qui explique les faibles pourcentages de $CaCO_3$ et de fraction grossière.

- Le niveau 3 (11-30 cm). La sédimentation devient hémipélagique. Ce niveau est toujours d'âge Pléistocène. Le pourcentage en $CaCO_3$, et celui de la fraction grossière sont plus élevés que dans le niveau 4. Les tests de foraminifères sont toutefois fragmentés. La dissolution des carbonates paraît, néanmoins, moins importante que dans le niveau précédent.

- Le niveau 2 (6-11 cm). Ce niveau est Holocène. Le régime sédimentaire devient pélagique. Ainsi, les sédiments sont très riches en $CaCO_3$, et en foraminifères planctoniques. Cette évolution dans la sédimentation peut être expliquée par le changement climatique qui marque le passage à l'Holocène.

- Le niveau 1 (0-6 cm). Ce niveau est Holocène. Le régime sédimentaire varie et devient hémipélagique. Le pourcentage de $CaCO_3$ est moins important que dans le niveau 2, de même que le taux de fraction grossière.

Le premier centimètre de sédiment est marqué par un pourcentage de $CaCO_3$ plus faible que le pourcentage moyen du niveau. De plus, les tests des foraminifères sont fragmentés. Une forte dissolution agit à la surface des sédiments. Cette dissolution est sans doute liée au passage de l'Eau de Fond Antarctique.

Le mélange.

Aucun mélange significatif n'a pu être mis en évidence. Le taux d'accumulation de C organique dans la couche mélangée (0-1 cm) est de $2,2 \times 10^{-3}$ cm/1000 ans. Ce taux est relativement faible, la faune récoltée est également peu abondante. Ces deux caractéristiques expliquent l'absence de mélange en profondeur.

E - LA TERRASSE DE MERIADZEK (STATION 1)

La carotte KG 163 se situant à 47°31'19N, 08°37'19W, à 2123 m de profondeur, a été choisie pour les études sédimentologiques. KG 162 (47°31'04N, 08°36'69W, à 2117 m de profondeur) a été échantillonnée pour les mesures de spectrométrie gamma et celles de C. organique (fig. 6).

1 - Résultats sédimentologiques

Deux niveaux lithologiques sont distingués (fig. 40).

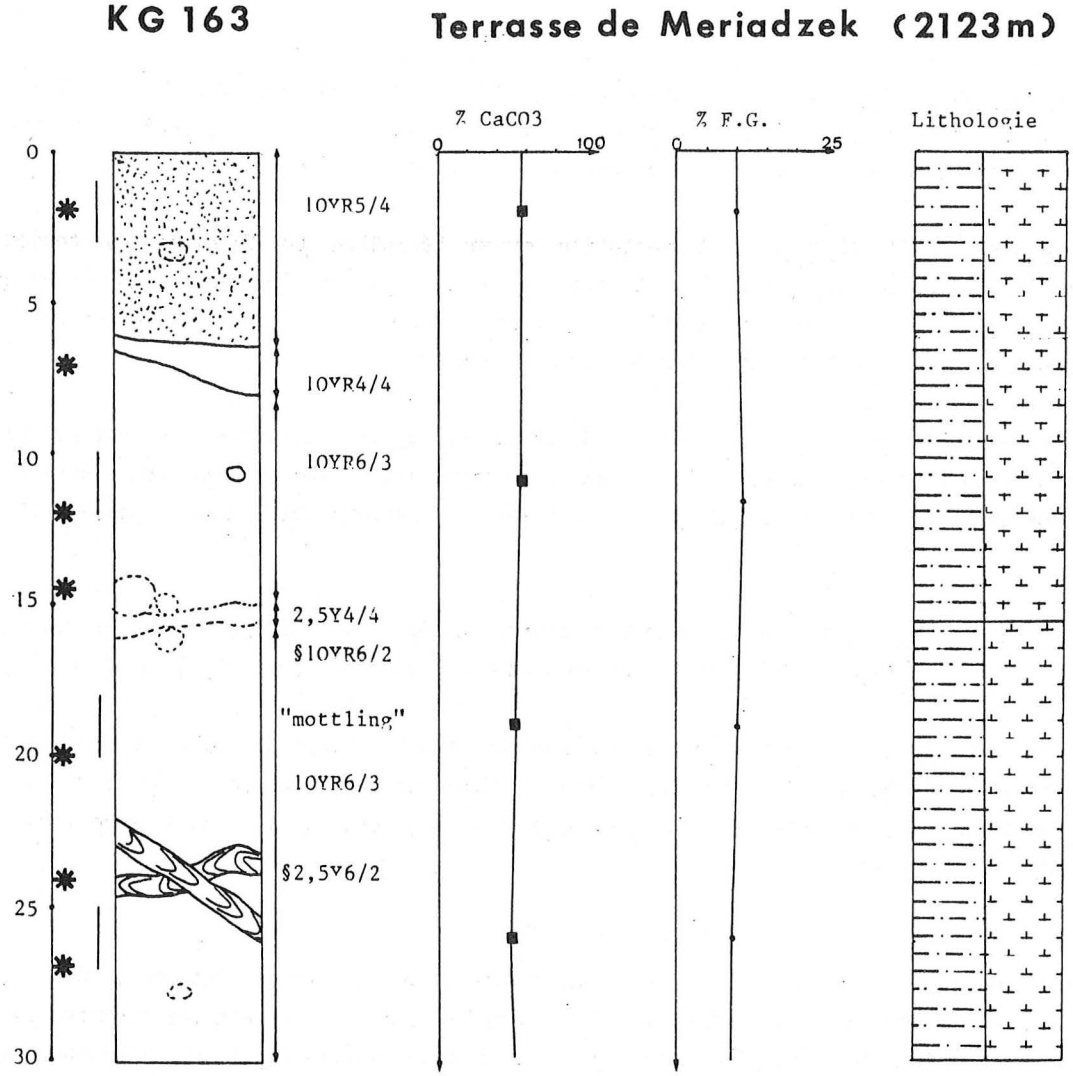


Fig. 40 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 163.

- Niveau 1 : 0-16 cm. Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères, brunes jaunâtres (10 YR 5/4) ou brunes pâles (10 YR 6/3). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 60 %.

Le taux de fraction grossière est de 10-11 %. Elle se compose à 90 % de foraminifères planctoniques, dont *G. menardii* et *G. truncatulinoïdes* à enroulement senextre principalement.

On note la présence de terrier (Planolites) à 14 cm qui contient des boues marneuses à nannofossiles.

- Niveau 2 : 16-30 cm. Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles, brunes pâles (10 YR 6/3). Le pourcentage moyen de $CaCO_3$ est égal à 50 %.

Le taux de fraction grossière est de 10 ou 9 %. Elle est constituée de 80 % de foraminifères dont *G. menardii* et *G. truncatulinoïdes* surtout dextres.

A 23 cm, on remarque deux Zoophycos qui s'entrecroisent. Ils contiennent des boues marneuses à nannofossiles, grises brunâtres claires (2,5 Y 6/2).

2 - *Résultats des mesures de spectrométrie gamma*

Cinq échantillons ont été prélevés dans la carotte KG 162.

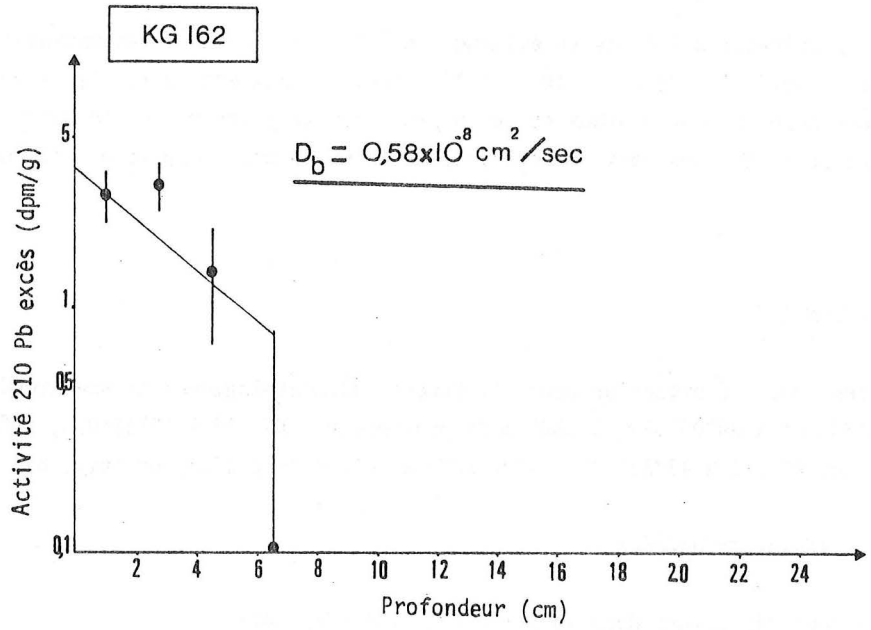


Fig. 41 - Droite de décroissance des activités du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 162.

Les activités du Pb-210 en excès diminuent jusqu'à 7 cm de profondeur (fig. 41). Le coefficient de mélange D_B calculé est de 0,58 x 10^{-8} cm^2/s.

Les activités du Th-228 en excès, du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès ne sont pas détectées, étant vraisemblablement inférieures au seuil de détection.

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

La population de *G. truncatulinoïdes* montre un changement du sens préférentiel d'enroulement du test entre le niveau 2 et le niveau 1. Ce changement, selon Pujol (1980), est caractéristique du passage Holocène inférieur - Holocène supérieur, dans le Golfe de Gascogne. Donc la limite entre ces 2 niveaux, soit 16 cm, serait à 7500 ans et le taux de sédimentation de l'ordre de 2 cm/1000 ans, à l'Holocène supérieur.

- Le niveau 2 (16-30 cm). Les sédiments sont d'âge Holocène inférieur, déposés sous un régime hémipélagique.

- Le niveau 1 (0-16 cm). Le régime sédimentaire reste hémipélagique. Les sédiments sont datés Holocène supérieur.

Le mélange.

Un mélange significatif a été mis en évidence de 0 à 7 cm. Le taux d'accumulation de C organique dans la couche mélangée est de 7,2 x 10^{-3} cm/1000 ans. Ce taux est particulièrement élevé et reflète l'importance des apports continentaux et de la productivité primaire sur la Marge. La faune est également abondante et riche. Ces deux caractéristiques contribuent à expliquer l'importance du mélange.

F - LA RIDE AEGIS (STATION 2)

Trois carottes ont été prélevées pour les études sédimentologiques et spectrométriques : KG 184 située à 47°32'30N et à 09°05'33W, à 2805 m de profondeur - KG 167 à 47°32'03N, 09°05'97W, à 2805 m de profondeur - et KG 182 à 47°31'72N, 09°05'28W, à 2810 m de profondeur (fig. 8).

1 - *Résultats sédimentologiques*

Deux niveaux sont distingués dans la carotte KG 184 (fig. 42).

- Niveau 1 : 0-16 cm. Ce premier niveau peut être subdivisé en 2.

. 0-10 cm : les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles et foraminifères, brunes pâles (10 YR 6/3). Le pourcentage en $CaCO_3$ est de 60 %.

Le taux de fraction grossière est de 61 %. Elle se compose à 80 % de foraminifères, en particulier *G. menardii, G. truncatulinoïdes* (senextres).

Pas de figure sédimentaire.

. 10-16 cm : les sédiments sont toujours des boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères brunes jaunâtres (10 YR 5/4). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 50 %.

Le taux de fraction grossière est de 28 %, avec 80 % de foraminifères (dont *G. truncatulinoïdes* à enroulement senextre et *G. menardii*).

- Niveau 2 : 16-28 cm. Les sédiments sont des boues marneuses à nannofossiles brunes olives (2,5 Y 4/4) ou brunes grisâtres (2,5 Y 5/2) ou brunes pâles (10 YR 6/3). Le pourcentage de $CaCO_3$ est de 35 % en moyenne.

Le taux moyen de fraction grossière est de 23 %. Elle se compose d'au moins 60 % d'éléments terrigènes à partir de 26 cm. Les foraminifères reconnus sont *G. menardii* et *G. truncatulinoïdes* dont le sens de l'enroulement est surtout dextre (récoltés dans les échantillons 11-13 cm et 19-21 cm).

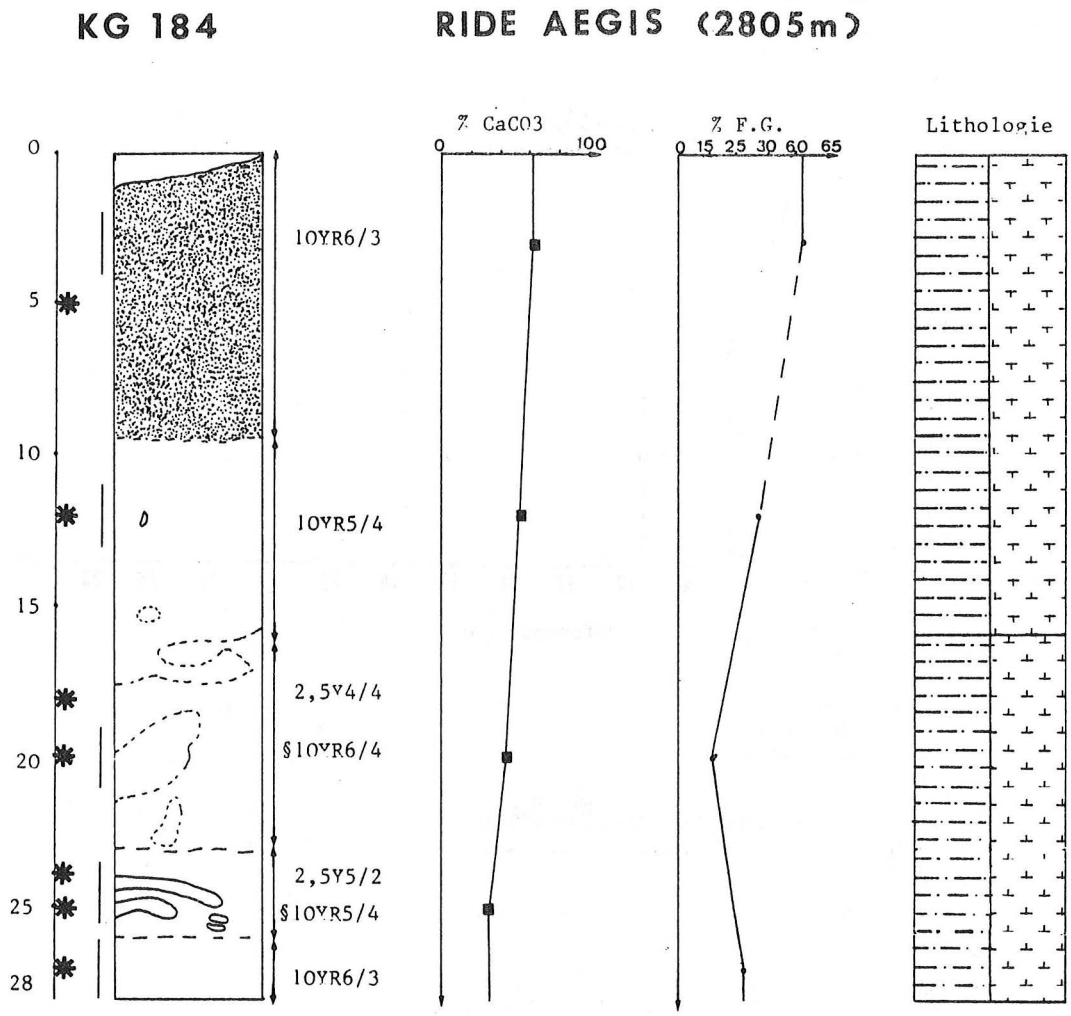


Fig. 42 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG 184.

Jusqu'à 23 cm on observe des figures sédimentaires, peu nettes, contenant des boues marneuses à nannofossiles, brunes jaunâtres claires (10 YR 6/4). Entre 23 et 26 cm, on note la présence de terriers ronds à allongés, rappelant les Planolites. Ils contiennent des boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères, brunes jaunâtres (10 YR 5/4).

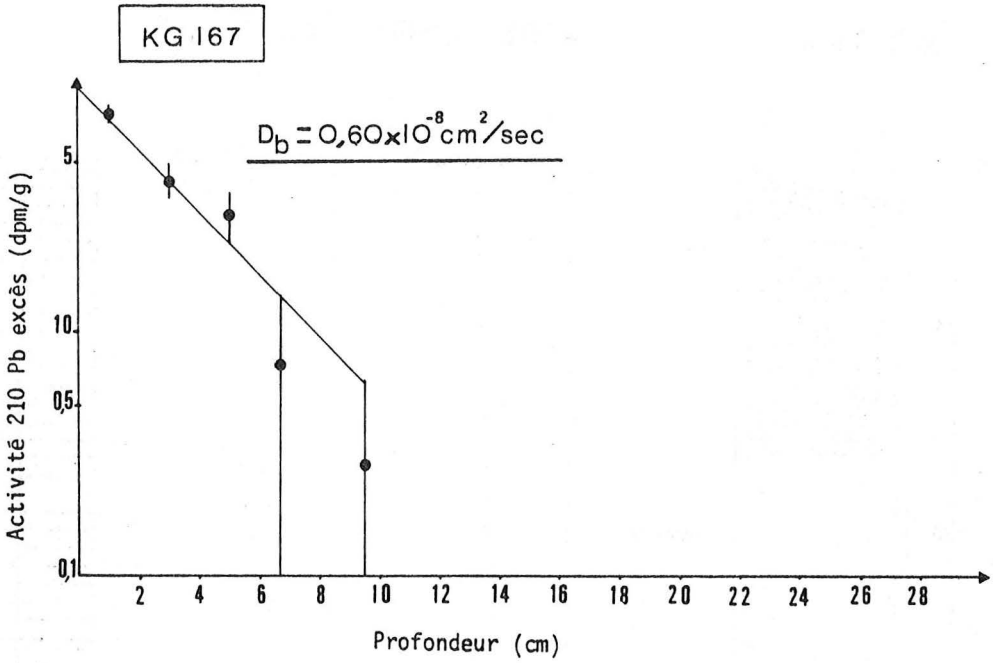
2 - Résultats des mesures de spectrométrie gamma

Cinq échantillons ont été prélevés dans la carotte KG 167, 4 dans la carotte KG 182.

Pour ces 2 carottes, une décroissance du Pb-210 en excès est observée. Les courbes de décroissance sont tracées (fig. 43), d'où un coefficient de mélange D_B est calculé :

KG 167 : $D_B = 0,60 \times 10^{-8}$ cm^2/s (profondeur = 10 cm)

KG 182 : $D_B = 0,53 \times 10^{-8}$ cm^2/s (profondeur = 6 cm)



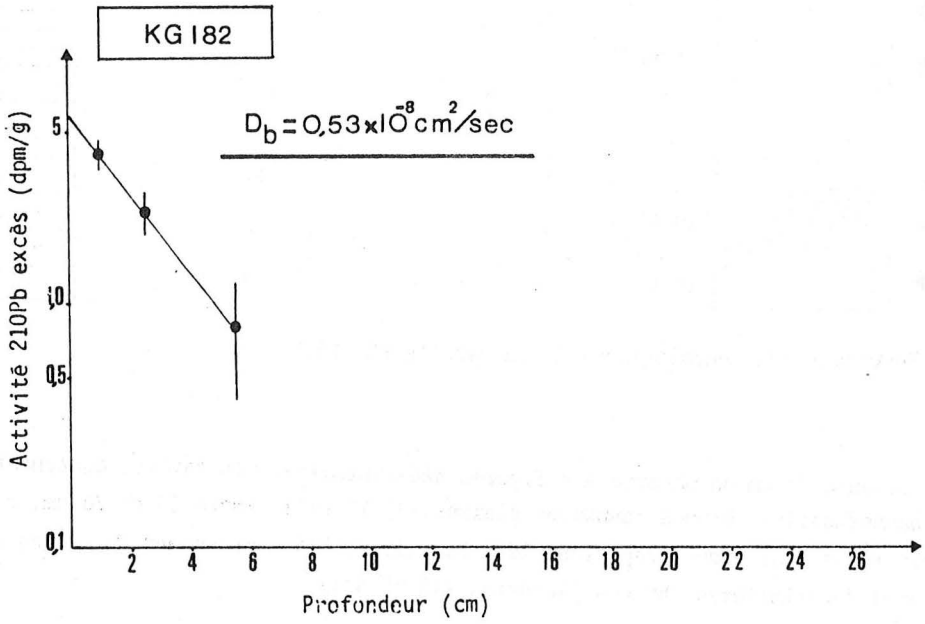


Fig. 43 - Droites de décroissance du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans les carottes KG 167 et KG 182.

Aucune activité de Th-228 en excès, de Th-230 en excès et de Pa-231 en excès n'a pu être détectée car elle doit être inférieure au seuil de détection de l'appareil.

3 - *Discussion*

Le taux de sédimentation.

Dans le Golfe de Gascogne, le changement du sens préférentiel de l'enroulement du test de l'espèce *G. truncatulinoïdes* marque la limite Holocène inférieur - Holocène supérieur : soit 7500 ans. Ici, elle se situe à 16 cm. Donc le taux de sédimentation pour l'Holocène supérieur est de 2,0 cm/1000 ans.

Dans le niveau 2, *G. truncatulinoïdes* a été observé dans les 2 premiers échantillons uniquement. A la base de ce niveau, la fraction grossière est plus riche en éléments détritiques. Ces deux caractéristiques sont significatives d'un changement climatique qui pourrait être lié au passage Pléistocène - Holocène. Le taux de sédimentation pour l'Holocène serait de l'ordre de 2,3 cm/1000 ans.

Les études faites sur une autre carotte de cette même station montrent que l'épaisseur de l'Holocène supérieur et de l'ensemble de l'Holocène peut varier d'un point à l'autre de la Ride. Ceci peut être expliqué par l'hydrodynamisme important qui existe dans ce secteur (Auffret *et al.*, 1975 ; Auffret et Sichler, sous presse).

- Le niveau 2 (16-28 cm) est d'âge Pléistocène - Holocène inférieur. Les sédiments se sont déposés sous un régime sédimentaire hémipélagique.

- Le niveau 1 (0-16 cm). La sédimentation est hémipélagique. Les sédiments sont datés Holocène supérieur. Le caractère pélagique de la sédimentation tend à augmenter. L'importance de la fraction grossière peut être expliquée par l'intensité de l'hydrodynamisme.

Le mélange.

Un mélange significatif a été observé de 0 à 6 ou 10 cm. Les taux d'accumulation de C organique dans les couches mélangées sont élevés, respectivement : 6,0 et 6,2 x 10^{-3} cm/1000 ans. Ils montrent l'importance des apports terrigènes dans ce secteur. La faune est riche et abondante. Ces deux facteurs permettent de comprendre la présence du remaniement observé dans les sédiments. Cette station est soumise à un régime hydrodynamique important, dont il est difficile de préciser la contribution dans le mélange observé.

III - DISCUSSIONS

A - *INTERETS ET LIMITES DE LA METHODE*

L'objectif principal de l'étude des sédiments est de quantifier le mélange des sédiments superficiels. Le mélange, assimilé à un transport de type diffusion, selon de nombreux auteurs, est traduit par un modèle mathématique, applicable en respectant certaines conditions. Ce modèle est une

représentation très simplifiée des phénomènes réels du mélange existant, et ne donne qu'une approximation de l'intensité réelle. Toutefois, il est considéré, actuellement, comme étant le meilleur et est utilisé dans plusieurs études sur la bioturbation, ce qui permet de comparer les différents résultats obtenus.

En domaine profond, le mélange peut être étudié à partir de la décroissance de plusieurs radionuclides, dont le Pb-210 en excès, en fonction de la profondeur dans les sédiments, comme le suggèrent Aller (1977), De Master et Cochran (1977), Nozaki *et al.* (1977). Le Pb-210 en excès permet de mettre en évidence l'existence d'un remaniement dont l'âge n'excède pas les 100 dernières années. Par ailleurs, le Th-228 en excès montre la présence d'un mélange dont l'âge serait 10 fois moins ancien (c'est-à-dire au plus 10 ans). Aucun mélange sédimentaire n'a pu être déterminé par le Th-228 en excès. Il semble que la cinétique du mélange dans le domaine profond soit lente. Le Th-228 en excès, comme le montre la littérature, convient pour les études de remaniement sédimentaire dans les milieux peu profonds, littoraux ou estuariens, milieux caractérisés par des mélanges des sédiments intenses et rapides.

Les activités du Pb-210, comme celles du Th-230 et du Th-234, ont été mesurées bien que les rayonnements gamma de ces radionuclides aient des énergies inférieures à 100 keV. Les détecteurs GeLi conventionnels mesurent les activités des radionuclides dont les rayonnements gamma ont des énergies supérieures à 100 keV. Le détecteur à Ge(H.P.), fabriqué par une nouvelle technique de l'implantation ionique, ayant une couche morte très mince de 0,3 µm possède des efficacités de comptages nettement supérieures à celles des détecteurs GeLi conventionnels, et permet de mesurer avec précision, les activités du Pb-210, du Th-230 et du Th-234.

Cette étude bénéficie d'un grand nombre de mesures (une soixantaine, environ), réalisées en un court délai de temps (trois mois). La spectrométrie gamma est une technique qui permet d'obtenir rapidement des résultats, car elle ne demande pas de longues manipulations chimiques, comme la spectrométrie alpha. C'est donc une technique rapide, facile et non destructrice. De plus, pour l'étude de la bioturbation dans les sédiments, cette technique permet d'estimer l'intensité du mélange (cm^2/s) avec les paramètres d'espace et de temps, alors que la radiographie X, technique classique, utilisée en sédimentologie, ne donne qu'une idée de la profondeur du mélange.

Une autre étude complémentaire, sur d'autres carottes de sédiments prélevés dans les mêmes stations, pourrait être menée avec le Pb-210, d'une part, pour confirmer les résultats obtenus ici, et avec des radionuclides de périodes plus longues, d'autre part, pour connaître l'intensité d'un remaniement plus ancien que les 100 années.

De nouvelles méthodes d'échantillonnage peuvent être envisagées afin d'avoir plus de précisions et de connaître les variations éventuelles de l'intensité du mélange dans les premiers millimètres de sédiments. Il s'agit, dans ce cas, de prélever plus finement les sédiments compris entre 0 et 1 cm de profondeur en les imprégnant d'une résine, par exemple.

B - MELANGE SEDIMENTAIRE ACTUEL (LA COUCHE MELANGEE)

Le remaniement des sédiments en profondeur est constaté dans 3 stations : stations 1 et 2 du Golfe de Gascogne et station A du Cône inférieur de l'Amazone. Les sédiments des 3 autres stations :

celles du Bassin du Cap Vert et la station B de la Plaine abyssale de Démérara, présentent un mélange très superficiel, d'épaisseur inférieure à 2 cm. Les caractéristiques de chacune de ces 6 stations sont présentées dans le tableau suivant :

Station	1	2	A	B	CV1	CV2
Secteur géographique	Terrasse Mériadzek	Ride Aegis	Cône Amazone	Pl.abys. Démérara	Pl. abys. Cap Vert	Plat.ab. Cap Vert
Profondeur (m)	2100	2800	4400	4800	5200	4900
KG	162	167-182	01	16	33	40
Densité meiofaune ($x\ 10^3$ ind./m^2	501	388	277	134	66	75
Densité macrofaune (ind./m^2)	2793	4807	1793	1198	428	482
%C organique X	0,36	0,30-0,36	0,50	0,36	0,24	0,24
S_c ($x10^{-3}$cm/1000ans) X	7,2	6,0-6,2	9,0	1,1	1,7	2,2
%$CaCO_3$ X	53	60-62	11	30	46	41
%fraction grossière X	10	61	1,8	12	4,7	14
S (cm/1000ans) pendant la période de: (ans B.P.)	2,0 0-7500	0-2,0 0-7500	1,8 0-7500	0,3 0-7500	0,7 0-11000	0,9 0-11000
D_B ($x10^{-8}$ cm^2/s)	0,58	0,6-0,53	0,94	-	-	-
L (cm)	7	10-6	7,5	2	1	1

Fig. 44 - Tableau récapitulatif des données de chaque station. X : données pour la couche mélangée ; Sc : taux d'accumulation de C organique ; S : taux de sédimentation ; D_B : taux de mélange ; L : épaisseur de la couche mélangée.

Certains caractères tels que la profondeur, le pourcentage en $CaCO_3$ ou la teneur en fraction grossière, ne semblent pas avoir d'influence sur l'importance du mélange : comme le montre la comparaison des stations 1, 2 et A. Mais ces stations se distinguent par des taux de sédimentation (pour l'Holocène supérieur) 2 fois plus élevés que ceux des stations ne présentant pas de mélange. Les teneurs en carbone organique doivent être rapportées aux taux de sédimentation, afin d'évaluer l'importance des apports trophiques (ou taux d'accumulation de C organique : S_c). Dans les stations où le mélange est constaté, les taux S_c sont au moins 3 fois supérieurs à ceux obtenus dans les stations B, CV 1 et CV 2.

Les apports trophiques résultent des influences continentales et de la productivité primaire. Les influences continentales sont montrées par l'importance du caractère terrigène de la sé-

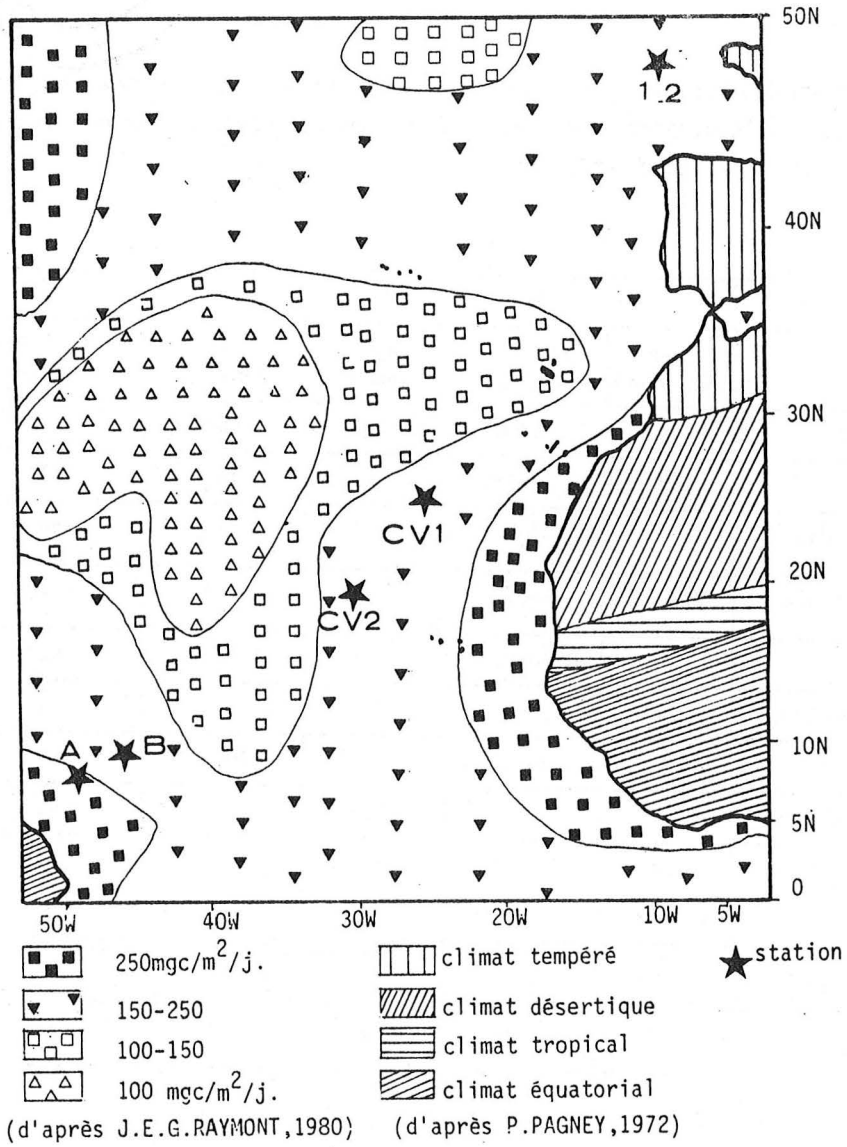


Fig. 45 - Carte de zonations des climats et de la productivité primaire dans l'Océan Atlantique (0- 50°N).

dimentation. Cette importance est fonction de la situation géographique mais aussi du type de climat observé sur le continent. La figure 45 présente d'une part la zonation climatique des continents bordant l'Océan Atlantique Nord, d'autre part, la distribution de la productivité primaire dans l'Atlantique Nord. Ainsi, la station A est soumise à la fois à de fortes influences continentales (au pied du cône de déjection d'un grand fleuve, sous un climat particulièrement humide) et à une grande abondance de la productivité primaire. Les stations 1 et 2 subissent des influences continentales moyennes (climat relativement humide, mais sur la marge continentale), la productivité primaire est relativement abondante. Les stations CV 1 et CV 2 sont soumises à une productivité primaire relativement abondante (150 à 250 mgC/m^2/j.) (fig. 45), mais ne subissent que peu d'influences continentales (au large d'une zone désertique). La station B est soumise à une productivité primaire relative-

UNIVERSITE DE LYON DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

ment abondante, mais se situe dans une plaine abyssale où les apports continentaux sont plus faibles qu'en bas de la marge.

Il semble donc que la conjonction d'apports continentaux (taux de sédimentation élevés) et d'une productivité primaire, soit nécessaire pour qu'il existe un mélange sédimentaire significatif.

Toutefois, l'ensemble des apports trophiques est soumis au régime des courants de fond. Ces courants sont forts à la station 2 où le mélange est de même intensité qu'à la station 1, station caractérisée par un régime hydrodynamique moyen. Ces deux stations présentent des faunes quantitativement comparables. Il apparaît donc difficile, actuellement, de préciser la contribution des courants de fond dans le mélange des sédiments superficiels.

Les stations 1, 2 et A se caractérisent aussi par l'abondance de la faune, en particulier de la méiofaune qui est au moins 2 fois plus dense dans ces stations.

La station A présente la plus forte valeur de coefficient de mélange D_B : soit $0,94 \times 10^{-3}$ cm^2/s. Cette intensité élevée peut être expliquée par l'importance des apports trophiques ($S_c = 9 \times 10^{-3}$ cm/1000 ans) et par l'abondance de la faune, en comparaison avec les stations à la même profondeur (supérieure à 4400 m) : station B, CV 1 et CV 2.

Les deux facteurs qui régissent l'existence ou l'absence d'un mélange semblent être l'importance des apports trophiques et l'abondance de la faune.

Une comparaison entre les données bibliographiques et les résultats de cette étude est faite par l'intermédiaire du tableau suivant. Les données bibliographiques ont été choisies selon cer-

Références	Secteur géographique	Profondeur (m)	S (cm/1000ans) (période)	L (cm)	D_B ($\times 10^{-8} cm^2/s$)
Nozaki et al (1978)	Zone FAMOUS	2800	2,9 (0-23200)	8	0,60
Demaster (1979)	Antarctique	abyssal	0,4-1,5(0-16500)	9-12	0,1-0,5
Station 1	Terra Meriadzek	2100	2,0 (0-7500)	7	0;58
Station 2	Ride Aegis	2800	0-2,0 (0-7500)	6-10	0,53-0,60
Station A	Cône Amazone	4400	1,8 (0-7500)	7,5	0,94
Station B	Pl.abys.Démérara	4800	0,3 (0-7500)	2	-
Station CV1	Pl.abys.Cap Vert	5200	0,7 (0-11000)	1	-
Station CV2	Plat.ab.Cap Vert	4900	0,3 5o-11000)	1	-

Fig. 46 - Tableau synthétique des données bibliographiques et des données acquises au cours de l'étude.

tains critères :

- domaine abyssal,
- taux de sédimentation connu,
- épaisseur de la couche mélangée connue,
- calcul de D_B par le modèle de Guinasso et Schink (1975) (transport de type diffusion turbulente),
- âge maximal du mélange : 100 ans.

L'épaisseur de la couche mélangée quelle que soit la profondeur (2000 m ou plus), le lieu géographique et le taux de sédimentation est toujours du même ordre de grandeur : 6 à 12 cm (excepté dans les carottes KG 16, KG 33 et KG 40 où la couche mélangée a une épaisseur inférieure à 2 cm).

Les coefficients de mélange D_B obtenus dans cette étude sont de même ordre de grandeur que ceux cités antérieurement pour les profondeurs abyssales. L'intensité du mélange à ces profondeurs est, en moyenne, 5 fois plus faible que celle observée en domaine estuarien ou côtier (Aller, 1977 ; Turekian *et al.*, 1978 ; Bothner *et al.*, 1981). Cette différence est en rapport avec la grande richesse de la faune et l'abondance des ressources nutritives, reconnues dans les milieux peu profonds.

C - *ENREGISTREMENT "HISTORIQUE" DE LA BIOTURBATION*

Dans les carottes étudiées, les terriers sont observés grâce aux contrastes de couleurs et à la différence de taille du grain sédimentaire. Ces terriers appartiennent au faciès Nereites, décrit par Seilacher (1967).

Berger *et al.* (1979) présente un modèle stratigraphique constitué de 4 couches : couche mélangée, couche mélangée de transition, zone de transition et couche historique, dont les caractéristiques sont décrites au début de ce chapitre.

- Ici, *la couche mélangée, homogène*, est d'épaisseur variable, selon les carottes :

. KG 01 : 0-11 cm
. KG 16 : 0-2 cm
. KG 33 : 0-4 cm
. KG 40 : 0-6 cm
. KG 163 : 0-7 cm
. KG 184 : 0-9 cm

- La *couche mélangée de transition* est caractérisée par l'apparition de quelques terriers, et par des sédiments un peu plus compacts : elle n'a pu être mise en évidence dans les carottes KG 01 et KG 16.

. KG 33 : 4-14 cm
. KG 40 : 6-11 cm
. KG 163 : 7-15 cm
. KG 184 : 9-23 cm

- La *zone de transition* est la couche où le contraste de couleur permet une observation nette des terriers ; les sédiments sont un peu plus compacts :

. KG 33 : 14-27 cm, avec de nombreux Planolites
. KG 40 : 11-30 cm, avec peu de terriers
. KG 163 : 15-30 cm, avec quelques Planolites et deux Zoophycos
. KG 184 : 23-28 cm, avec quelques Planolites

- La *couche historique* n'est observée que dans la carotte KG 40 (30-33 cm) où elle se caractérise par du "mottling".

Cependant, ce modèle a des limites, car il résulte d'observations faites sur des sédiments, riches en carbonates prélevés dans le Pacifique où la sédimentation quaternaire est différente (dissolution accrue des carbonates et diminution du taux de sédimentation à l'Holocène) de celle de l'Atlantique.

Un nouveau modèle synthétique est présenté par Werner et Wetzel (sous presse) à partir de travaux effectués sur la marge NW africaine. Il se compose de 5 faciès sus-jacents, caractérisés par des associations d'ichno-espèces (fig. 47). Werner et Wetzel montrent ainsi que la diversité et la densité des terriers dans les sédiments sont plus importantes dans les sédiments des marges continentales que dans les plaines abyssales, ce que confirme l'observation des carottes KG 163 et KG 184.

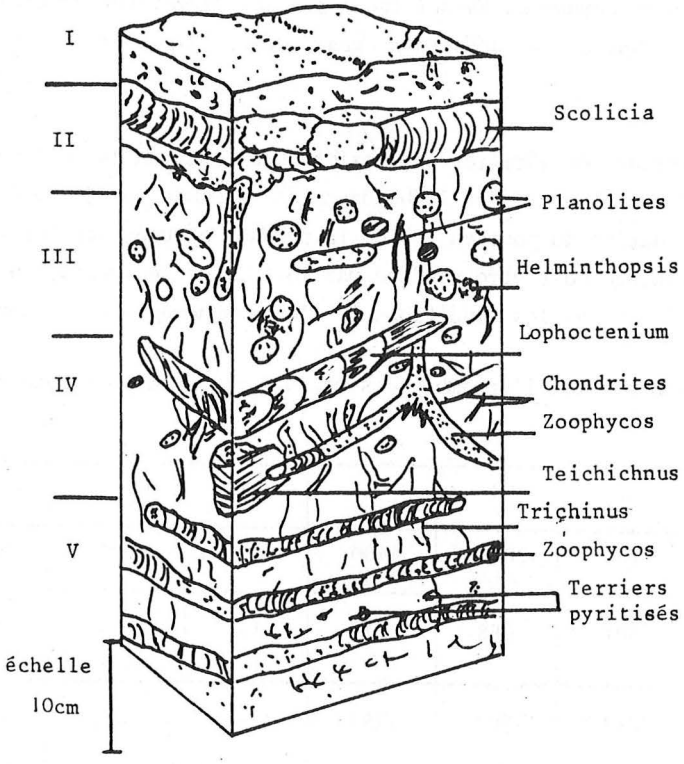


Fig. 47 - Modèle stratigraphique des figures sédimentaires composé de 5 faciès (associations de terriers) (d'après Werner et Wetzel, sous presse).

La carotte KG 163 présente les faciès I, II, III et V du modèle : I étant les premiers centimètres, II et III de 4 à 20 cm environ où l'on remarque l'existence de Planolites et V avec la présence des deux Zoophycos. Dans la carotte KG 184, sont déterminés les faciès I, II et III : I d'épaisseur 10 cm (environ), II, de 10 à 23 cm, puis III de 23 à 28 cm. L'ensemble de ces observations est fondé sur la présence de Planolites, seul terrier reconnu dans ces carottes. Les carottes KG 01

et KG 16 ne présentent aucune des figures sédimentaires décrites par Werner et Wetzel : aucun faciès n'a pu être reconnu. Dans les carottes KG 33 et KG 40, sont observés quelques terriers (Planolites). Cependant, ces carottes sont prélevées dans un bassin profond où les caractéristiques de la sédimentation, en particulier le taux de sédimentation et la teneur en matière organique (jouant un rôle important dans les phénomènes de bioturbation, selon ces auteurs), sont différentes de celles des sédiments des marges. Le petit nombre de terriers et les caractéristiques sédimentaires différentes nous ont incités à ne pas rechercher l'ensemble des faciès décrits par Werner et Wetzel.

Pour être conservé, un terrier doit pénétrer dans les couches profondes au-delà des premiers centimètres de la couche mélangée, car celle-ci n'est jamais conservée (Berger *et al.*, 1979). Les Planolites, mais surtout les Zoophycos (Wetzel et Werner, 1980) sont des terriers particulièrement profonds, ce qui explique leur conservation.

En tenant compte des caractéristiques des sédiments étudiés, les modèles stratigraphiques de Berger et al. (1979) ou de Werner et Wetzel (sous presse) permettent d'interpréter la zonation (en terme de couches ou de faciès) des sédiments superficiels, à partir de l'observation des terriers reconnus.

Il semble intéressant de vérifier s'il existe une relation entre l'enregistrement de la bioturbation, le coefficient de mélange D_B et l'abondance de la faune. Un degré de bioturbation B est estimé à partir d'une évaluation du pourcentage de la surface occupée par les terriers, dans la matrice sédimentaire. Ce pourcentage doit être pondéré par le taux de sédimentation de l'Holocène supérieur (ou de l'Holocène, époque où les conditions de l'environnement sont supposées être restées stables).

Le tableau suivant réunit l'ensemble des valeurs obtenues pour chaque station :

station	1	2	A	B	CV1	CV2
Profondeur (m)	2100	2800	4400	4800	5200	4900
Densité meïofaune ($x10^3$ind./m^2)	501	388	277	134	66	75
Densité macrofaune (xind./m^2)	2793	4802	1793	1198	428	482
Densité mégafaune récoltée (10^3ind./m^2)	107	92	24	11	3	8
B (cm/1000 ans)	30	30	0	0	7	9
D_B (10^{-8} cm^2/s)	0,58	0,53 0,60	0,94	-	-	-

Fig. 48 - Tableau comparatif des données de faune, du degré de bioturbation et du taux de mélange, pour chaque station.

Les degrés de bioturbation B paraissent corréler positivement avec l'abondance de la faune. Ils sont faibles ou égal à 0 quand la faune est peu abondante. Toutefois, la station A ne satisfait pas à cette relation.

Il faut également noter que le taux de mélange D_B dans la couche mélangée et le degré de bioturbation B, sous la couche mélangée, varient de la même façon (excepté pour la station A).

Il semble donc, que les variations de l'intensité de la bioturbation enregistrée en profondeur dans les sédiments, corrigées du taux de sédimentation puissent être utilisées pour estimer les variations de la productivité. L'étude des figures sédimentaires organiques observées dans les sédiments par radiographie X devrait pouvoir confirmer l'hypothèse émise ici.

discussions

conclusions

I - CONSERVATION DES TRACES ORGANIQUES

Cette étude a permis d'estimer l'importance de la bioturbation actuelle et de montrer l'influence des paramètres de l'environnement, à la fois sur la distribution des traces et sur l'intensité du remaniement sédimentaire dans six secteurs du domaine abyssal de l'Océan Atlantique (Terrasse de Meriadzek, Ride Aegis, Cône inférieur de l'Amazone, Plaines abyssales de Demerara et du Cap Vert, Plateau abyssal du Cap Vert). Les figures de remaniement analysées à partir des photographies, la distribution des radionuclides dans les sédiments et l'examen de la bioturbation enregistrée dans la couche d'âge Holocène ont contribué à donner des informations complémentaires qui ont été discutées en tenant compte d'un maximum de connaissances concernant les paramètres de l'environnement qui contrôlent la bioturbation.

Les paramètres de l'environnement et l'activité des organismes contribuent à la conservation des figures sédimentaires, à la surface des sédiments. En effet, les traces peuvent être détruites par les organismes, érodées par les courants de fond ou recouvertes par les sédiments. Les actions des organismes et des courants de fond entraînent un remaniement sédimentaire, le recouvrement des traces par les apports verticaux s'effectuent essentiellement dans les milieux où il existe peu de perturbations. Ainsi, deux types de milieu peuvent être considérés pour l'étude de la conservation des traces.

Dans le premier milieu, il existe un mélange des sédiments en profondeur. Ce mélange a été observé à partir des résultats des analyses de spectrométrie gamma, et quantifié par un coefficient de mélange D_B. A l'aide de ce coefficient de mélange, un temps de renouvellement (temps de "turnover") peut être estimé, en admettant que le taux de mélange soit constant pendant la durée du renouvellement. Le temps est calculé à partir de la vitesse virtuelle de diffusion des radionuclides dans la couche mélangée :

soit Q = flux virtuel de diffusion

$$Q = D_B \times \frac{\delta A}{\delta x} \quad \text{(loi de Fick)}$$

avec D_B = taux de mélange (cm^2/s)

A = activité du radionuclide (dpm/g)

x = profondeur dans les sédiments (cm).

et $Q \simeq D_B \times \frac{\Delta A}{\Delta x}$

La vitesse F virtuelle de diffusion est :

$$F = \frac{Q}{\bar{A}}$$

avec F en cm/s

$\bar{A}$: activité moyenne du radionuclide dans la couche mélangée (dpm/g).

Le temps de renouvellement T est la période nécessaire aux particules de la surface pour atteindre la base de la couche mélangée, et réciproquement pour conserver un volume constant. Il est égal à :

$$T = \frac{L}{F}$$

avec L : épaisseur de la couche mélangée (cm).

Ce temps de renouvellement représente le temps maximal de conservation des traces à la surface des sédiments.

Dans le deuxième type de milieu, où il n'existe pas de mélange en profondeur, les traces sont recouvertes par les sédiments. Le temps de conservation peut être évalué à partir du taux de sédimentation actuel, en admettant que les traces superficielles les plus fines, observées par photographies, ont au moins un relief d'1 cm. Cette dimension (limite inférieure d'observation sur photographie) a été retenue arbitrairement pour calculer la durée nécessaire à l'effacement d'une trace.

A partir des temps de conservation calculés dans chacun des secteurs, les densités des traces superficielles sont corrigées pour une période de 100 ans. Cette période est choisie car elle correspond à l'âge maximal du mélange observé à l'aide du Pb-210 en excès.

Station	1	2	A	B	CV2
Profondeur (m)	2100	2800	4400	4800	4900
Temps de conservation (ans)	145	323-158	334	3300	1100
Densité mégafaune mobile récoltée (ind./1000m^2)	107	92	24	11	8
Densité traces superfi. observ. (tr./1000m^2)	259	227	54	275	415
Densité corrigée traces superfi. (tr./1000m^2)	179	70 - 144	16	17	38

Fig. 49 - Tableau des temps de conservation et des densités corrigées des traces superficielles.

UNIVERSITE DE LYON
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE

Les temps de conservation sont les plus longs dans les secteurs où il existe peu de perturbation sédimentaire, c'est-à-dire dans la Plaine abyssale de Demerara et sur le Plateau abyssal du Cap Vert (fig. 49). Ces secteurs étaient caractérisés, par ailleurs, par une grande richesse de traces superficielles observées, expliquées à présent, par une bonne conservation, comme le montre la figure 50. En revanche, les secteurs, où le remaniement des sédiments est observé, présentent des temps de conservation de durée dix fois plus courte que précédemment.

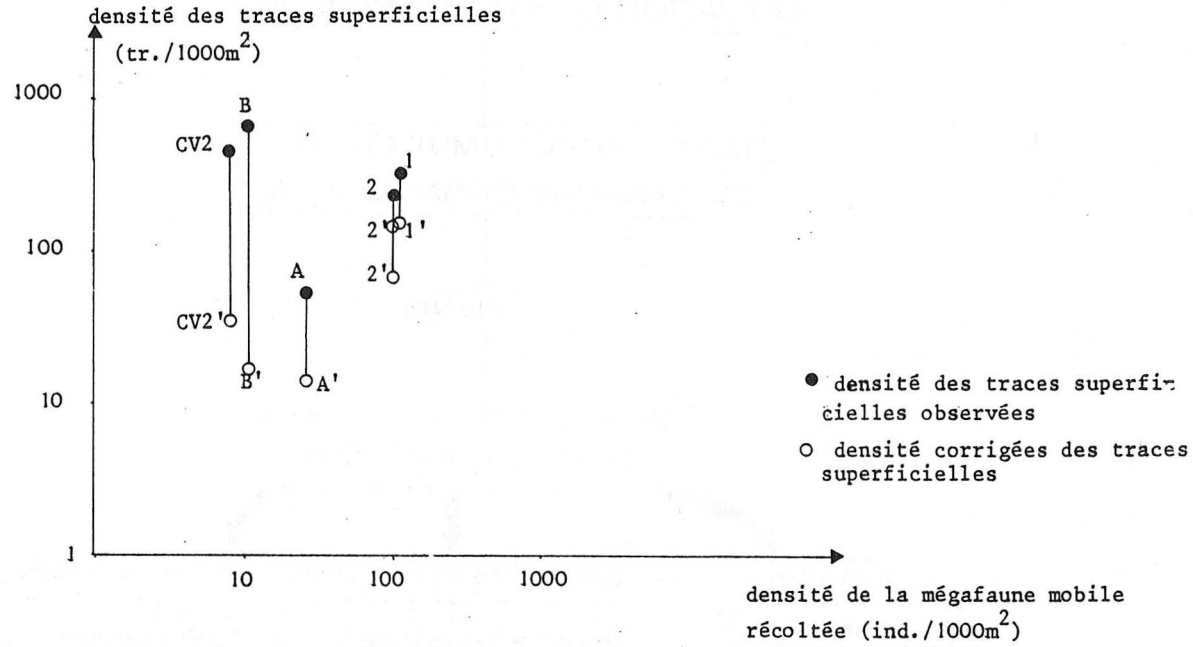


Fig. 50 - Diagramme des densités faunistiques/densités corrigées des traces superficielles.

A l'issue de l'analyse des photographies, il était démontré que la densité des traces augmentait avec la profondeur, ceci s'opposait à la règle générale de diminution de la densité faunistique. Cette contradiction était expliquée à la fois par l'hypothèse de Kitchell *et al.* (1978 b) et par les conditions de conservation des traces dans les grands fonds. Grâce à la correction apportée, la comparaison porte à présent sur des stations plus uniformes quant à leur nombre de traces dans une même période. Une meilleure corrélation apparaît entre l'abondance de la faune et les densités de traces. Cependant, la station CV2 présente encore une abondance relative, compte tenu de la pauvreté de la faune récoltée dans ce secteur. L'hypothèse de Kitchell *et al.* (1978 b) sur le comportement alimentaire des organismes en milieu oligotrophe reste l'explication possible d'une telle richesse en traces. Ces auteurs font intervenir l'importance des ressources nutritives sur l'activité animale à l'interface eau-sédiment. Les ressources nutritives ont un rôle prépondérant dans l'ensemble des paramètres de l'environnement.

II - ROLES DES FACTEURS DE L'ENVIRONNEMENT

Les facteurs de l'environnement sont reliés entre eux et interviennent sur l'intensité de la bioturbation (fig. 51). Ces relations ont été discutées successivement, en tenant compte des résultats obtenus au cours de cette étude et des données bibliographiques.

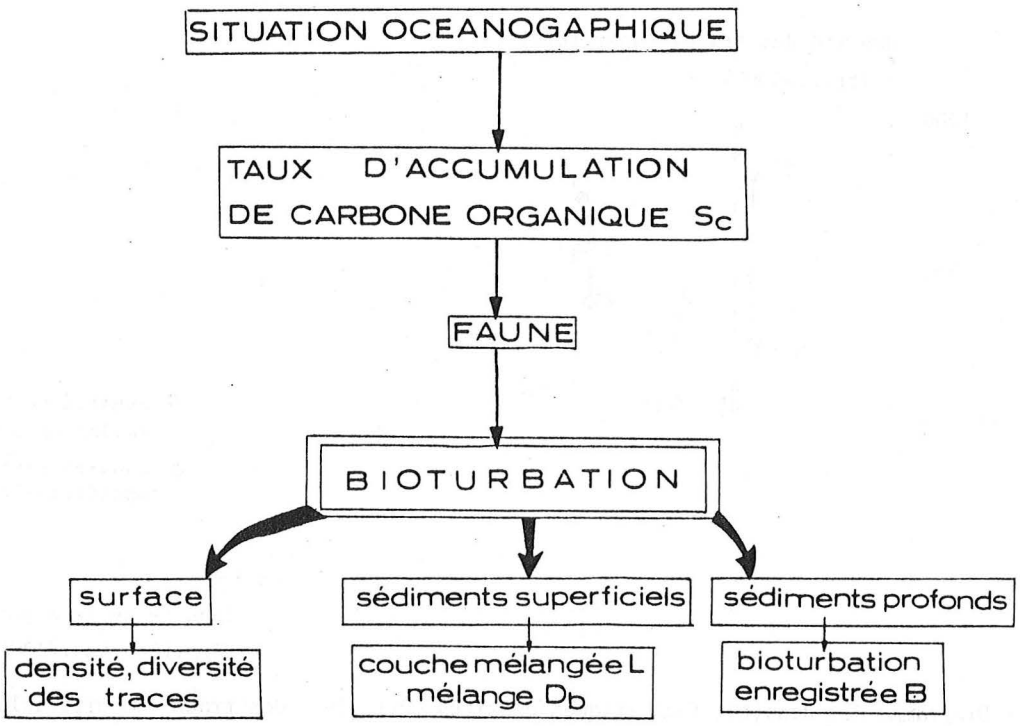


Fig. 51 - Relations entre les facteurs de l'environnement et la bioturbation.

- *Situation océanographique - taux d'accumulation de C organique (Sc)*. Cette relation a été mise en évidence à l'issue du chapitre "sédiments". Ainsi, les secteurs, caractérisés par l'influence d'apports continentaux et par l'abondance de la productivité primaire des eaux de surface, présentent un taux d'accumulation de C organique élevé (ce taux Sc permet d'évaluer grossièrement les apports trophiques). Par exemple, au pied du cône de déjection de l'Amazone (fleuve soumis à un climat équatorial), dans un secteur où la productivité primaire est élevée, le taux Sc est également élevé ($9,0 \times 10^3$ cm/1000 ans) (fig. 45). Ce taux Sc est près de 5 fois plus faible dans la plaine abyssale du Cap Vert, station CV1, qui a une sédimentation essentiellement pélagique, et dont les eaux super-

ficielles ont une productivité primaire légèrement moins importante.

- *taux Sc - faune*. Plusieurs auteurs (Griggs *et al.*, 1969 ; Sanders et Hessler, 1969) ont déjà montré que les apports trophiques conditionnent la faune. Dans cette étude, quelle que soit la catégorie de faune considérée (fig. 52), les densités faunistiques varient en fonction de l'abondance des ressources nutritives. Par ailleurs, la mégafaune récoltée ou observée présente un plus grand nombre d'organismes fouisseurs dans les secteurs sous influences continentales, alors que la faune est principalement rampante dans les secteurs oligotrophes. Cette remarque concorde avec les résultats de Khriponnoff (1979) et doit être considérée dans l'analyse de la bioturbation.

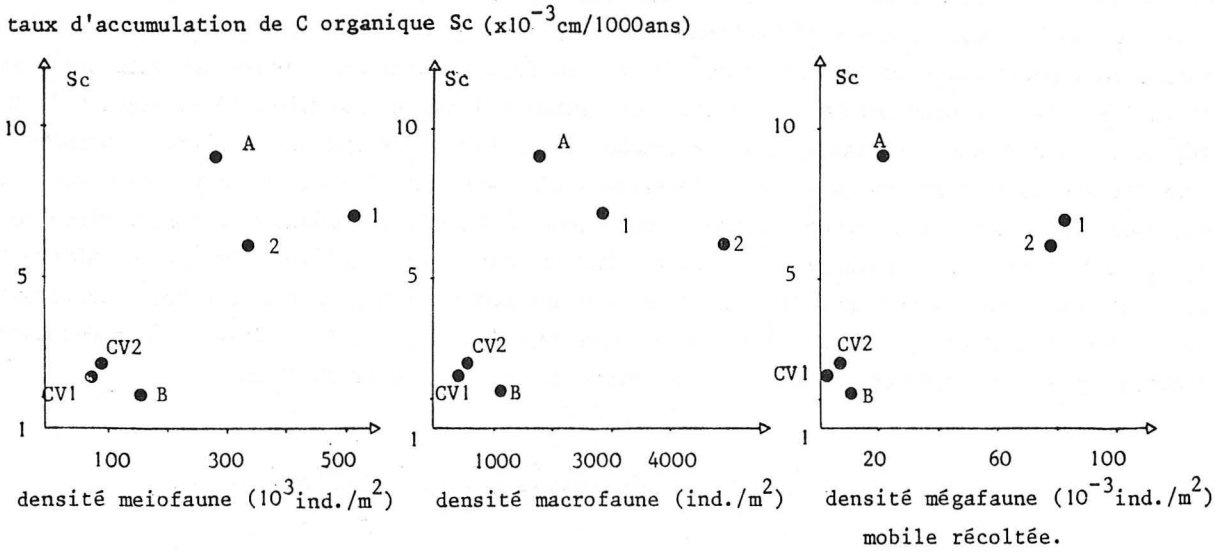


Fig. 52 - Diagramme des densités de la meïofaune, de la macrofaune et de la mégafaune - taux d'accumulation de C organique Sc.

- *faune - traces (à la surface des sédiments)*. L'abondance corrigée des traces (après correction liée à la conservation) est, en effet, dépendante de la densité de la faune (fig. 50). Dans les secteurs où la faune est fouisseuse, l'ensemble des traces est dominé par des traces à relief. En revanche, les secteurs oligotrophes sont caractérisés par une faune essentiellement rampante et une plus grande richesse en traces superficielles.

Certains secteurs oligotrophes, comme le Plateau abyssal du Cap Vert, présentent une abondance relative de traces, compte tenu des faibles densités faunistiques obtenues. Cette abondance est expliquée par le déplacement lié à la recherche de nourriture des organismes vivant dans de telles régions, selon Kitchell *et al.* (1978 b). Cette hypothèse ne tient pas compte de la dépense énergétique que suppose un tel comportement, et mérite, toutefois, de plus amples confirmations.

Par ailleurs, les secteurs profonds se distinguent par un grand nombre de catégories de traces observées. Cette caractéristique doit pouvoir être reliée à la spéciation zoologique relati-

vement développée dans les grands fonds, déjà reconnue chez les échinodermes (Sibuet, 1977).

La durée de vie d'une trace peut dépendre de l'activité animale et des paramètres de l'environnement. Les traces superficielles les plus fragiles sont conservées quelques centaines d'années, dans les secteurs où l'activité animale et les courants de fond engendrent un remaniement sédimentaire en profondeur. Les mêmes traces, dans un secteur dont l'interface eau-sédiment est peu perturbé, peuvent rester quelques milliers d'années avant d'être recouvertes sous l'effet de la sédimentation.

- *taux d'accumulation de C organique - mélange (des sédiments superficiels)*. Le mélange des sédiments est observé à partir de la distribution de l'activité du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans les sédiments superficiels. La limite inférieure de la couche mélangée (L) est ainsi déterminée. Cette couche est peu profonde dans les plaines abyssales, secteurs oligotrophes, où elle n'excède pas les deux premiers centimètres (fig. 53). En revanche, dans les secteurs considérés comme riches en apports trophiques (cône de déjection d'un fleuve : station A, marge continentale : stations 1 et 2), la couche mélangée peut atteindre jusqu'à 10 cm de profondeur. A la station 2, où le régime hydrodynamique est remarquable, la couche mélangée observée sur deux carottes distinctes, a deux épaisseurs différentes (6-10 cm). Une telle différence peut être expliquée par des variations des courants de fond, mais actuellement, il est encore difficile de préciser la contribution des courants de fond dans le mélange sédimentaire. Par ailleurs, les données de mélange des sédiments sont obtenues à partir des analyses effectuées sur une seule carotte pour chacun des sites étudiés (excepté à la station 2). Ces données pourraient être rediscutées et (peut-être) confirmées après l'obtention et le traitement de nouveaux prélèvements dans ces mêmes stations.

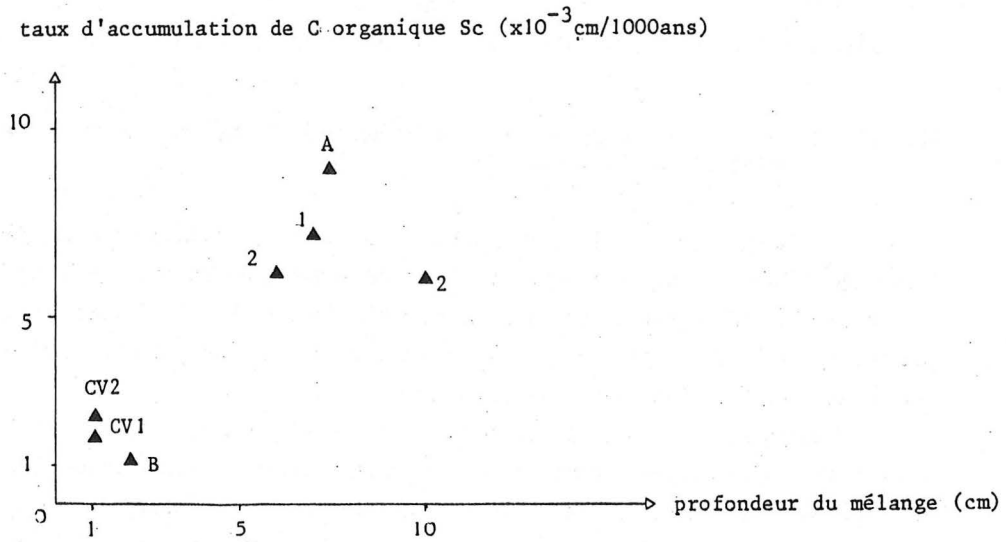


Fig. 53 - Diagramme de la profondeur du mélange - taux d'accumulation de C organique (station 2 : deux carottes ont été analysées).

Le coefficient de mélange D_B est calculé pour les secteurs où un remaniement sédimentaire est constaté en profondeur dans les sédiments, c'est-à-dire sur la Marge du Golfe de Gascogne (stations 1 et 2) et au pied du Cône de l'Amazone (station A) (fig. 54).

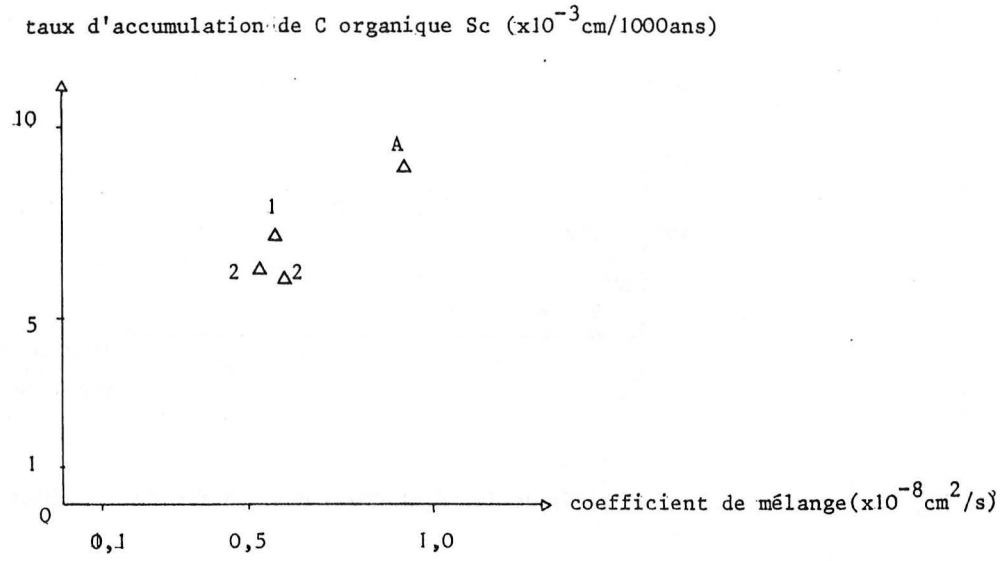


Fig. 54 - Diagramme des coefficients de mélange D_B - taux d'accumulation de C organique Sc.

Les coefficients D_B (0,53 à 0,60 x 10^{-8} cm^2/s) obtenus aux stations 1 et 2 sont comparables aux valeurs observées à l'aide des mêmes méthodes d'analyses par Nozaki *et al.* (1978) près de la ride médioatlantique, et par De Master (1979) dans le domaine abyssal de l'Océan Antarctique.

Le pied du Cône de l'Amazone se distingue par un coefficient D_B plus élevé : 0,94 x $10^{-8}cm^2/s$. Ce secteur est également caractérisé par un taux Sc plus élevé. Il apparaît donc une relation directe entre le coefficient de mélange D_B et le taux Sc. L'importance des apports trophiques conditionnent non seulement l'abondance de la faune, mais aussi l'intensité du remaniement sédimentaire.

- *faune - coefficient de bioturbation enregistrée B.* L'examen des terriers sous la couche mélangée a permis d'étudier l'enregistrement de la bioturbation, occasionnée par la mégafaune, au cours des derniers milliers d'années (durant l'Holocène). Cette étude a pour but de rechercher les relations entre l'intensité de la bioturbation enregistrée et l'abondance de la faune au cours d'une période où les paramètres de l'environnement sont restés *a priori* stables. Cependant, il n'a pas été possible de réaliser des analyses quantitatives précises. Les exemples observés suggèrent, toutefois, une corrélation avec la densité faunistique actuelle (fig. 55).

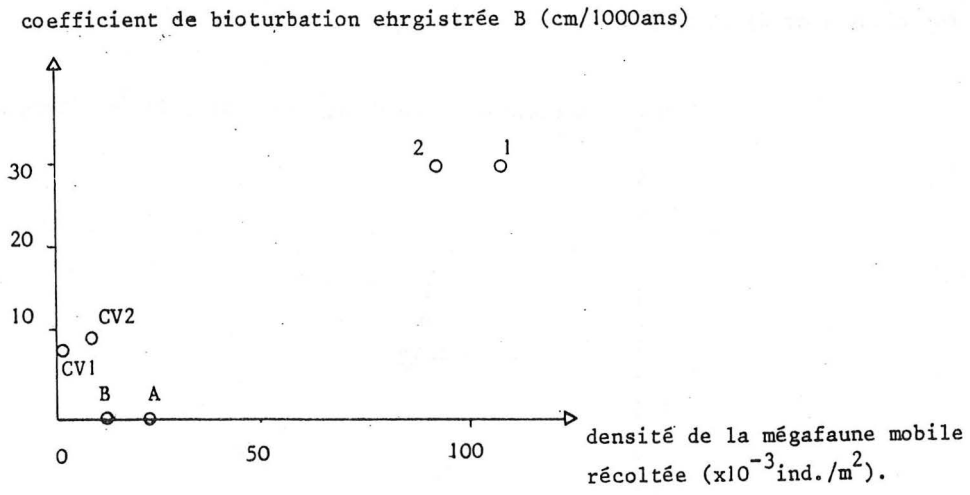


Fig. 55 - Diagramme des densités de la mégafaune - des coefficients de bioturbation enregistrée B.

Sur la Marge du Golfe de Gascogne (stations 1 et 2), la faune est abondante, et le coefficient B élevé. En revanche, dans le Bassin du Cap Vert (stations CV1 et CV2), la faune est pauvre et le coefficient B faible. Cependant, cette corrélation n'apparaît pas dans les secteurs étudiés du Bassin de Demérara (stations A et B). Cette anomalie peut être expliquée par une différence notable dans la nature des sédiments, et donc dans les phénomènes de conservation des terriers dans les couches sédimentaires. En effet, les sédiments, datés Holocène, des deux premiers bassins sont riches (60 % en moyenne, environ) en carbonates de calcium, alors que ceux du Bassin de Demérara contiennent seulement quelques pour cents de carbonates de calcium. En tenant compte de cette explication, il existe donc une relation entre l'abondance de la faune et l'intensité de la bioturbation au cours de l'Holocène, enregistrée dans les sédiments du même âge.

Les analyses successives des relations entre les facteurs de l'environnement et la bioturbation ont montré de bonnes corrélations entre les différents paramètres du milieu et les trois aspects étudiés de la bioturbation. De plus, les apports trophiques sont apparus comme étant le facteur jouant le rôle le plus important sur l'intensité de la bioturbation.

III - IMPORTANCE DE LA BIOTURBATION (CONCLUSION GENERALE)

A l'issue de cette étude, deux types de secteurs profonds sont distingués. Le premier type est caractérisé par des apports trophiques importants, liés à des influences continentales, par une abondance de la faune, dominée par des organismes fouisseurs, par une prédominance de traces à relief

à la surface des sédiments, par un remaniement sédimentaire profond. Dans ce premier type de secteurs le temps de conservation des traces superficielles n'excède pas les 350 ans.

Le deuxième type de secteurs étudiés présente une sédimentation principalement pélagique, des apports trophiques faibles, une faune pauvre, caractérisée par de nombreux organismes rampants, une certaine abondance de traces superficielles, un remaniement sédimentaire faible et très superficiel. Dans ces secteurs, les conditions de conservation des traces sont favorables et expliquent la grande richesse en traces observées. Les temps de conservation des traces sont dix fois plus longs que précédemment et sont de l'ordre du millier d'années.

A partir de ces résultats, un schéma de relations entre les facteurs de l'environnement et la bioturbation est présenté. Il met en évidence le rôle prépondérant des apports trophiques sur l'intensité de la bioturbation dans le domaine abyssal.

Cette étude a bénéficié de techniques diversifiées, mises en oeuvre sur des données malheureusement ponctuelles. Toutefois, la méthode par spectrométrie gamma a été indispensable pour évaluer, avec précision, l'intensité de la bioturbation actuelle dans le temps et l'espace. Cette méthode donne une valeur de la cinétique de la bioturbation, alors que toutes les méthodes (photographie, radiographie X) fournissent une information relative à la morphologie du remaniement. Mais il faut souligner que les résultats obtenus successivement au cours de ce travail sont convergents et confirmés par l'utilisation de cette nouvelle technique.

Une telle étude, entreprise dans plusieurs bassins de l'Océan Atlantique, apporte des indications nécessaires à l'explication des phénomènes de diffusion de tout élément (naturel ou artificiel) à l'interface eau-sédiment, et dans le cadre de reconstitution de paléoenvironnement.

B I B L I O G R A P H I E

ALDRED R.G., THURSTON M.H., RICE A.L., MORLEY D.R. - 1976 - An acoustically monitored opening and closing epibenthic sledge. *Deep Sea Res.*, 23, p. 167-174.

ALLER R.C. - 1977 - The influence of macrobenthos on chemical diagenisis of marine sediments. Ph. D. thésis, Yale University, New Haven, p. 223-248.

ALLER R.C. - 1978 - Experimental studies of changes produced by deposit-feeders on pore water, sediment and overlying water chemistry. *Am. J. Sci.*, 278, p. 1185-1234.

ALLER R.C. - 1980 - Relationships of tube dwelling benthos with sediment and overlying water chemistry. *In : Marine Benthic dynamics*, n° 11. Ed. by K.R. Tenore, B.C. Coull, p. 285-308.

ALLER R.C. - 1980 - Quantifying solute distributions in the bioturbated zone of marine sediments by defining an average microenvironment. *Geochim. Cosmo. Acta*, 44, p. 1955-1965.

ALLER R.C., COCHRAN J.K. - 1976 - 234 Th/238 U desequilibrium in nearshore sediment : particle reworking and diagenetic time scales. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 29, p. 37-50.

ALLER R.C., DODGE R.E. - 1974 - Animal sediment relations in a Tropical Lagoon, Discovery Bay, Jamaïca. *Jour. Marine Res.*, 32, 2, p. 209-232.

ANONYME - 1976 - Eléments de systématique zoologique. Premier cycle, section CB et BG 2ème année. Université de Rennes. Polycopié, 45 p.

ANONYME - 1979 - Circulation Océanique (non publié), 26 p.

ARNOLD G. - 1966 - Water masses and the core methods. *In the Encyclopedia of Oceanography*. Ed. R.W. Fairbrigde, Dowden, Hutchinson, Ross, Stoudsburg, Penn., p. 970-974.

AUFFRET G.A. - 1979 - Essai de caractérisation de quelques régimes sédimentaires ayant prévalu sur la marge nord du Golfe de Gascogne depuis le début du Cénozoïque. *Bull. Soc. géol. France*, 7, t. XXI, n° 5, p. 575-584.

AUFFRET G.A., PASTOURET L., CHARDY P., KERBRAT R. - 1975a- Observations sur les fonds marins de la marge continentale et de la plaine abyssale du Golfe de Gascogne. Rapport interne, n° 444 du D.S. du COB, 1 p.

AUFFRET G.A., PASTOURET L., KERBRAT R. - 1975 b - Dynamique sédimentaire au bas de la marge continentale armoricaine : exemple de la ride Aegis. *In : IXe Congrès international de sédimentologie*, Nice, 5 p.

AUFFRET G.A., PASTOURET L. - 1977 - Sur les modalités de la sédimentation profonde actuelle dans le Golfe de Gascogne. *Bull. Soc. Géol. France*, 7, t. XIX, n° 2, p. 243-248.

AUFFRET G.A., PASTOURET L. - 1978 - Evolution sédimentaire comparée des marges armoricaines et de Blake Bahama depuis le Crétacé supérieur, d'après les résultats des Legs 48 et 44 du Glomar Challenger. *Bull. Soc. Géol. France*, t. XX, n° 4, p. 453-464.

AUFFRET G.A., PASTOURET L. - 1979 - Upper Cretaceous to quaternary sedimentary processes in the Bay of Biscay from textural, mineralogical and coarse fraction studies. *In Initial Reports of D.S.D.P.*, vol. XLVIII, Washington. Ed. by L. Montadert, D.G. Roberte, p. 791-829.

AUFFRET G.A., SICHLER B. - 1981 - Holocene sedimentary regime in two sites of the northeastern Atlantic slope. *Coll. Intern. CNRS Bordeaux*, sous presse.

AUFFRET G.A., SICHLER B., COLENO B. - 1981 - Deep-sea sediments texture and magnetic fabric, indicators of bottom currents regime. *Oceanologica Acta*, 4, p. 475-488.

AUGER P., GRMEK M.D., CAZIN M. - 1970 - Diffusion. *In:Encyclopedie internationale des Sciences et des Techniques*, vol. 4, Ed. by : Presses de la Cité, Paris, p. 427-432.

BARRACLOUGH FELL H. - 1967 - Biological applications of sea floor photography. *In Deep-Sea Photography*. Ed. by J.B. Herse, The Johns Hopkins press, Baltimore, p. 207-221.

BASAN P.B. - 1979 - Trace fossil nomenclature : the developing picture. *In : Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 28, p. 143-167.

BAXTER M.S., CRAWFORD R.W., SWAN D.S., FARMER J.G. - 1981 - 210 Pb dating of a Loch Lomond sediment core by conventional and particle track methods and some geochemical observations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, p. 434-444.

BENNINGER L.K., ALLER R.C., COCHRAN J.K., TUREKIAN K.K. - 1979 - Effects of biological sediment mixing on the 210 Pb chronology and trace metal distribution in a Long Island sound sediment core. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 43, p. 241-259.

BENNINGER L.K., KRISHNASWAMI S. - 1981 - Sedimentary processes in the inner New York Bight : evidence from excess 210 Pb and 239, 240 Pu. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, p. 158-174.

BERGER W.H. - 1977 - Deep-sea carbonate and the deglaciation preservation spike in the pteropods and foraminifera. *Nature*, 269, p. 301-304.

BERGER W.H., EKDALE A.A., BRYANT P.P. - 1979 - Selective preservation of burrows in deep-sea carbonates. *Marine Geology*, 32, p. 205-230.

BERGER W.H., HEATH G.R. - 1968 - Vertical mixing in pelagic sediments. *J. Mar. Res.*, 26, p. 134-143.

BERGER W.H., JOHNSON R.F. - 1978 - On the thickness and the "C. age" of the mixed layer in deep-sea carbonates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 41, p. 223-227.

BERGER W.H., JOHNSON T.C. - 1976 - Deep-Sea Carbonates : dissolution and mass wasting on Ontong Java Plateau. *Science*, 192, p. 785-787.

BERGER W.H., JOHNSON R.F., KILLINGLEY J.S. - 1977 - "Unmixing" of the deep-sea record and the deglacia-meltwater spike. *Nature*, 269, p. 661-663, 20 oct. 1977.

BERGER W.H., KILLINGLEY J.S. - 1977 - Glacial Holocene transition in deep sea carbonates : selective dissolution and the stable isotope signal. *Science*, 197, p. 563-566.

BERGER W.H., von RAD U. - 1972 - Cretaceous and Cenozoic sediments from the Atlantic Ocean. *In : Initial Reports of Deep Sea Drilling Project*, vol. XIV, ed. by : De Hayes, A.C. Pimms et *al.*, p. 787-953.

BLANC F., CHARDY P., LAUREC A., REYS J.P. - 1976 - Choix des métriques qualitatives en analyse d'inertie. Implications en écologie benthique *Marine Biology*, 35, 1, p. 49-68.

BOEGEMAN D.E., MILLER G.J., NORMARK W.R. - 1972 - Precise positioning for near-bottom equipment using a relay transpondeur. *Marine Geophysical Res.*, 1, p. 381-396.

BOESCH D.F., KRAEUTER - 1980 - Relationships between sediments and benthos in topographically complex outer continental shelf environment. *26e C.G.I.*, Paris, p. 438.

BOHNSACK J.A. - 1979 - Photographic quantitative sampling of hard-bottom benthic communities. *Bull. Mar. Science*, 29-2, p. 242-252.

BOTHNER M.H., SPIKER E.C., JOHNSON P.P., RENDIGS R.R., ARUSCAVAGE P.J. - 1981 - Geochemical evidence for modern sediment accumulation on the continental shelf off New England. *J. Sedim. Petrol.* 51-1, p. 281-292.

BOTHNER M.H., JOHNSON P.P., SPIKER E.C. - 1980 - 210 Pb in sediment cores from the Atlantic continental shelf : estimates of rates of sediment mixing. *26e C.G.I.*, Paris, p. 440.

BOURNE D.W., HEEZEN B.C. - 1965 - A wandering enteropneust from the abyssal Pacific and the distribution of "Spiral" tracks on the sea floor. *Science*, 150, p. 60-63.

BRULAND K.W., KOIDE M., GOLDBERG E.D. - 1974 - The comparative marine geochemistries of Lead-210 and Radium-226. *Jour. Geophys. Res.*, 79, 21, p. 3083-3086.

CACCHIONE D.A., ROWE G.T., MALAHOFF A. - 1978 - Submersible investigation of outer Hudson Submarine Canyon. In *: Sedimentation in Submarine Canyons, fans and trenches*. Ed. D.J. Stanley and G. Kelling, Dowden, Hutchinson, Stroudsburg , Penn., p. 42-50.

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS - 1972 - Bathyscaphe "Archimède" : campagne 1966 à Madère, campagne 1969 aux Açores. Rapport interne CNEXO, n° 3, 125 p.

CHAMBERLAIN C.K. - 1971 - Morphology and ethology of trace fossils from the Ouchita mountains, Southeast Oklahoma. *J. Paleontol.*, 45, n° 2, p. 212-246.

CHAMBERLAIN C.K. - 1973 - A manual for recognizing trace fossils in deep-sea cores. Manuel distribué pour l'utilisation du D.S.D.P., décembre 1973, non publié.

CHAMBERLAIN C.K. - 1975 - Trace fossils in D.S.D.P. cores of the Pacific. *J. Paleont.*, 49, p. 1074-1096.

CHARDY P., GUENNEGAN Y., BRANNELEC J. - 1980 - Photographie sous-marine et analyse des peuplements benthiques (essais en rade de Brest). Rapports scientifiques et techniques, CNEXO, n° 41, 32 p.

CLARKE R.H. - 1968 - Burrow frequency in abyssal sediments. *Deep Sea Res.*, 15, p. 397-400.

COCHRAN J.K., ALLER R.C. - 1979 - Particle reworking in sediments from the New York Bight apex : evidence from 234 Th/238 U disequilibrium. *Estuar. Coast. Marine Sci.*, 9, p. 739-747.

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE -1980 - Les radio éléments et leurs utilisations. Ed. by Eyrolles, Paris, 97 p.

CRAIG H., KRISHNASWAMI S., SOMAYAJULU B.L.K. - 1973 - 210 Pb - 226 Ra : radioactive disequilibrium in the deep sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 17, p. 295-305.

CRIMES T.P. - 1974 - Colonisation of the early ocean floor. *Nature*, 248, p. 328-330.

DAMUTH J.E. - 1977 - Late quaternary sedimentation in the western equatorial Atlantic. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88, 5, p. 695-710.

DAMUTH J.E., KUMAR N. - 1975 - Amazon Cone : morphology, sediment age, and growth patterns. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, p. 863-878.

DANGEARD L. - 1967 - Observations faites en "Soucoupe plongeante" dans le Canyon de Planier au large de Marseille. *Bull. Soc. linn. de Normandie*, série 10, vol. 8, p. 227-230.

DANGEARD L. - 1974 - Traces organiques profondes comparables à celles du flysch. *Sciences de la Terre*, Nancy, t. XIX, n° 4, p. 381-388.

DANGEARD L., DENIAUX B., LE NOTRE N. - 1978 - Apports de la photographie sous-marine à l'étude de l'interface eau-sédiment. *Oceania*, vol. 4, fasc. 6, p. 613-623.

DANGEARD L., GIRESSE P. - 1968 - Enseignements géologiques des photographies sous-marines. *Bull. du B.R.G.M.*, 2ème série, section IV, n° 2, 85 p.

DANGEARD L., GIRESSE P., JAHN W., JOHNSON G.L. - 1972 - Océanographie : enseignements de la photographie sous-marine : mission du Kane dans l'Atlantique Nord (1968). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 274, p. 2153-2154.

DANGEARD L., RIOULT M. - 1961 - Observations sur les traces d'organismes fouisseurs dans les minerais de fer ordoviciens de la Basse Normandie. *C. R. Acad. Sc. Paris*, p. 2271-2273.

DANGEARD L., RIOULT M. - 1968 - Sur quelques apports récents de l'océanographie à la géologie. *Rev. de Géog. phys. et de Géol. dynam.*, vol. X, fasc. 4, p. 311-327.

DAYAL R., OKUBO A., DUEDALL I.W., RAMAMOORTHY A. - 1979 - Radionuclide redistribution mechanisms at the 2800 m Atlantic nuclear waste disposal site. *Deep Sea Res.*, 26 A, p. 1329-1345.

DEMASTER D.J. - 1978 - 210 Pb, 32 Si and 14 C chronologies in a varved Gulf of California sediment core. *E.O.S., Trans. Am. Geophysical Union*, 59, 12, p. 1118.

DEMASTER D.J. - 1979 - Rates of particle mixing in deep-sea sediments using 210 Pb and 32 Si measurements. *The marine budjets of Silica and 32 Si* (Thesis) Yale University, New Haven, p. 70-104.

DEMASTER D.J., COCHRAN J.K. - 1977 - Rates of particles mixing in deep-sea sediments using Pb 210 measurements. *E.O.S., Trans. Am. Geophysical Union*, 58, 12, p. 1154.

DESBRUYERES D., BERVAS J.Y., KHRIPOUNOFF A. - 1980 - Un cas de colonisation rapide d'un sédiment profond. *Oceanologica Acta*, 3, n° 3, p. 285-292.

DINET A., VIVIER M.H. - 1977 - Le meïobenthos abyssal du Golfe de Gascogne. *Cahiers de biologie marine*, XVIII, p. 85-87.

DUIVENSTIJN A., VENDERLOO L. - 1965 - Spectrométrie gamma en pratique. Ed. Bibliothèque technique Philips, Paris, 158 p.

DUPLESSY J.C. - 1979 - L'étude quantitative des climats anciens. *La Météorologie*, VIe série, n° 16, p. 17-34.

EDGERTON H.E. - 1963 - Underwater photography. *The Sea*, vol. 3, ed. by M.N. Hill. *Interscience Publischer*, New York, p. 473-479.

EDGERTON H.E. - 1967 - The instruments of Deep sea photography. *Deep Sea Photography*, ed. by J.B. Hersey The Johns Hopkins Press, Baltimore, p. 47-54.

EKDALE A.A. - 1977 - Abyssal trace fossils in world wide. Deep Sea Drilling Project cores. *In Trace Fossils 2*, ed. by T.P. Crimes et J.C. Harper, Seel House press, Seel st., Liverpool, p. 163-182.

EKDALE A.A. - 1978 - Trace Fossils in Leg 42 A cores. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, vol. 42. Ed. by : K. Hsü, L. Montadert et *al.*, p. 821-827.

EKDALE A.A. - 1980 - Graptoglyptic burrows in modern deep-sea sediments. *Science*, 207, p. 301-306.

EKDALE A.A., BERGER W.H. - 1978 - Deep Sea Ichnofacies : modern organism-traces on and in pelagic carbonates of the western equatorial Pacific. *Paleogeography, Paleoclimat. Paleoecol.*, 23, p. 263-278.

EMBLEY R.W., JACOBI R.D. - 1977 - Distribution and morphology of large submarine sediments slide on Atlantic continental margins. *Marine Geotechnology*, 2, p. 205-228.

EMERSON S., BENDER M. - 1981 - Carbon fluxes at the sediment-water interface of the deep sea : calcium carbonate preservation. *J. Marine Res.*, 39, p. 139-162.

ERLENKEUSER H. - 1980 - 14 C and vertical mixing of deep sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47, p. 319-326.

EWING M., DAVIS R.A. - 1967 - Lebenspuren photographed on the ocean floor. *Deep Sea Photography*, ed. by J.B. Hersey. The Johns Hopkins, presse, Baltimore, p. 259-294.

FAGER E.W. - 1972 - Diversity : A sampling study. *The American Naturalist*, 106, p. 293-310.

FARROW G.E. - 1975 - Techniques for the study of fossil and recent traces. *The study of trace fossils* Ed. by R.W. Frey, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 537-554.

FREY R.W. - 1973 - Concepts in the study of biogenic sedimentary structures. *J. Sed. Petro.*, 43, 1, p. 6-19.

FREY R.W., HOWARD J.D. - 1981 - Conichnus and Schaub cylindrichnus redefined traces fossils from the Upper Cretaceous of the Western Interior. *J. Paleontology*, 55, 4, p. 800-804.

FREY R.W., SEILACHER A. - 1980 - Uniformity in marine invertebrate ichnology. *Lethaia*, 13, 3, p. 183-207.

GIBBS R.J. - 1973 - The bottom sediments of the Amazon shelf and tropical Atlantic Ocean. *Marine Geol.* 14, 5, p. 39-45.

GIRESSE P., FILY G., DANGEARD L. - 1969 - Commentaires de photographies sous-marines prises sur la marge continentale du Golfe de Gascogne. *Bull. Inst. Geol. Bassin Aquitaine*, n° 6, p. 53-70.

GLASS B.P. - 1969 - Reworking of deep sea sediments as indicated by the vertical dispersion of the australian and Ivory coast microtektite horizons. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 6, p. 409-415.

GOLDBERG E.D., KOIDE M. - 1962 - Geochronological studies of deep-sea sediments by Ionium/Thorium method. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 26, p. 417-450.

GOREAU T.J. - 1977 - Quantitative effects of sediment mixing on stratigraphy and biochemistry : a signal theory approach. *Nature*, 265, p. 525-526.

GOULD W.J., MAC KEE W.D. - 1973 - Vertical structure of semi-diurnal tidal currents in the Bay of Biscay. *Nature*, 244, p. 88-91.

GRAY J.S. - 1974 - Animal sediment relationships. *Oceano. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 12, p. 223-261.

GRIGGS G.B., CAREY A.G., KULM L.D. - 1969 - Deep sea sedimentation and sediment fauna interaction in Cascadia channel and on Cascadia abyssal plain. *Deep Sea Res.*, 16, p. 157-170.

GROUSSET F. - 1977 - Etude géologique du Quaternaire terminal de la zone Meriadzek-Trevelyan (Golfe de Gascogne). *Bull. Inst. Geol. Bassin Aquitaine*, 22, p. 75-122.

GUENNEGAN Y., RANNOU M. - 1977 - Semi-Diurnal rhythmic activity in Deep Sea benthic fishes in the Bay of Biscay. *Actes du Congrès de biologie abyssale*, Kristineberg, Suède, aout 1977.

UNIVERSITÉ DE LA MER LABORATOIRE DE GÉOLOGIE

GUINASSO N.L. - 1976 - Diffusion models of biological mixing in abyssal sediments as linear filters. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 57, p. 150-151.

GUINASSO N.L., SCHINK D.R. - 1975 - Quantitative estimates of biological mixing rates in abyssal sediments. *J. Geophys. Res.* 21, p. 302-304.

HANTZSCHEL W. - 1962 - Trace fossils and problematica. *In Treatrise on invertebrate paleontology*, W. Miscellinea, p. 177-245.

HANTZCHEL W., FREY R.W. - 1978 - Bioturbation. *The Encyclopedia of sedimentology*, Ed. by R.W. Fairbrigde, J. Bourgeois, Dowden Hutchinson et Ross, Stroudsburg, Penn., p. 68-71.

HANTZSCHEL W., KRAUS O. - 1972 - Names based on trace fossils (ichnotaxa) : request for a recommendation Z.N(S) 1973. *Bull. Zool. Nomen.*, 29, 3, p. 137-141.

HAYES D.E., DAMUTH J.E. - 1980 - Evaluation of the North Pacific subseabed for disposal of high-level nuclear waste : Geological site selection criteria and regional assessment. *EOS, Trans. Am. Geophy. union*, 61, 46, p. 988.

HAYES D.E., PIMMS A.C. et *al.* - 1972 - Site 138 (D.S.D.P.). *Initial Reports of Deep Sea Drilling Project*, XIV, ed. by D.E. Hayes, A.C. Pimms et al., p. 135-155.

HAYES D.E., PIMMS A.C. et *al.* - 1972 - Site 141. Leg 14. *Initial Reports of the DSDP*, vol. XIV, ed. by D.E. Hayes, A.C. Pimms et al., p. 217-247.

HEATH G.R., MOORE T.C., DAUPHIN J.P. - 1977 - Organic carbon in deep sea sediments. In : The fate of fuel fossils CO_2 in the Oceans : *Marine Science* 6. Ed. N.R. Andersen, A. Malahoff, Plenum New York, p. 605-625.

HEEZEN B.C., HOLLISTER C.D. - 1971 - The face of the deep. Ed. New York Oxford University press, London Toronto, 659 p.

HERSEY J.B. - 1967 - The manipulation of deep sea cameras. *Deep Sea Photography*. Ed. by Hersey. The Johns Hopkins Press, Baltimore, p. 55-67, 14 fig.

HESSLER R.R., JUMARS P.A. - 1974 - Abyssal community analysis from replicate box cores in the North Pacific. *Deep Sea Res.*, 21, p. 185-209.

HOLLISTER C.D., HEEZEN B.C., NAFE K.E. - 1975 - Animal traces on the Deep Sea floor. *The study of trace fossils*. Ed. by R.W. Frey, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 493-510.

HOWARD J.D. - 1975 - The sedimentological significance of trace fossils. *The study of trace fossils*. Ed. by R.W. Frey, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 131-146.

HURLBERT S.H. - 1971 - The non concept of species diversity : a critique and alternative parameters. *Ecology*, 52, p. 577-586.

HUTSON W.H. - 1979 - Benthic bioturbation and the deep sea record : numerical simulations based on "benthic mixing profiles". *EOS, Trans. Am. Geophysical Union*, 60, 46, p. 854.

HUTSON W.H. - 1980 - Bioturbation of deep sea sediments:: Oxygen isotops and stratigraphic uncertainty. *Geology*, 8, p. 127-130.

JARRY J., LEGRAND J., PERSON R. - 1979 - Etude réalisation de système remorque grande profondeur : RAIE 1, RAIE 2. Département Technologie et Développement Industriel. Rapport interne CNEXO, 80 p.

JEANSON C., DUPONT J.P. - 1980 - Structuration et fixation d'un sédiment par les vers : incidences sur les concentrations minérales. *26e C.G.I.*, Paris, p. 490.

JENKYNS H.C. - 1978 - Pelagic environments. *Sedimentary environments and facies*. Ed. by H.G. Reading, Blackwell Scientific Publication, Oxford, p. 314-371.

JONES G.A., RUDDIMAN W.F. - 1979 - Use of highly precise calcium carbonate measurements to test the intensity of mixing in the Deep Sea sediments. *EOS, Trans. Am. Geophysical Union*, 60, 18, p. 290.

JUMARS P.A. - 1977 - Sediment flux and animal foraging patterns. *EOS, Trans. Am. Geophysical Union*, 58, n° 12, p. 1161.

JUMARS P.A., NOWELL A.R.M., SELF R.F.L. - 1980 - A markov model of flow sediment organism interaction : model formulation and sensitivity analysis. *26e C.G.I.*, Paris, p. 491.

KITCHELL J.A. - 1979 - Deep-sea foraging pathways : an analysis of randomness and resource exploitation. *Paleobiology* 5, 2, p. 107-125.

KITCHELL J.A., KITCHELL J.F., CLARK D.L. - 1978a- Deep-sea foraging behavior : its bathymetric potential in the fossil record. *Science*, vol. 200, p. 1289-1291.

KITCHELL J.A., KITCHELL J.F., JOHNSON G.L., HUNKINS K.L. - 1978 b - Abyssal traces and megafauna comparison of productivity, diversity and density in the Arctic and Antarctic. *Paleobiology*, 4, 2, p. 171-180.

KITCHELL J.A., CLARK D.L. - 1979 - A multivariate approach to biofacies analysis of deep-sea traces from the central Arctic. *J. Paleontology*, 53, 5, p. 1045-1067.

KHRIPOUNOFF A.S. - 1979 - Relations trophiques dans l'écosystème benthique abyssal Atlantique : description et bilan énergétique. Thèse. Université de Paris VI, 132 p.

KOIDE M., SOUTAR A., GOLDBERG E.D. - 1972 - Marine geochronology with 210 Pb. *Earth Planet. Sci. Lett.* 14, p. 442-446.

KU T.L. - 1976 - The uranium-series methods of age determination. *Annual Review Earth Planet. Sci. Lett.* 4, p. 347-379.

KU T.L., BROECKER W.P. - 1969 - Radiochemical studies on manganese nodules of deep-sea origin. *Deep-Sea Res.*, 16, p. 625-637.

KUENEN P.H. - 1964 - The pelagic abyssal environment. *Marine Geology*. Ed. by J. Wiley, Inc. New York, p. 319-320.

KUENEN P.H. - 1964 - Rate of sedimentation. *Marine Geology*. Ed. by : J. Wiley Inc., New York, p. 376-385.

KUKAL Z. - 1971 - Changes in sedimentation in the Sub-Recent and their causes. *Geology of recent sediments*. Ed. by Academic Press, London, New York, p. 376-388.

LAFOND E.C. - 1967 - Movements of benthonic organisms and bottom currents as measured from the Bathyscaph Trieste. *Deep-Sea photography*. Ed. by J.B. Hersey, The Johns Hopkins press, Baltimore, p. 295-301.

LAUBIER L., SIBUET M. - 1977 - Campagnes Biogas. Rapport interne du CNEXO, résultats de campagnes à la mer, n° 11, 57 p.

LAUBIER L., SIBUET M. - 1977 - Ecology of the benthic communities of the deep northeast Atlantic. *Actes du Symposium 1977*, Stockolm, Deep Sea Ecology and Exploitation, p. 17.

LE NOTRE N. - 1976 - Etudes des marques de courant par photographie sous-marine. Thèse 3e Cycle, Université de Bordeaux I, 96 p.

LE PICHON X., AUZENDE J.M., PAUTOT G., MONTI S., FRANCHETEAU J. - 1971 - Deep-Sea photographs of an active seismic fault zone near Gibraltar Straits. *Nature*, 230, p. 110-111.

LEMCHE H., HANSEN B., MADSEN F.J., TENDAL O.S., WOLFF T. - 1976 - Hadal life as analyzed from photographs. *Vidensk. Meddr. dansk. naturh. Foren.*, 139, p. 263-336.

LESSERTISSEUR J. - 1955 - Traces fossiles d'activité animale et leur signification paléobiologique. *Mém. S.G.F.*, XXXIV, 4, n° 74, p. 1-150.

LE SUAVE R. - 1980 - Rapport du contrat CEA. TMC II/14 265, fasc. 1, géologie, 135 p. (rapport interne).

LIZITZIN A.P. - 1972 - Conditions of ocean sedimentation. *Sedimentation in world ocean. Soc. Economic Paleontologist. et Mineralogist.* Special public., n° 17, p. 35-46.

LIZITZIN A.P. - 1972 - Quantitative distribution of sedimentary material over the ocean bottom. *Sedimentation in world ocean. Soc. Economic. Paleontol. et Mineral.*, special publi., n° 17, p. 67-84.

MARTINSSON A. - 1970 - Toponomy of trace fossils. *Trace Fossils*. T.P. Crimes and J.C. Harper, ed. Seel House Press, Liverpool, p. 323-329.

MAUVIEL A. - 1979 - Observations sur les figures sédimentaires liées à l'activité organique en milieu pofond. D.E.A., Université de Bretagne Occidentale, 72p.

MENZIES R.J., GEORGE R.Y., ROWE G.T. - 1973 - Defining faunal zones. *Abyssal environment and Ecology of the world Oceans*. Ed. by J. Wiley, New York, London, Sydney, Toronto, p. 72-78.

MENZIES R.J., GEORGE R.Y., ROWE G.T. - 1973 - North Atlantic : the northeastern Atlantic : Bay of Biscay. *Abyssal environment and Ecology of the World Oceans*. Ed. by J. Wiley, New York, London, Sydney, Toronto, p. 128-131.

MOYES J., GAYET J., POUTIERS J., PUJOL C., PUJOS-LAMY A. - 1978 - Géochimie organique des sédiments marins profonds : Orgon II (octobre 1975). Etude stratigraphique et sédimentologique. Ed. A. Combaz, R. Polet. CNRS, p. 106-156.

MULLER P.J., SUESS E. - 1979 - Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans. I. Organic carbon preservation. *Deep Sea Res.*, 26 A, p. 1347-1362.

MUNSELL SOIL COLOR CHARTS EDITION -1954 - Munsell color company Inc., Baltimore 21218 U.S.A.

NGUYEN H.V. - 1973 - Contribution à l'étude du déséquilibre de la famille de l'uranium dans les eaux naturelles et les carbonates. Applications à la géochimie et à la géologie du Quaternaire. Thèse d'Etat, Université de Paris, 167 p.

NICHOLLS G.D. - 1967 - Trace elements in sediments : an assessment of their possible utility as depth indicators. *Marine Geology*, 5, p. 539-555.

NICHOLLS J.A., ROWE G.T., CLIFFORD G.H., YOUNG R.A. - 1978 - In situ experiments on the burial of submarine invertebrates. *J. Sed. Petrol.*, 48-2, p. 419-426.

NITTROUER C.A., SMETHIE W.M., SELF R.L.F., STERNBERG A.W., JUMARS P.A. - 1978 - Observations of sediment mixing on the Washington shelf. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 59, 12, p. 1109.

NITTROUER C.A., STERNBERG R.W., CARPENTER R., BENETT J.T. - 1979 - The use of Pb 210 geochronology as a sedimentological tool : applications to the Washington continental shelf. *Marine Geology*, 31, p. 297-316.

NOSHKIN V.E., BOWEN V.T. - 1973 - Concentrations and distributions of long lived fall-out radionuclides in open ocean sediments. *Radioactive contamination of the marine environment*. Ed. by : International Atomic Energy Agency. Vienna, p. 671-686.

NOZAKI Y., COCHRAN J.K., TUREKIAN K.K., KELLER G. - 1977 - Radiocarbon and 210 Pb distribution in submersible-taken deep-sea cores from project FAMOUS. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 34, p. 167-173.

OSMOND J.K., POLLARD L.D. - 1967 - Sedimentation rate determination in deep-sea cores by gamma-ray spectrometry. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 3, p. 476-480.

OWEN D.M., EMERY K.O. - 1967 - Current warkings on the continental slope. *Deep-Sea Photography*. Ed. John Hopkins Oceanographic studies, 3, p. 167-172.

OWEN D.M., SANDERS H.L., HESSLER R.R. - 1967 - Bottom photography as a tool for estimating benthic populations. *Deep Sea Photography*. Ed. by : J. Hopkins Oceanographic studies, 3, p. 229-234.

PAGNEY P. - 1972 - Climat. *La Grande Encyclopédie*. Ed. by : Larousse. Paris, vol. 5, p. 2982-2990.

PATIL G.P., TAILLIE C. - 1978 - Diversity as a concept and its measurements. An over view. *IInd International ecological congress*, Parma, 16-17 aout, p. 102.

PAUL A.Z. - 1977 - The effect of benthic biological processes on the CO_2 Carbonate system. *The Fate of Fossil Fuel CO_2 in the Oceans. Marine Science 6*. Ed. by : N.R. Andersen, A. Malahoff, Plenum Press, New York, London, p. 345-354.

PEET R.K. - 1974 - The measurement of species diversity. *Annual Rev. Ecology System*, 5, p. 285-307.

PENG T.H., BROECKER W.S., KIPPHUT G., SHACKLETON N. - 1977 - Benthic mixing in deep-sea cores as determined by 14 C dating and its implications regarding climate stratigraphy and the fate of fossil fuel CO_2. *The Fate of Fossil fuel CO_2 in the Oceans. Marine Science 6*. Ed. by : N.R. Andersen, A. Malahoff, Plenum, New York, p. 355-373.

PENG T.H., BROECKER W.S., BERGER W.H. - 1979 - Rates of benthic mixing in Deep Sea sediments as determined by radioactive tracers. *Quaternary Res.*, 11, p. 141-149.

PETERSON M.N.A. et *al.* - 1970 - Site 12 (DSDP). *Initial Reports of Deep Sea Drilling project*. Vol. II. Ed. by : M.N.A. Peterson et al., p. 249-303.

PICARD M.D., HIGH L.R. - 1973 - Tracks, trails, burrows. *Development in Sedimentology*. Ed. by : Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, Oxford, New York, p. 127-130.

PIPER D.J.W., MARSHALL N.F. - 1969 - Bioturbation of Holocene sediments on La Jolla deep sea fan, California. *Jour. Sediment. Petrol.*, 39, p. 601-606.

PIPER D.J.W., SCHRADER H.J. - 1973 - Bioturbation of sediments. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Ed. by : L.D. Kulm, R. von Hueno et al., vol. XVIII, p. 869-876.

PISIAS N.G., HEATH G.R., MOORE T.C. - 1975 - Lag times for oceanic responses to climatic change. *Nature*, 256, p. 716-717.

PUJOL C. - 1980 - Les foraminifères planctoniques de l'Atlantique Nord au Quaternaire : Ecologie - Stratigraphie, environnement. *Mém. de l'I.G.B.A.*, Thèse, 254 p.

PUJOL C. - 1981 - Planktonic foraminifera in biostratigraphy modelisation of biozonation in a Quaternary model. *Inter. Symp. Concept. Meth. Paleo.*, Barcelona, p. 209-221.

RAYMONT J.E.G. - 1980 - Carte de la distribution de la production primaire dans l'océan mondial. *Plankton and Productivity*. Ed. by : Pergamon Press, New York, Toronto, Paris, p. 404.

REX M.A. - 1973 - Deep-sea species diversity : decreased gastropod diversity in abyssal depths. *Science* 181, p. 1051-1053.

REX M.A. - 1975 - Biological accomodation in the deep-sea benthos : comparative evidence on the importance of predation and productivity. *Deep Sea Res.*, 23, p. 975-987.

REYSS J.L., YOKOYAMA Y., DUPLESSY J.C. - 1978 - A rapid determination of oceanic sedimentation rates by non destructive gamma-gamma coincidence spectrometry. *Deep Sea Res.*, 25, p. 491-498.

RHOADS D.C. - 1974 - Organism - sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanog. Mar. Biol. Ann. Rev.* 12, p. 263-300.

RHOADS D.C., YOUNG D.K. - 1970 - The influence of deposit feeding benthos on bottom sediment stability and community trophic structure. *J. Mar. Res.*, 28, p. 150-178.

RICE A.L., ALDRED R.G., BILLETT D.S.M., THURSTON M.H. - 1979 - The combined use of an epibenthic sledge and a deep-sea camera to give quantitative relevance tomacro-benthos samples. *Ambio. Special Report*, n° 6, p. 59-65.

RICE A. L., ALDRED R.G., DARLINGTON E., WILD R.A. - 1982 - The quantitative estimation of the deep-sea megabenthos: a new approach to an old problem. *Oceanologica Acta*, 5, n°1, p63-72.

RICHARD P., JURAIN G., COPPENS R. - 1968 - Le problème de l'équilibre radioactif dans les minéraux uranifères. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 266, p. 654-656.

ROBBINS J.A., KREZOSKI J.R., MOZLEY S.C. - 1977 - Radioactivity in sediments of the Great Lakes : post depositional, redistribution by deposit-feeding organisms. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 36, p. 325-333.

ROBBINS J.A., Mc GALL P.L., BERTONFISHER J., KREZOSKI J.R. - 1979 - Effect of deposit feeders on migration du Cs 137 in Lake sediments. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 42, p. 277-287.

RONA P.A., HARBISON R.N., BUSH S.A. - 1974 - Abyssal hills of the eastern central North Atlantic. *Mar. Geol.*, 16, p. 275-292.

ROTHE P. - 1973 - Sedimentation in the deep sea areas adjacent to the Canary and Cape Verde Islands. *Mar. Geol.*, 14, p. 191-206.

ROWE G.T. - 1971 - Benthic biomass and surface productivity. *Fertility of the Sea*, Ed. by : J.D. Costlow, Duke University, Marine Laboratory Beaufort, North Carolina, vol. 2, p. 441-454.

ROWE G.T. - 1974 - The effect of the benthic fauna on the physical properties of Deep Sea sediments. *Deep Sea Sediments*. Ed. by : A.L. Interbitzen, Plenum Publishing Co, New York, p. 381-400.

ROWE G.T., KELLER G., EDGERTON H., STARESINIG N., Mc ILVAINE J. - 1974 - Time Lapse photography of the biological reworking of sediments in Hudson submarine canyon. *J. Sed. Petrology*, 44, 2 p. 549-552.

ROWE G.T., STARESINIC N. - 1977 - Sources of organic matter to the deep-sea benthos. *Symposium : Deep Sea Ecol. Exploit.*, Stockolm, 16 p.

RUDDIMAN W.F., GLOVER L.K. - 1972 - Vertical mixing of ice-rafting volcanic ash in North Atlantic sediments. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, p. 2817-2836.

SANDERS H.L. - 1968 - Marine benthic diversity : a comparative study. *American Naturalist*, 102, p. 243-282.

SANDERS H.L., HESSLER R.R. - 1969 - Ecology of the deep sea benthos. *Science*, 163, p. 1419-1424.

SCHINK D.R., GUINASSO N.L. - 1977 - Modelling the influence of bioturbation and other processes on calcium carbonate dissolution at the sea floor. *The Fate of fossil fuel CO_2 in the Oceans. Marine Science 6*. Ed. by : N.R. Andersen, A. Malahoff. Plenum, New York, p. 375-399.

SCHINK D.R., GUINASSO N.L. - 1977 - Effects of bioturbation on sediment sea water interaction. *Marine Geology*, 23, p. 133-154.

SCHINK D.R., JOHNSON J.W., CARLSON T., GUINASSO N.L. - 1978 - Use of C 14 and Pu measurements in combination to estimate mixing functions for abyssal marine sediments. *EOS, Trans. Am. Geophy. Union*, 59, n° 12, p. 1117.

SEILACHER A. - 1967 - Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5, p. 413-428.

SEILACHER A. - 1953 - Studien zur Palichnologie. I. Uber die Methoder der Palichnologie. *Neues Jahrb. Geol. Paläont.*, 98, p. 87-124.

SEILACHER A. - 1964 - Biogenetic sedimentary structures. *Adventures in earth history*. Ed. by : P. Cloud W.H. Freeman and Co, San Francisco, Readings, p. 686-700.

SEILACHER A. - 1978 - Evolution of trace fossil communities in the Deep Sea. *Neues Jahr. Geol. Paläont. Abst.*, 157, 1-2, p. 251-254.

SHANNON C.E., WEAVER W. - 1963 - The mathematical theory communication. Ed. by : Univ. Illinois Press, Urbana, 117 p.

SIBUET M. - 1977 - Répartition et diversité des Echinodermes (Holothurides-Astérides) en zone profonde dans le Golfe de Gascogne. *Deep Sea Res.*, 24, p. 549-563.

SIBUET M. - 1980 - Adaptation des Echinodermes à la vie abyssale. *Echinoderms : Present and Past*. Ed. by M. Jangoux, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 233-240.

SIBUET M., DESBRUYERES D., MAUVIEL A. - 1980 - Rapport du contrat CEA TMC II/14 265. Fasc. 3, Biologie, juin 1980, 88 p., non publié.

SIMBERLOFF D. - 1978 - Use of rarefaction and related methods in Ecology. *Special technical Publication 652 of American Society for testing and materials*, p. 150-165.

SIMPSON S. - 1975 - Classification of trace fossils. *The Study of Trace Fossils*. Ed. by R.W. Frey, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 39-54.

SOKOLOVA M.N. - 1958 - Alimentation des invertébrés détritivores en milieu abyssal. *Trudy Inst. Okeanol.* 27, p. 123-153 (en russe).

SOMAYAJULU B.L.K., CRAIG H. - 1976 - Particulate and soluble 210 Pb activities in the Deep Sea. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 32, p. 268-276.

SUNDQUIST E., RICHARDSON D.K., BROECKER W.S., PENG T.H. - 1977 - Sediment mixing and carbonate dissolution in the Southeast Pacific ocean. *The fate of fossil fuel CO_2 in the oceans. Marine Science 6*. Ed. by N.R. Andersen, A. Malahoff, Plenum, New York, p. 429-454.

TAGHON G.L., JUMARS P.A., NOWELL A.R.M. - 1980 - Determinants of fecal pellet production rates. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 61, 46, p. 1017.

TAIT R.V. - 1981 - Elements of marine ecology. Ed. by Butterworthis Litho Preparation Dept., University Press, Cambridge, 356 p.

TECHNIP - 1966 - Essai de nomenclature et caractérisation des principales structures sédimentaires. Ed. by Technip, Paris, p. 137-194.

TENDAL O.S. - 1980 - Xenophyophores from the French expeditions "Incal" and "Biovema" in the Atlantic Ocean. *Cahiers de Biologie Marine*, XXI, p. 303-306.

THAYER C.W. - 1979 - Biological Bulldozers and the evolution of marine benthic communities. *Science*, 203, p. 458-461.

THIEDE T. - 1977 - Sedimentary Structures in pelagic and hemipelagic sediments from central and southern Atlantic (DSDP 39). *Initial Report of DSDP*. Ed. by P.R.Supko, K. Perch. Nielsen et al., XXXIX, p. 407-422.

THOMSON J., TUREKIAN K.K. - 1976 - 210 Po and 210 Pb distributions in ocean water profiles from the eastern south Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 32, p. 297-303.

TUREKIAN K K,COCHRAN J K,KHARKAR D P,CERRATO R M,VAISNIS J R,SANDERS H L, GRASSLE J F,ALLEN J A, 1975. Slow growth rate of a deep-sea clam determined by Ra-228 chronology. *Proc.Nat.Acad.Sci.USA*.Vol.72,n°7,p2829-2832.

TUREKIAN K.K., COCHRAN J.K., DEMASTER - 1978 - Bioturbation in Deep Sea deposits : rates and consequences. *Oceanus*, 21, 1, p. 34-41.

ULLMAN W.J., ALLER R.C. - 1980 - Dissolved iodine flux from estuarine sediments and implications for the enrichment of iodine at the sediment water interface. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 44, p. 1177-1184.

VIGNEAUX M. - 1974 - The geology and sedimentation history of the Bay of Biscay. *The Ocean basins and margins*. Vol. 2 : The North-Atlantic. Ed. by A.E.M. Nairn and F.G. Stelhi, Publishing Co, New York, p. 273-314.

VIGNEAUX M., DUMON J.C., FAUGERES J.C., GROUSSET F., JOUANNEAU J.M., LATOUCHE C., POUTIERS J., PUJOL C. 1979 - Biochimie de la matière organique à l'interface eau-sédiment marin. *Coll. intern. du CNRS*, Marseille, 25-27 avril 1979, p. 113-128.

VINOGRADOV M.E., MENSHUTKIN V.V. - 1977 - The modeling of open-sea ecosystems. *The Sea*. Ed. by J. Wiley Interscience, New York, London, Sydney, Toronto, vol. 6, p. 891-921.

VOLAT J.L., PASTOURET L., VERGNAUD-GRAZZINI C. - 1980 - Dissolution and Carbonate fluctuations in Pleistocene deep sea cores : a review. *Marine Geology*, 34, p. 1-28.

VOLJIN V., DINESCU L. - 1974 - Etude du transfert de quelques radionucleides de l'eau de la mer Noire dans les sédiments du fond de la mer Noire. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 22, 8, p. 39-41.

WAGNER G.A. - 1973 - North american microtektites from the Carribean Sea and their fission track age. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 19, p. 184-192.

WARNE J.E., KENNEDY W.J., SCHNEIDERMANN N. - 1973 - Biogenic sedimentary structures (trace fossils) in Leg 15 cores. *Initial Reports D.S.D.P.* Ed. by N.T. Edgar, J.B. Saunders et al., vol. XV, p. 813-831.

WERNER F., WETZEL A. - 1981 - Paleological interpretation of biogenic structures in North Atlantic sediments. *Colloque international C.N.R.S.*, Bordeaux, 22-25 sept. 1981, sous presse.

WETZEL A., WERNER F. - 1980-1981 - Morphology and Ecological significance of zoophycos in deep-sea sediments of N-W Africa. *Paleogeo. Paleochi. Paleoecol.*, 32, p. 185-212.

WHITEBREAD J.A., WORTHING L.V. - The flow of Antarctic bottom water into the western north Atlantic. Sous presse.

YINGST J.Y., ALLER R.C. - 1980 - Biological activity and associated sedimentary structures in Hebble area deposits. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 61, 46, p. 1014.

YOKOYAMA Y., NGUYEN H.V. - 1978 - Non-destructive radiometric studies of manganese nodules by gamma-rays spectrometry with Ge Li detector. *Coll. Intern. du CNRS* n° 289 : sur la genèse des nodules de manganèse, Gif-sur-Yvette, France, p. 317-325.

YOKOYAMA Y., NGUYEN V.H. - 1979 - Détermination des vitesses de sédimentation marine et celles de la croissance de nodules de manganèse par la spectrométrie gamma, non destructive à haute résolution. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 289, p. 229 -232.

YOKOYAMA Y., NGUYEN H.V. - 1980 - Direct and non destructive dating of marine sediments, manganese nodules and corals by high resolution gamma-ray spectrometry. *Isotope marine chemistry*. Ed. by K. Saruhashi, E.D. Goldberg, Y. Horibe, Vehida-Rokakuho Co, Tokyo, 49 p.

YOKOYAMA Y., TOBALEIM J., GBJEBINE T., LABEYRIE J. - 1968 - Détermination de la vitesse de sédimentation par une méthode non destructive de spectrométrie gamma. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 32, p. 347-352.

ANNEXE 1

UNIVERSITE DE TANGER
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE

DONNEES FAUNISTIQUES

Les données faunistiques présentées ici sont:

- les densités moyennes de la méïofaune récoltée par le carottier USNEL
- les densités moyennes de la macrofaune récoltée par le carottier USNEL
- les densités moyennes de la mégafaune récoltée par le chalut à perche
- les densités moyennes de la mégafaune observée sur les photographies

pour chacune des stations de cette étude.

Station	1	2	A	B	CV1	CV2
Meïofaune	501	388	277	134	66	75

Densités moyennes de la meïofaune (individus dont la taille est comprise 50 µm et 250 µm) récoltée par le carottier USNEL.
Ces données sont communiquées par A.DINET.
Les valeurs sont exprimées en x 10^3ind./m^2.

STATION	1	2	A	B	CV1	CV2
HEXACORALLIAIRES	1	2				5
PLATHELMINTHES			1			
NEMERTES	10	8	1	1		
NEMATODES	1536	3554	888	778	218	289
POLYCHETES	569	757	162	84	55	56
OLIGOCHETES	19	7	1	1		
SIPUNCULIENS	45	59	5	4	4	1
BRACHIOPODES		1				
APLACOPHORES	10	9	2	1	1	
GASTEROPODES	79	3	10	2	13	6
SCAPHOPODES	10	4	9	1		
BIVALVES	83	85	124	31	15	7
OSTRACODES	21	5	39	33	12	7
COPEPODES	185	177	376	150	92	63
CIRRIPEDES					1	
CUMACES	10	7	3			
TANAIDACES	70	59	52	52	7	26
ISOPODES	112	31	108	52	8	17
AMPHIPODES	22	25	4	5	1	2
HOLOTHURIDES	3	1	1			1
ASTERIDES	1					
ECHINIDES	1		1			
OPHIURIDES	5	3				
ASCIDIES	1	3		2	2	2
ENTEROPNEUSTES		2				
TOTAL	2793	4802	1793	1198	428	482

Densités moyennes de la macrofaune (individus dont la taille est comprise entre 250 µm et 1 mm) récoltée par carottier USNEL.
Ces données sont communiquées par D.DESBRUYERES et M.SIBUET.
Les valeurs sont exprimées en ind./m^2.

STATION		1	2	A	B	CV1	CV2
NEMERTES	F		0,4				
NEMATODES	F		1,7	0,9	0,4		
POLYCHETES	FR	24,4	23,4	2,2	3,4	0,3	0,6
SIPUNCULIENS	FR	5,6	1,9	0,2	0,1		
ECHIURIENS	FR		0,1				
APLACOPHORES	FR	0,4	1,3				
POLYPLACOPHORES	FR	0,1					
GASTEROPODES	FR	6,8	2,3	0,6	0,5		0,3
SCAPHOPODES	FR	1,6	2,3		0,3	1,7	
BIVALVES	FR	5,2	7,6	0,3	1,7		4,5
CEPHALOPODES	N				0,1		0,9
PYCNOGONIDES	R	0,2	0,2				
OSTRACODES	RN	0,4	4,8				
COPEPODES	FRN		0,5				
MYSIDACES	R		0,2		0,1		
CUMACES	FR	0,9	4,5	0,1	0,2		
TANAIDACES	FRN	1,2	1,7	1,0	0,2		
ISOPODES	FRN	0,1	2,6	0,1	0,2		
AMPHIPODES	RN	0,8	3,3	0,1	0,1		
MACROURES	FRN	0,8	1,4	1,1	1,1	1,5	1,1
ANAMOURES	FRN	3,2	0,8	0,1			
BRACHYOURES	FR	0,1					
HOLOTHURIDES	FRN	10,5	4,3	6,3	0,6	0,1	0,2
ASTERIDES	FR	2,6	2,1	3,3	0,4		
OPHIURIDES	FR	35,3	19,4		0,7		0,1
ECHINIDES	FR	5,7	4,6	4,3			
POISSONS	F N	0,3	0,7	1,4	0,7	0,7	0,7
TOTAL		106,9	92,1	24,2	10,5	2,6	7,5

Densités moyennes de la mégafaune (individus dont la taille est supérieure à 1 mm) récoltée par le chalut à perche.
Seule la mégafaune mobile est considérée ici.
Ces données sont communiquées par D.DESBRUYERES et M.SIBUET.
Les valeurs sont exprimées en x 10^{-3} ind./m^2.

STATIONS	1	2	A	B	CV2
POLYCHETES	+++	24,7		0,7	
SIPUNCULIENS		0,8	13,5	47,2	24,8
GASTEROPODES		0,8			
CEPHALOPODES					0,9
MACROURES			0,1		7,2
HOLOTHURIDES	42,2		8,8	1,9	3,1
ASTERIDES	5,0	4,0	0,4		
OPHIURIDES	1,8	4,0			
ECHINIDES	12,4	0,8			
ENTEROPNEUSTES		0,8	0,2	0,8	1,8
POISSONS	4,1	3,2	0,2	0,7	1,8
TOTAL	65,5	39,1	23,0	51,3	35,6

Densités de la mégafaune observée sur les photographies.
Les valeurs sont exprimées en x 10^{-3} ind./m^2.

DONNEES PHOTOGRAPHIQUES

Station	A	B	CV2	1	2
Traits photographiques étudiés	RAIE 1 RAIE 2	RAIE 3 RAIE 5	RAIE 9 RAIE 10	TR 02 TR 11 TR 13	TR 03 TR 17 TR 19
Nombre de photogra. réalisées	6300	6300	5500	2100	2100
Nombre de photogra. exploitées	522	530	516	512	326
Altitude du poisson (m)	3,5	3	2,5	-	-
Surface photographiée/ prise de vue (m^2)	15,5	x 10,9 7	3,9	+ 5 2,5	+ 5 2,5
Surface totale photographiée (m^2)	8091	4256	2218	2180	1258

x : le "poisson" est maintenu à la même altitude (3m), au cours des deux traits. mais sa configuration est différente pour ces deux traits. Pendant le trait RAIE 3, le "poisson" est oblique, d'où une surface photographiée de 10,9m^2. Pendant le trait RAIE 5, il est horizontal, la surface photographiée est plus petite: 7m^2.

+ : les surfaces que représentent les photographies des traits TR 02 et TR 03. sont de 5m^2, celles des traits TR 11, TR 13, TR 17 et TR 19 sont de 2,5 m^2, environs.

Les surfaces totales photographiées sont les surfaces de la totalité des photographies exploitées.

Tableau des caractéristiques techniques de l'étude des photographies.

Le code consiste en 3 lettres ou chiffres:

- S ou R: superficielle ou à relief
- premier chiffre: chaque type de traces dans les deux groupes: par exemple: S3: empreintes, R2: relief concave
- deuxième chiffre: chaque type de trace distribuée dans l'ordre de la classification.

Traces superficielles

S1 pistes

S11 sillon simple
S12 sillon discontinu
S13 sillon double
S14 ride simple
S15 ride en épi
S16 ride bosselée
S17 piste d'holothurie
S18 piste d'entéropneuste

S2 déjections

S21 pelote fécale

S3 empreintes

S31 rosette petite
S32 rosette grande
S33 empreinte d'astéride

Traces à relief

R1 relief convexe

R11 tumulus petit
R12 tumulus grand
R13 bourrelet

R2 relief concave

R21 terrier simple
R22 terrier à dépôt
R23 terriers circulaires
R24 sillon circulaire

R3 relief complexe

R31 souille petite
R32 souille grande
R33 souille allongée
R34 volcan
R35 cratère double
R36 tumulus crevassé
R37 terriers-volcans alignés
R38 tumulus entoure de petits terriers
R39 tumulus entouré de grands terriers
R310 tumulus et 1 terrier.

Code d'identification des traces, permettant la lecture des diagrammes.

	DENSITE RAIE 1	DENSITE RAIE 2	DENSITE STATION A
TRACES SUPERFICIELLES			
PISTES			
sillon simple	5,2	0,7	1,5
discontinu			
double			
ride simple			
en épi			
bosselée	0,7	0,6	0,6
d'holothurie			
d'entéropneuste			
DEJECTIONS			
pelote fécale	39,1	25,9	28,2
EMPREINTES			
rosette petite		0,3	0,2
grande			
d'astérie			
TRACES A RELIEF			
RELIEF CONVEXE			
tumulus petit	56,5	29,1	33,7
grand	24,6	22,2	22,6
bourrelet			
RELIEF CONCAVE			
terrier simple	52,2	19,8	25,3
à dépôt	2,2	2,5	1,7
circulaires	13,1	7,0	8,0
sillon circulaire	144,6	106,5	112,4
RELIEF COMPLEXE			
souille petite	2,9	5,1	4,7
grande			
allongée	17,3	3,6	5,9
volcan	9,4	6,0	6,6
cratère double			
tumulus crevassé	12,3	3,9	5,3
terriers-volcans alignés		1,3	1,1
tumulus entouré de petits terriers	25,3	11,5	14,0
entouré de grands terriers	39,1	14,5	18,7
tumulus et 1 terrier	13,7	1,6	3,7

DENSITES DES TRACES OBSERVEES SUR LES TRAITS PHOTOGRAPHIQUES RAIE 1 ET RAIE 2, A LA STATION A, (densité exprimée en tr./1000m^2).

	DENSITE RAIE 3	DENSITE RAIE 5	DENSITE STATION B
TRACES SUPERFICIELLES			
PISTES			
Sillon simple	2,0	4,0	3,3
discontinu			
double			
ride simple	8,5	1,1	3,6
en épi	0,7	0,7	0,7
bosselée	2,3	4,8	4,0
d'holothurie	4,3		1,6
d'enteropneuste	2,0	0,7	1,2
DEJECTIONS			
Pelote fécale	24,2	43,6	36,7
EMPREINTES			
rosette petite	265,4	639,6	505,4
grande	19,0	11,0	14,1
d'astérie	0,7		
TRACES A RELIEF			
RELIEF CONVEXE			
tumulus petit	25,5	25,9	25,6
grand	121,0	42,8	63,2
bourrelet	2,0		0,7
RELIEF CONCAVE			
terrier simple	89,8	171,4	141,4
à dépôt	6,6	10,4	8,9
circulaire	4,1	1,8	2,6
sillon circulaire	81,9	97,4	91,2
RELIEF COMPLEXE			
souille petite	175,6	121,2	111,4
grande	20,3	7,7	12,2
allongée	5,9		2,1
volcan	9,6	4,8	5,9
cratère double			
tumulus crevassé	5,9		2,1
terriers-volcans alignés	1,3	0,3	0,9
tumulus entouré de petits terriers	131,1	79,2	97,3
entouré de grands terriers	41,3	26,0	31,5
tumulus et 1 terrier	41,3	20,1	28,0

DENSITES DES TRACES OBSERVEES SUR LES TRAITS PHOTOGRAPHIQUES

RAIE 3 ET RAIE 5, A LA STATION B, (densités exprimées en tr./1000m^2).

	DENSITE RAIE 9	DENSITE RAIE 10	DENSITE STATION CV2
TRACES SUPERFICIELLES			
PISTES			
sillon simple	6,6	14,3	8,6
discontinu			
double	3,6	10,8	5,5
ride simple	52,4	60,9	54,6
en épi			
bosselée	27,1	14,3	23,9
d'holothurie			
d'entéropneuste	2,4		1,8
DEJECTIONS			
pelote fécale	43,4	64,5	48,7
EMPREINTES			
rosette petite	83,8	68,1	79,8
grande	192,8	200,7	194,3
d'astérie			
TRACES ARELIEF			
RELIEF CONVEXE			
tumulus petit	57,3	26,9	49,6
grand	80,8	98,6	85,7
bourrelet	16,9	9,0	14,9
RELIEF CONCAVE			
terrier simple	13,3	7,2	11,7
à dépôt	8,4		6,3
circulaires			
sillon circulaire	62,1	37,6	55,9
RELIEF COMPLEXE			
souille petite	12,7	3,6	10,4
grande	4,8	3,6	4,5
alongée	35,0	25,1	32,5
volcan	59,1	62,7	60,0
cratère double	11,5	1,8	9,0
tumulus crevassé	157,3	170,3	160,5
terriers-volcans alignés			
tumulus entouré de petits terriers	6,3	12,5	7,7
entouré de grands terriers			
tumulus et 1 terrier	18,7	17,9	18,6

DENSITES DES TRACES OBSERVEES SUR LES TRAITS PHOTOGRAPHIQUES

RAIE 9 ET RAIE 10, A LA STATION CV2, (densité exprimée en tr./1000m^2).

	DENSITE TR 02	DENSITE TR11	DENSITE TR 13	DENSITE STATION 1
TRACES SUPERFICIELLES				
PISTES sillon simple	11,2	1666,7	66,0	34,9
sillon simple	11,2	166,7	66,0	34,9
discontinu				
double				
ride simple				
en épi				
bosselée				
d'holothurie				
d'entéropneuste		20	5,7	2,7
DEJECTIONS				
pelote fécale	213,3	220	201,9	211,0
EMPREINTES				
rosette petite			3,8	0,9
grande				
d'astérie			15,1	3,7
TRACES A RELIEF				
RELIEF CONVEXE				
tumulus petit	90	633,3	524,5	233,0
grand	79,3	340	477,4	194,5
bourrelet				
RELIEF CONCAVE				
terrier simple	30,7	113,3	271,7	95,0
à dépôt	6	73,3	115,1	37,2
circulaires	2,7	20	3,8	4,1
sillon circulaire				
RELIEF COMPLEXE				
souille petite	108,7	21	79,2	95,4
grande	78,7	166,7	184,9	156,4
allongée				
volcan	98,0	20,0	77,4	88,1
cratère double				
tumulus crevassé				
terriers-volcans alignés	208,0	113,3	169,8	192,7
tumulus entouré de petits terriers				
entouré de grands terriers	11,4	6,7	17,0	12,4
tumulus et 1 terrier				

DENSITES DES TRACES OBSERVEES SUR LES TRAITS PHOTOGRAPHIQUES

TR 02, TR 11 ET TR 13, A LA STATION 1, (densité exprimée en tr./1000m^2).

	DENSITE TR 03	DENSITE TR 17	DENSITE TR 19	DENSITE STATION 2
TRACES SUPERFICIELLES				
PISTES				
sillon simple	3,4	545	622,1	174,1
discontinu		10	5,8	1,8
double				
ride simple		10	17,4	4,0
en épi				
bosselée	2,3	25	52,2	12,7
d'holothurie				
d'entéropneuste		10	5,8	2,4
DEJECTIONS				
pelote fécale	4,5	30	52,8	15,1
EMPREINTES				
rosette petite				
grande				
d'astérie		60	233	12,7
TRACES A RELIEF				
RELIEF CONVEXE				
tumulus petit	3,4	420	191,9	95,5
grand	5,6	75	23,3	19,1
bourrelet				
RELIEF CONCAVE				
terrier simple	3,4	20	116,3	21,5
à dépôt		8,5	40,6	19,1
circulaires	4,5	10	5,8	5,6
sillon circulaire		20	5,8	4,0
RELIEF COMPLEXE				
souille petite	5,6	40	69,8	19,9
grande	2,4	5	11,6	4,0
allongée			23,3	3,2
volcan	1,1	50	23,3	11,9
cratère double				
tumulus crevassé				
terriers-volcans alignés	6,8			4,8
tumulus entouré de petits terriers				
entouré de grands terriers		20		3,2
tumulus et 1 terrier				

DENSITES DES TRACES OBSERVEES SUR LES TRAITS PHOTOGRAPHIQUES

TR 03, TR 17 ET TR 19, A LA STATION 2,(densité exprimée en tr./1000m^2).

DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES

ET SPECTROMETRIQUES

Profondeur	% FG	% $CaCO_3$ C.Bernard	Leco	% C.orga.	Lithologie
0-2	1,8	11	10,7	0,75	Vases à nannofossiles
2-3,5			21,3	0,50	
3,5-5,5			18,0	0,49	
5,5-7,5			22,4	0,41	
7-9	8,1	16,8	17,0	0,53	Vases à nannofossiles
10-12			19,4	0,48	
12-14	9,7	22,0	24,7	0,50	
16-18	1,2	21,0	21,3	0,45	Vases à nannofossiles
20-22			19,4	0,31	
23-25	8,1	27,9	23,6	0,30	

KG 01 : résultats sédimentologiques

Profondeur	% FG	% $CaCO_3$ C.Bernard	Leco	% C.orga.	Lithologie
0-2	12	32	29,8	0,38	Boues marneuses à nannofossiles
2-4			25,0	0,33	Vases à nannofossiles
4-6			27,8	0,36	
7-9	10	28	26,1	0,26	
12-14	7	20	18,1	0,22	
17-19	3,2	8	5,0	0,21	Vases argileuses
25-27	4,1	7,0	6,1	0,20	

KG 16 : résultats sédimentologiques

Resultats sédimentologiques du Bassin de Démerara

NUCLEIDE	PROFONDEUR (cm)				
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	8 - 10	16 - 18
^{238}U	1,3±0,5	0,7±0,3	1,5±0,6	1,1±0,5	2,8±0,4
^{230}Th	5,3±0,7	11,7±2,2	9,6±3,7	7,8±3,5	7,8±1,9
^{226}Ra	4,7±0,2	8,4±0,1	5,5±0,2	4,9±0,2	5,0±0,1
^{210}Pb	8,2±0,5	8,2±0,3	5,5±0,5	4,2±0,4	4,7±0,3
^{231}Pa	0,85±0,14	0,51±0,09	0,48±0,14	0,53±0,14	0,43±0,09
^{228}Th	2,4±0,4	0,91±0,15	2,2±0,3	2,9±0,3	3,6±0,2
^{228}Ra	1,1±0,3	1,15±0,20	2,3±0,3	2,5±0,3	3,7±0,2
^{230}Th ex	4,0±3,7	11,0±2,2	8,1±3,7	6,7±3,5	5,0±1,9
^{231}Pa ex	0,79±0,14	0,48±0,09	0,41±0,14	0,48±0,14	0,30±0,09
^{210}Pb ex	3,5±0,5	- 0,2±0,3	0,0±0,5	- 0,7±0,4	- 0,3±0,3
^{228}Th ex	1,3±0,5	- 0,2±0,3	- 0,1±0,4	0,4±0,4	- 0,1±0,3

Station A: mesures des activités de radionuclides dans les sédiments superficiels. (KG 01)

NUCLEIDES (dpm/gr)	PROFONDEUR DE LA CAROTTE (en cm)					
	0 - 2	2 - 3,5	3,5 - 5,5	5,5 - 7,5	10 - 12	20 - 22
^{238}U	1,50±0,52	0,93±0,48	1,46±0,46	1,63±0,47	1,20±0,31	1,47±0,32
^{230}Th	1,17±3,74	4,87±3,51	2,47±3,30	5,01±3,40	6,70±2,05	4,78±2,15
^{226}Ra	3,26±0,85	2,39±0,81	1,99±0,78	1,64±0,78	5,88±0,85	5,20±0,55
^{222}Rn	2,45±0,14	2,84±0,14	2,48±0,13	3,07±0,14	3,08±0,09	5,38±0,11
^{210}Pb	6,53±0,50	6,54±0,47	4,35±0,44	3,45±0,43	3,45±0,28	4,37±0,29
^{231}Pa	0,36±0,15	0,36±0,14	0,26±0,14	0,35±0,14	0,44±0,09	0,42±0,09
^{228}Ra	3,82±0,37	2,63±0,33	1,86±0,31	2,53±0,32	2,52±0,21	2,36±0,21
^{228}Th	2,83±0,12	2,18±0,11	1,90±0,10	1,96±0,10	1,94±0,07	1,80±0,06
^{230}Th excès	-0,33±3,78	3,94±3,54	1,01±3,33	3,59±4,44	5,50±2,07	3,31±2,17
^{231}Pa excès	0,30±0,15	0,32±0,15	0,19±0,14	0,29±0,14	0,39±0,10	0,36±0,10
^{210}Pb excès	3,26±0,99	4,15±0,93	2,36±0,90	1,81±0,89	0	-0,85±0,62
(^{210}Pb excès	4,08±0,99	3,70±0,93	1,87±0,90	0,38±0,89	0	-0,95±0,62)
^{228}Th excès	pas d'excès	pas d'excès	pas d'excès	pas d'excès	pas d'excès	pas d'exc.

Station B: mesures des activités des radionuclides dans les sédiments superficiels. (KG 16)

Résultats des analyses de spectrométrie gamma dans le Bassin de Démérara.

Profondeur en cm	% FG	% $CaCO_3$ C.Bernard	% $CaCO_3$ Leco	% C.orga.	Lithologie
0-1			45,5	0,24	Boues marneuses à nannofossiles
0-2	4,7	54	54,7	0,22	
1-1,5			56,1	0,20	
1,5-2			58,5	0,20	
2-2,5			57,1	0,18	
2,5-3				0,14	
3-3,5			61,3	0,15	
3,5-4				0,12	
4-5				0,13	
6-7			63,7	0,14	Boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères
7-9	19	66	64,9	0,10	
9-10			51,9	0,12	
15-17	4,6	53	48,1	0,12	Boues marneuses à nannofossiles
22-24	2,3	40	37,6	0,13	
26-28	4,2	35	37,3	0,11	

KG 33: résultats sédimentologiques

Profondeur	% FG	% $CaCO_3$ C.Bernard	% $CaCO_3$ Leco	% C.orga.	Lithologie
0-1			41,3	0,24	Boues marneuses à nannofossiles
0-2	14	59	56,7	0,22	
1-1,5			57,2	0,20	
1,5-2			56,8	0,20	
2-2,5			55,6	0,18	
2,5-3			59,4	0,16	
3-3,5			63,8	0,14	
3,5-4			61,3	0,15	
4-4,5			60,2	0,11	
6-8	33	77	75,0	0,10	Boues marneuses à foraminifères
9-10			69,4	0,11	
13-15	21	61	58,3	0,10	Boues marneuses à nannofossiles et foraminifères
25-27	21	63	53,8	0,08	
31-33	10	33	24,1	0,12	Vases à nannofossiles

KG 40: résultats sédimentologiques

Résultats sédimentologiques obtenus dans le Bassin du Cap Vert.

NUCLEIDES	PROFONDEUR EN CM											
(dpm/gr)	0 - 1	1 - 1,5	1,5 - 2	2 - 2,5	2,5 - 3	3 - 3,5	3,5 - 4	4 - 4,5	6 - 7	9 - 10	14 - 16	24 - 26
^{238}U	0,45 ±0,40	0,56 ±0,25	0,37 ±3,7	1,19 ±0,40	0,43 ±0,37	0,46 ±0,37	0,73 ±0,37	0,47 ±0,35	0,27 ±0,22	0,46 ±0,23	0,34 ±0,45	0,77 ±0,28
^{230}Th	13,90 ±3,11	15,63 ±2,15	13,48 ±2,90	15,89 ±3,20	16,94 ±2,98	10,27 ±2,81	12,55 ±2,88	12,89 ±2,72	11,15 ±1,61	10,14 ±1,56	16,81 ±3,58	9,82 ±2,07
^{226}Ra	4,05 ±0,68	5,81 ±0,50	5,66 ±0,65	6,97 ±0,71	5,58 ±0,65	5,21 ±0,63	6,22 ±0,64	6,64 ±0,64	7,16 ±0,41	7,19 ±0,41	11,87 ±0,83	9,89 ±0,51
^{210}Pb	11,71 ±0,50	5,62 ±0,29	7,21 ±0,40	6,36 ±0,43	7,18 ±0,41	6,55 ±0,39	6,13 ±0,38	6,57 ±0,38	6,51 ±0,24	6,94 ±0,24	10,96 ±0,51	9,61 ±0,31
^{231}Pa	0,56 ±0,12	0,67 ±0,08	0,67 ±0,11	0,77 ±0,12	0,71 ±0,11	0,65 ±0,11	0,74 ±0,11	0,68 ±0,10	0,48 ±0,07	0,35 ±0,07	0,51 ±0,13	0,39 ±0,08
^{228}Th	0,56 ±0,07	0,56 ±0,05	0,91 ±0,07	0,71 ±0,07	0,72 ±0,07	0,54 ±0,07	0,61 ±0,07	0,61 ±0,06	0,42 ±0,04	0,53 ±0,04	1,21 ±0,08	0,94 ±0,05
^{228}Ra	0,95 ±0,25	0,92 ±0,16	0,87 ±0,23	1,14 ±0,24	1,15 ±0,24	0,98 ±0,22	0,71 ±0,23	0,77 ±0,22	0,67 ±0,14	0,77 ±0,14	1,56 ±0,29	1,30 ±0,17
^{230}Th excès	13,51 ±3,14	15,07 ±2,17	13,11 ±2,92	14,70 ±3,22	16,51 ±3,00	9,80 ±2,83	11,80 ±2,90	12,44 ±2,74	10,88 ±1,62	9,68 ±1,58	16,46 ±3,61	9,05 ±2,09
^{231}Pa excès	0,54 ±0,12	0,64 ±0,08	0,65 ±0,11	0,72 ±0,12	0,69 ±0,11	0,64 ±0,11	0,70 ±0,11	0,66 ±0,11	0,47 ±0,07	0,33 ±0,07	0,50 ±0,13	0,36 ±0,08
^{210}Pb excès	7,66 ±0,84	-0,19 ±0,58	1,55 ±0,80	-0,61 ±0,83	1,61 ±0,77	1,34 ±0,74	-0,09 ±0,75	-0,07 ±0,73	-0,65 ±0,48	0	-0,91 ±0,97	-0,28 ±0,59
^{228}Th excès	-0,39 ±0,26			non	non	non	non	non	non		non	non

Station CV2: mesures des activités des radio-
(KG 40) nuclides dans les sédiments superficiels.

NUCLEIDES	PROFONDEUR en cm					
	0 - 1	2 - 2,5	4 - 5	6 - 7	9 - 10	26 - 28
^{238}U	1,20 ±0,51	0,03 ±0,49	1,08 ±0,50	1,34 ±0,55	2,90 ±0,72	1,08 ±0,28
^{230}Th	15,5 ±3,96	18,93 ±3,80	12,44 ±3,84	14,59 ±4,22	12,45 ±5,75	18,68 ±2,13
^{226}Ra	6,65 ±0,88	8,63 ±0,87	3,67 ±0,85	12,18 ±0,98	14,29 ±1,31	19,96 ±0,53
^{222}Rn		8,25 ±0,20	4,63 ±0,17	10,37 ±0,24	14,90 ±0,33	9,40 ±0,11
^{210}Pb	13,58 ±0,59	8,32 ±0,49	6,60 ±0,49	9,54 ±0,55	14,96 ±0,76	18,34 ±0,34
^{231}Pa	1,05 ±0,16	0,78 ±0,15	0,51 ±0,15	0,55 ±0,16	0,74 ±0,21	0,60 ±0,68
^{228}Ra	1,14 ±0,32	1,06 ±0,31	2,70 ±0,34	1,76 ±0,35	2,27 ±0,46	2,40 ±0,18
^{228}Th	0,73 ±0,09	0,88 ±0,09	1,89 ±0,11	0,93 ±0,10	2,09 ±0,13	1,67 ±0,05
^{230}Th excès	14,31 ±3,99	18,90 ±3,83	11,36 ±3,88	13,24 ±4,26	9,55 ±5,79	17,60 ±2,15
^{231}Pa excès	1,00 ±0,16	0,78 ±0,15	0,46 ±0,16	0,49 ±0,16	0,60 ±0,21	0,55 ±0,08
^{210}Pb excès	6,93 ±1,06	-0,31 ±1,00	1,97 ±0,98	-2,64 ±1,12	0,67 ±1,52	-1,62 ±0,63
^{228}Th excès	-0,41 ±0,34	-0,18 ±0,32	-0,81 ±0,35	-0,83 ±0,36	-0,18 ±0,48	-0,73 ±0,19

Station CV1: mesures des activités deradio-
(KG 33) nuclides dans les sédiments superficiels.

Profondeur	% FG	%$CaCO_3$ C. Bernard	Lithologie
1-3	10	55	Boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères
10-12	11	56	
18-20	10	52	Boues marneuses à nannofossiles
25-27	9	49	

KG 163 : Résultats sédimentologiques

Profondeur	% FG	% $CaCO_3$ C. Bernard	Lithologie
2-4	61	61	Boues marneuses à nannofossiles et à foraminifères
11-13	28	52	
19-21	17	43	Boues marneuses à nannofossiles
24-26	25	32	
27-28	27	31	

KG 184 : Résultats sédimentologiques

Résultats sédimentologiques de la Marge du Golfe de Gascogne

Prof.(cm) / Nucléides	0 - 2	2 - 3,5	3,5 - 5,5	5,5 - 7	21 - 22
$^{234}Th(^{238}U)$	1,17±0,36	0,39±0,26	0,48±0,39	0,51±0,32	2,62±0,38
^{210}Pb	5,28±0,38	5,66±0,26	3,80±0,38	2,48±0,32	2,69±0,32
^{226}Ra					2,42±0,59
^{210}Pb ex.	2,9±0,7	3,2±0,7	1,4±0,7	0,1±0,7	0,27±0,67

Station 1: mesures des activités des radionuclides dans les sédiments superficiels. (KG: 162)

Prof.(cm) / Nucléides	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 7,5	9 - 10
$^{234}Th(^{238}U)$	0,09±0,34	0,52±0,37	0,82±0,41	0,89±0,38	1,22±0,39
^{210}Pb	8,90±0,42	6,23±0,39	3,58±0,40	3,18±0,36	2,43±0,33
^{226}Ra	1,07±0,58	2,03±0,58	0,58±0,65	2,45±0,60	1,85±0,62
^{210}Pb ex.	7,83±0,72	4,20±0,70	3,00±0,70	0,73±0,70	0,78±0,34

Station 2: mesures des activités des radionuclides dans les sédiments superficiels (KG 167)

Prof.(cm) / Nucléides	0 - 2	2 - 3	5 - 6	25 - 26
$^{234}Th(^{238}U)$	0	0,94±0,40	0,37±0,22	4,10±0,24
^{210}Pb	6,27±0,38	4,42±0,42	2,90±0,22	1,95±0,19
^{226}Ra				2,07±0,36
^{210}Pb ex.	4,2±0,5	2,4±0,5	0,8±0,4	-0,12±0,41

Station 2: mesures des activités des radionuclides dans les sédiments superficiels (KG 182)

Résultats des analyses de spectrométrie gamma dans le Golfe de Gascogne

Terrasse de Meriadzek

Teneurs en C. organique des sédiments superficiels de 0 à 22 cm de profondeur (en %). Carotte KG 162.

prof. (cm)	0-2	2-3,5	3,5-5,5	5,5-7	9-10	15-16	21-23
C. orga.	0,41	0,38	0,30	0,13	0,11	0,05	0,03

Ride Aegis

Teneurs en C. organique des sédiments superficiels de 0 à 26 cm de profondeur, (en %). Carotte KG 167.

prof. (cm)	0-2	2-4	4-6	6-7,5	9-10	15-16	25-26
C. orga.	0,40	0,34	0,28	0,28	0,20	0,10	0,04

Ride Aegis

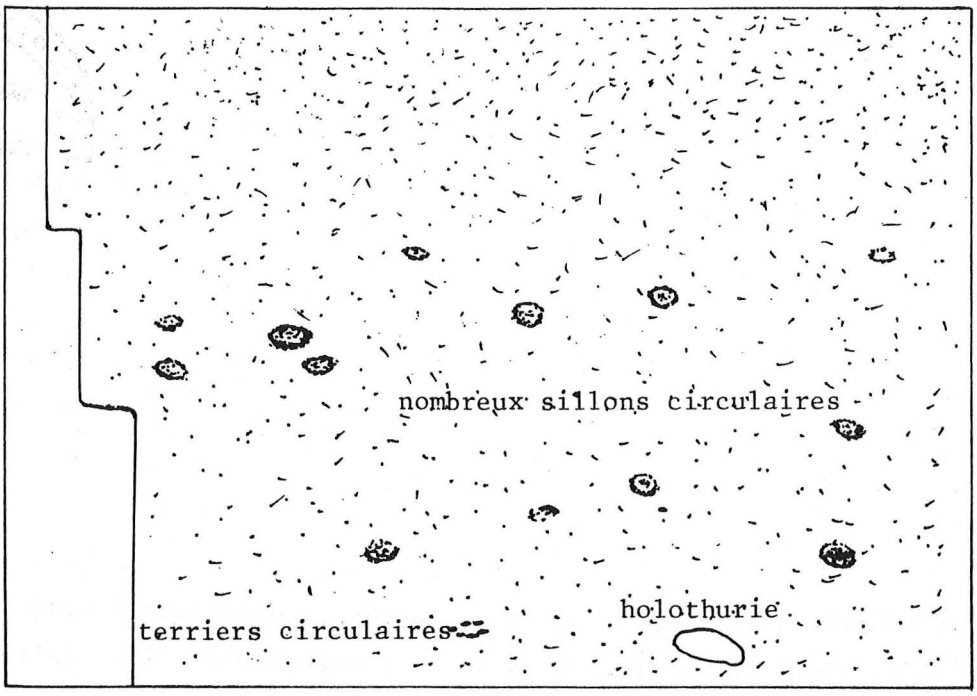
Teneurs en C. organique des sédiments superficiels de 0 à 26 cm de profondeur, (en %). Carotte KG 182.

prof. (cm)	0-2	2-3	3-4	4-5	5-6	9-10	15-16	25-26
C. orga.	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,20	0,10	0,05

Résultats des analyses de C organique dans le Golfe de Gascogne.

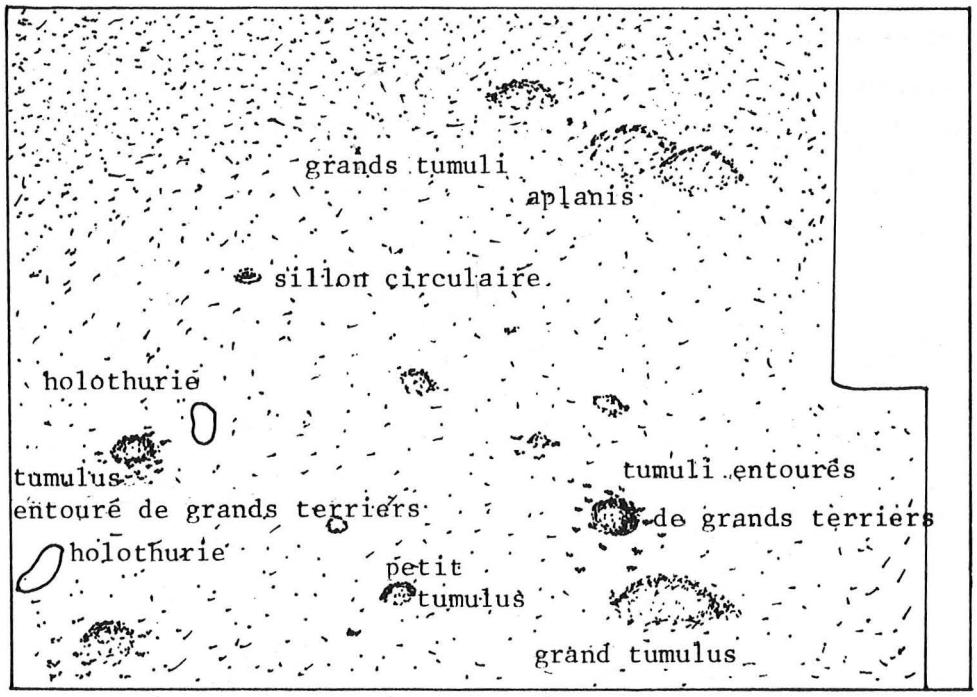
ANNEXE 2

Cette annexe 2 se compose de cinq planches, comprenant chacune deux interprétations de prises de vue, extraites des films réalisés dans chaque station de cette étude, (Station A, Station B, Station CV2, Station 1 et Station 2). Les prises de vues ont été choisies pour montrer les caractéristiques générales et les particularités reconnues à chaque station. Les reproductions photographiques ne peuvent être présentées dans ce mémoire, compte-tenue de la qualité des prises de vues originales. Cepandant, les films peuvent être consultés au Département d'Etudes Océaniques, du Centre Océanologique de Bretagne.



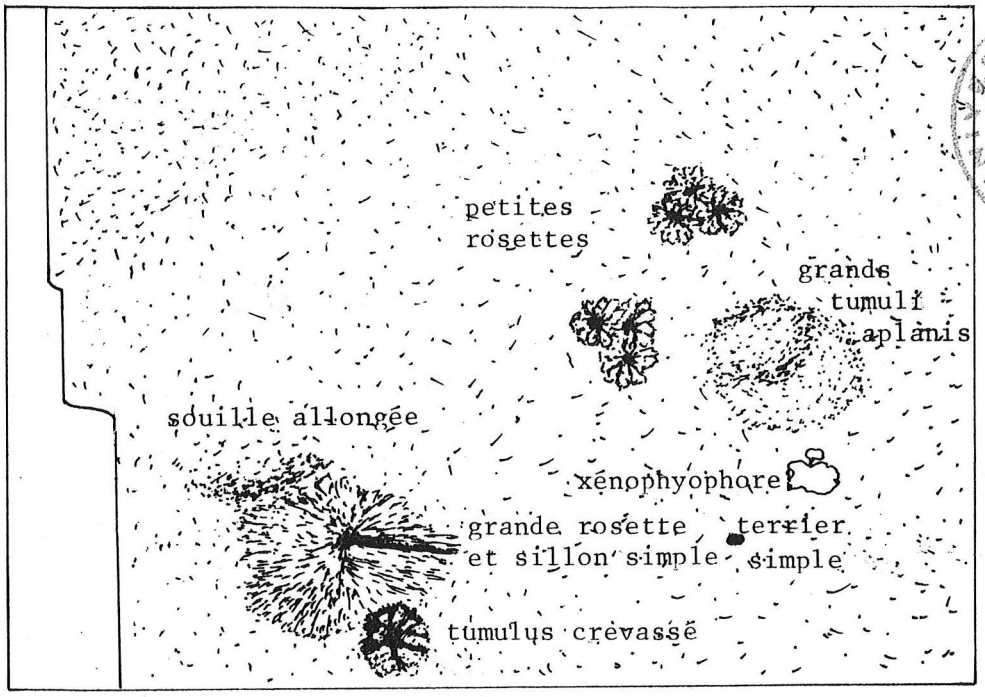
Photographie extraite du film RAIE 1, surface photographiée $\simeq 10m^2$.

Cette station est caractérisée par la prédominance des sillons circulaires.



Photographie extraite du film RAIE 1, surface photographiée $\simeq 12,5m^2$, le poisson s'est retourné, les photographies doivent alors être observées à l'envers, (chambre de données en haut à gauche).

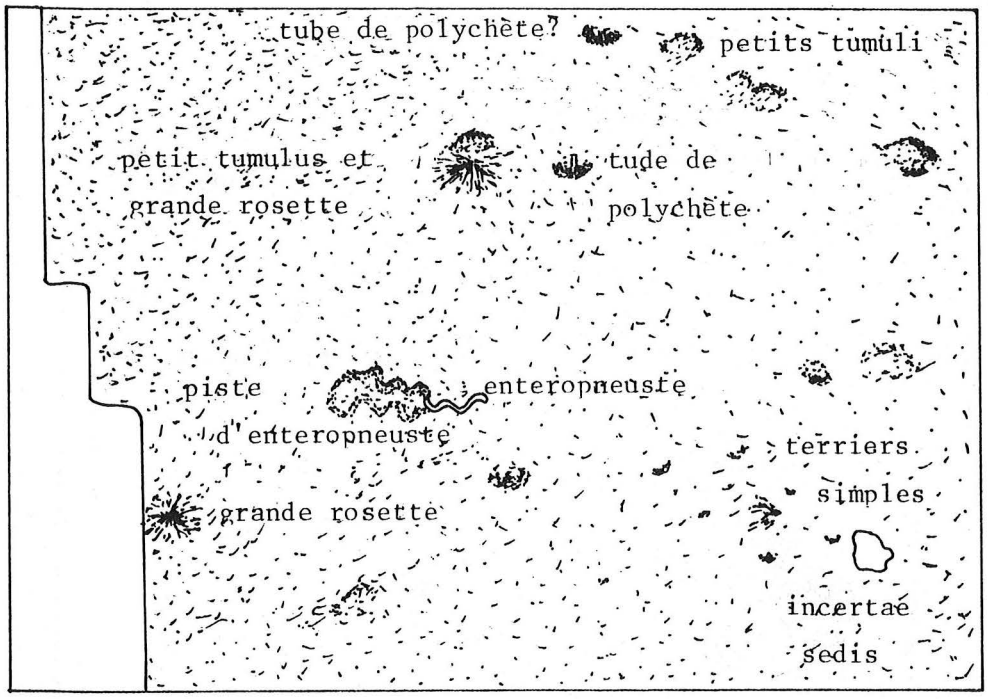
Station A: Cône de l'Amazone, 4400 m. de profondeur.



UNIVERSITE DE LYON
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

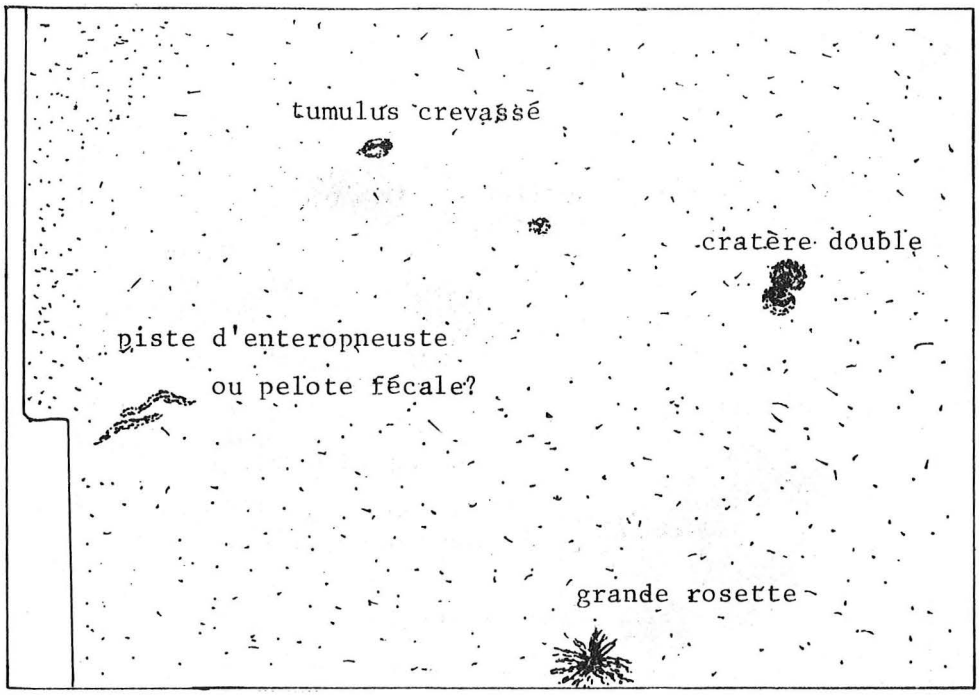
Photographie extraite du film RAIE 5, surface photographiée $\simeq$ 4,5m^2.

Cette station est caractérisée par l'abondance des petites rosettes (en essaim).



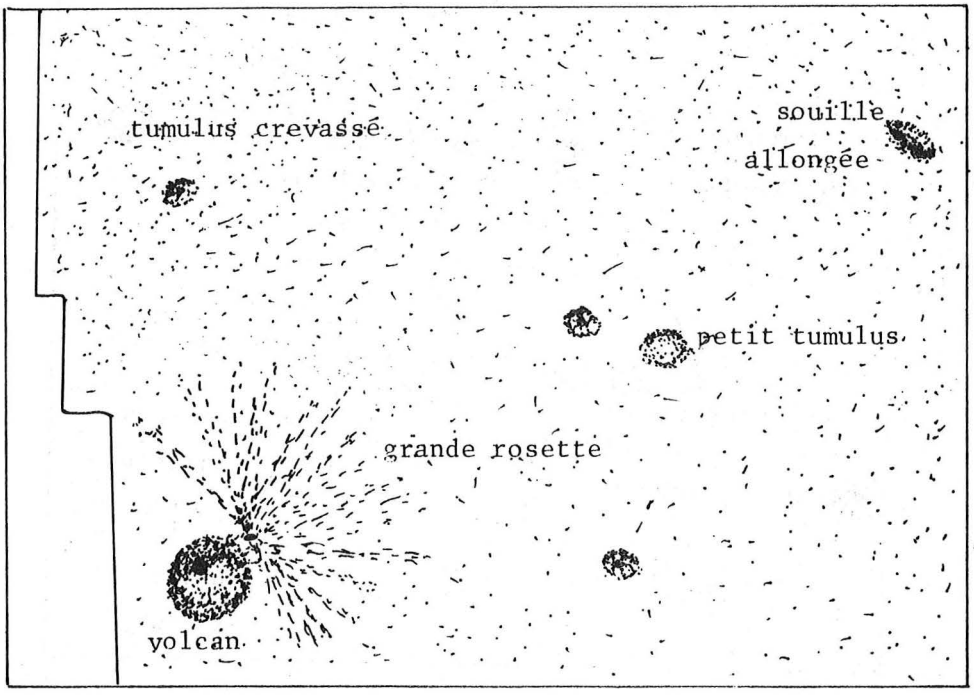
Photographie extraite du film RAIE 5, surface photographiée $\simeq$ 5m^2.

Station B: Plaine abyssale de Démérara, 4850 m. de profondeur.



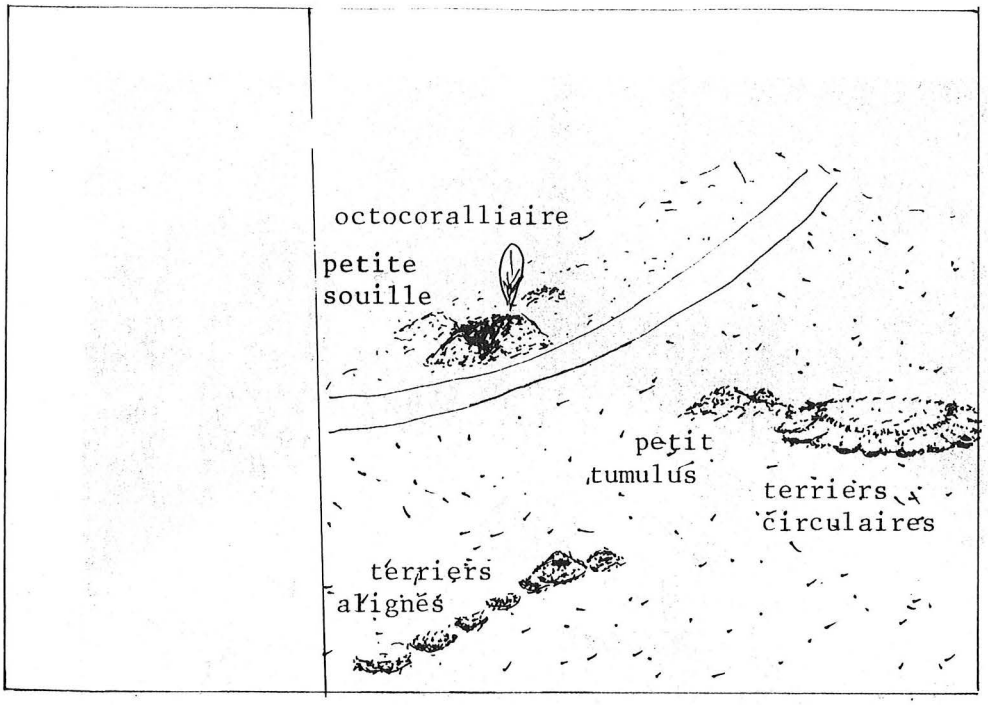
Photographie extraite du film RAIE 9, surface photographiée:- 10m^2.

Cette station est caractérisée par une abondance de tumuli crevassés
Les cratères doubles ne sont observés que dans cette station.



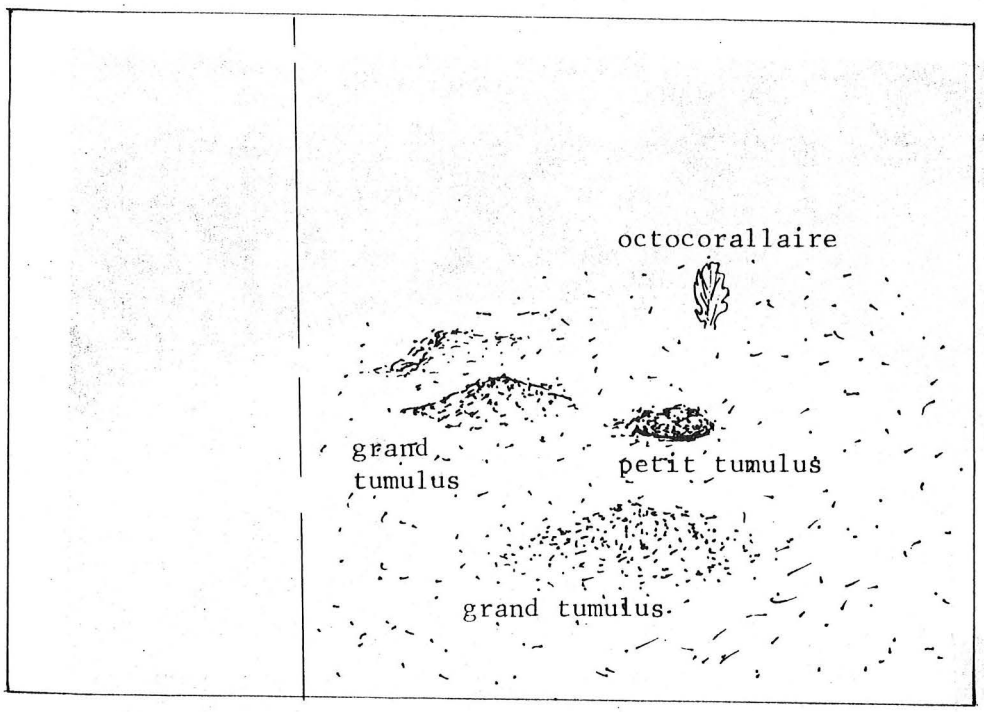
Photographie extraite du film RAIE 9, surface photographiée:- 10m^2.

Station CV2: Plateau abyssal du Cap Vert, 4950 m. de profondeur.



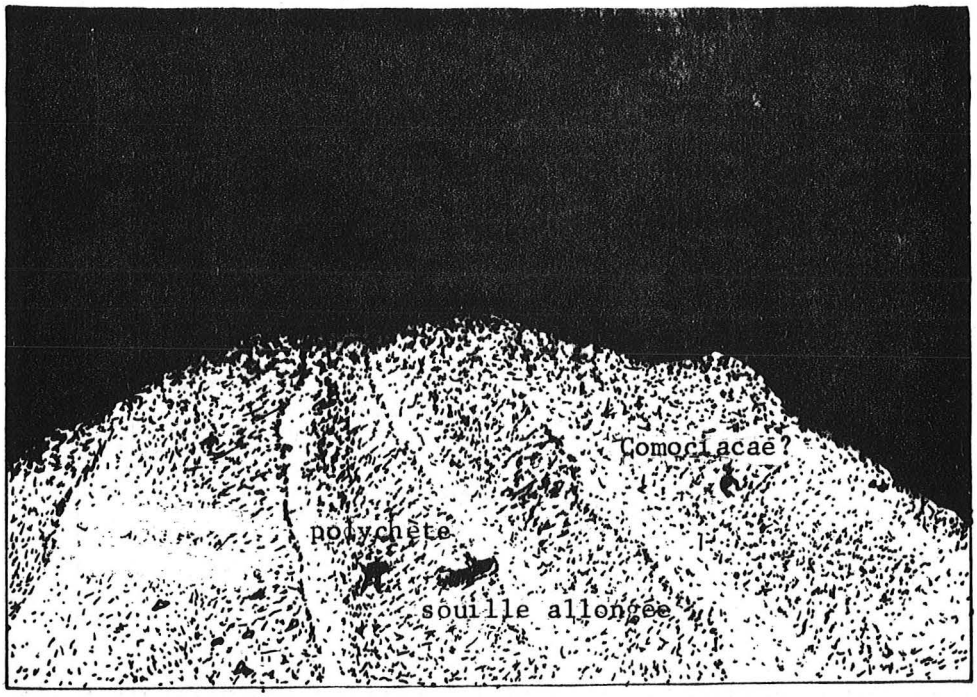
Photographie extraite du film TR 13, surface photographiée ≃ 2,5m^2 environ. (photographie négative).

Cette station se caractérise par l'abondance d'octocoralliaires, de petits tumuli, et de nombreux terriers alignés.



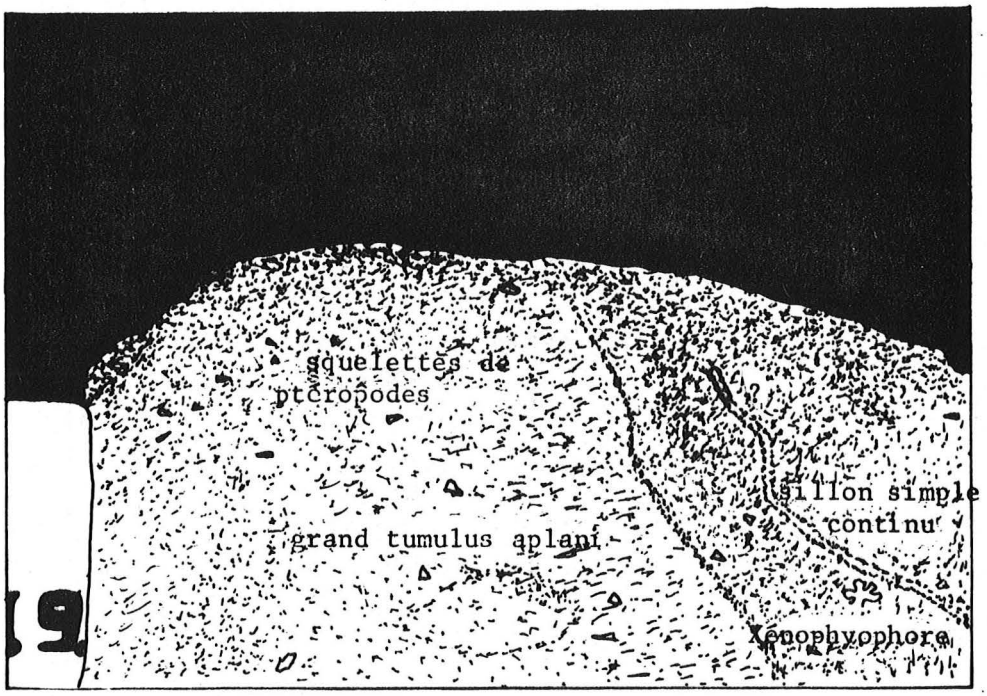
Photographie extraite du film TR 11, surface photographiée ≃ 2,5m^2 environ.

Station 1: Terrasse de Mériadzek, 2100 m. de profondeur.



Photographie extraite du film TR 03, surface photographiée- 5m^2(environ).

Cette station se caractérise par la présence de rides de courants et de nombreux squelettes de ptéropodes.



Photographie extraite du film TR 19. surface photographiée- 2.5m^2(environ).

Station 2: Ride Aegis, 2800 m. de profondeur.

TABLE DES MATIERES

Page

INTRODUCTION..... 1

CHAPITRE 1 - SITUATIONS - ENVIRONNEMENTS..... 4
I - Choix des sites..... 5
II - Techniques de positionnement et de bathymétrie..... 6
A - Systèmes de navigation utilisés..... 6
B - Sondeurs utilisés..... 7
III - Données préliminaires sur l'environnement..... 7
A - Cône inférieur de l'Amazone (station A)..... 7
B - Plaine abyssale de Démérara (station B)..... 9
C - Plaine abyssale du Cap Vert (station CV 1)..... 11
D - Plateau abyssal du Cap Vert (station CV 2)..... 11
E - Terrasse de Meriadzek (station 1)..... 13
F - Ride Aegis (station 2)..... 13
IV - Importance de la faune..... 14
A - Définition des catégories faunistiques..... 14
B - Densités totales de la faune dans les secteurs prospectés..... 14

CHAPITRE 2 - PHOTOGRAPHIES..... 15
I - Techniques et méthodes..... 15
A - Acquisitions des données en mer..... 15
1 - Systèmes de photographies sous-marines..... 15
2 - Systèmes photographiques utilisés..... 17
B - Examen des photographies..... 20
1 - Premières observations..... 20
2 - Classification des traces organiques..... 21
3 - Traitements des données..... 26
II - Résultats..... 27
A - Analyses des données photographiques pour chaque station..... 27
1 - Cône inférieur de l'Amazone (station A)..... 27
2 - Plaine abyssale de Démérara (station B)..... 29
3 - Plaine abyssale du Cap Vert (station CV 1)..... 29
4 - Plateau abyssal du Cap Vert (station CV 2)..... 32
5 - Terrasse de Meriadzek (station 1)..... 32
6 - Ride Aegis (station 2)..... 35

Page

B - Analyses interstations..... 35

1 - Qualité de l'échantillonnage..... 35

2 - Similitude entre les stations..... 39

3 - Comparaison de la distribution des différents types de traces entre les stations..... 41

4 - Comparaison de la répartition faunistique et de la distribution des traces dans l'ensemble des stations..... 42

III - Discussions..... 44

CHAPITRE 3 - SEDIMENTS..... 46

I - Techniques et méthodes..... 47

A - Acquisitions des données en mer..... 47

B - Analyses au laboratoire..... 48

1 - Technique d'étude lithologique..... 48

2 - Technique d'étude par spectrométrie gamma..... 54

II - Résultats..... 66

A - Cône inférieur de l'Amazone (station A)..... 66

1 - Résultats sédimentologiques..... 66

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 67

3 - Discussion..... 68

B - Plaine abyssale de Démérara (station B)..... 69

1 - Résultats sédimentologiques..... 69

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 71

3 - Discussion..... 72

C - Plaine abyssale du Cap Vert (station CV 1)..... 73

1 - Résultats sédimentologiques..... 73

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 74

3 - Discussion..... 75

D - Plateau abyssal du Cap Vert (station CV 2)..... 76

1 - Résultats sédimentologiques..... 76

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 77

3 - Discussion..... 78

E - Terrasse de Meriadzek (station 1)..... 79

1 - Résultats sédimentologiques..... 79

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 81

3 - Discussion..... 81

F - Ride Aegis (station 2)..... 82

1 - Résultats sédimentologiques..... 82

2 - Résultats des mesures par spectrométrie gamma..... 83

3 - Discussion..... 85

Page

III - Discussions 85
A - Intérêts et limites de la méthode 85
B - Mélange sédimentaire actuel 86
C - Enregistrement "Historique" de la bioturbation 90

DISCUSSIONS - CONCLUSIONS 95
I - Conservation des traces organiques 95
II - Rôle des facteurs de l'environnement 98
III - Importance de la bioturbation 102

BIBLIOGRAPHIE I

ANNEXE 1 (Données acquises au cours de l'étude) XI
Données faunistiques XI
Données photographiques XVII
Données sédimentologiques et spectrométriques XXV

ANNEXE 2 (Présentation photographique des stations) XXXIII

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

UNIVERSITE DE LILLE
LABORATOIRE DE GEOLOGIE

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Situation des stations étudiées dans l'Océan Atlantique (0° - 50° N).
Fig. 2 - Carte des prélèvements de la station A.
Fig. 3 - Carte des prélèvements de la station B.
Fig. 4 - Carte des prélèvements de la station CV1.
Fig. 5 - Carte des prélèvements de la station CV2.
Fig. 6 - Carte des prélèvements de la station 1.
Fig. 7 - Carte des prélèvements de la station 2.
Fig. 8 - Densités faunistiques totales dans les six secteurs étudiés.
Fig. 9 - Systèmes photographiques utilisés par l'équipe d'écologie abyssale du C.O.B..
Fig.10 - Traces superficielles.
Fig.11 - Traces à relief convexe et à relief concave.
Fig.12 - Traces à relief complexe.
Fig.13 - Diagramme des densités des traces observées à la station A.
Fig.14 - Diagramme des densités des traces observées à la station B.
Fig.15 - Diagramme des densités des traces observées à la station CV2.
Fig.16 - Diagramme des densités des traces observées à la station 1.
Fig.17 - Diagramme des densités des traces observées à la station 2.
Fig.18 - Diagramme de qualité de l'échantillonnage photographique pour chaque station.
Fig.19 - Tableau des degrés de similitude entre les stations (indice de Kulczinski 2).
Fig.20 - Diagramme tridimensionnel des densités moyennes de chaque type de traces dans chacune des stations étudiées.
Fig.21 - Tableau récapitulatif des données photographiques de chaque station.
Fig.22 - Carottier U.S.N.E.L.
Fig.23 - Schéma d'organisation des analyses de sédimentologie et de spectrométrie gamma.
Fig.24 - Terriers reconnus dans les carottes prélevées en domaine profond.
Fig.25 - Modèle stratigraphique de conservation des terriers, de Berger et al. (1979).
Fig.26 - Classification des sédiments meubles utilisée pour l'Océan Atlantique (d'après Auffret et Pastouret, 1978; Auffret, thèse en cours).
Fig.27 - Représentation schématique des données sédimentologiques pour chaque carotte étudiée.
Fig.28 - Tableau des séries de l'U-238, du Th-232 et de l'U-235.
Fig.29 - Spectre gamma de 40 à 400 KeV d'un échantillon (0-1 cm) d'une carotte de sédiments abyssaux (KG 40, Bassin du Cap Vert).
Fig.30 - Spectre gamma de 40 à 150 KeV d'un échantillon (0-1cm) d'une carotte de sédiments abyssaux (KG 40, Bassin du Cap Vert).
Fig.31 - Droite de décroissance de l'activité d'un radionuclide en fonction de la profondeur dans les sédiments.
Fig.32 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG01.
Fig.33 - Droite de décroissance des activités du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG01.
Fig.34 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG16.
Fig.35 - Droites de décroissance des activités du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG16.

Fig. 36 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG33

Fig. 37 - Droite de décroissance des activités du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG33.

Fig. 38 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG40.

Fig. 39 - Droites de décroissance des activités du Th-230 en excès et du Pa-231 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG40.

Fig. 40 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG163.

Fig. 41 - Droite de décroissance des activités du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG 162.

Fig. 42 - Résultats sédimentologiques de la carotte KG184.

Fig. 43 - Droites de décroissance des activités du Pb-210 en excès en fonction de la profondeur dans la carotte KG167 et KG182.

Fig. 44 - Tableau récapitulatif des données dans chaque station.

Fig. 45 - Carte de zonations des climats et de la productivité primaire dans l'Océan Atlantique (0 - 60°N).

Fig. 46 - Tableau synthétique des données bibliographiques et des données acquises au cours de l'étude.

Fig. 47 - Modèle stratigraphique des figures sédimentaires (d'après Werner et Wetzel, sous presse).

Fig. 48 - Tableau comparatif des données de la faune du degré de bioturbation B et du taux de mélange D_B pour chaque station.

Fig. 49 - Tableau des temps de conservation et des densités corrigées des traces superficielles.

Fig. 50 - Diagramme des densités faunistiques - densités corrigées des traces superficielles.

Fig. 51 - Relations entre les facteurs de l'environnement et la bioturbation.

Fig. 52 - Diagramme des densités de la méïofaune, de la macrofaune et de la mégafaune - taux d'accumulation de C organique : Sc.

Fig. 53 - Diagramme de la profondeur du mélange - taux d'accumulation de C organique : Sc.

Fig. 54 - Diagramme des coefficients de mélange D_B - taux d'accumulation de C organique : Sc.

Fig. 55 - Diagramme des densités de la mégafaune - coefficients de bioturbation enregistrée : B.

RESUME

Cette étude a pour but d'évaluer *l'intensité de la bioturbation actuelle* dans trois bassins du *domaine abyssal de l'Océan Atlantique Nord*, et de déterminer l'influence des paramètres de l'environnement. L'ensemble de ces paramètres (topographie, profondeur, hydrodynamisme, densité faunistique et sédimentation) est défini dans chaque site, grâce aux missions d'écologie abyssale.

Une première analyse est réalisée à partir de 2524 prises de vue du fond et porte sur la *distribution des traces*, résultant de l'activité animale. Une classification est établie et comprend deux groupes : les traces superficielles et les traces à relief. L'abondance des traces est estimée en terme de densité et de diversité, pour chaque site. Les variations de la répartition des traces sont ensuite discutées en définissant la qualité de l'échantillonnage dans chacune des stations, et en tenant compte des paramètres de l'environnement. A ce stade, l'analyse est incomplète en l'absence de considération sur la conservation des traces. Un indice approprié a donc été recherché à partir des résultats de sédimentologie et de spectrométrie.

Dans la deuxième analyse, le remaniement des sédiments superficiels (ou couche mélangée) est estimé, avec précision, par un *taux de mélange* ayant les dimensions d'un coefficient de diffusion. Ce taux de mélange, D_B, est obtenu à partir des variations d'activités du Pb-210 en excès et du Th-228 en excès, mesurées à l'aide d'une nouvelle technique de spectrométrie gamma : le détecteur à Ge(H.P.) (Yokoyama et Nguyen, 1979). Les caractéristiques sédimentaires de chaque station sont également précisées.

Une analyse succincte a été effectuée pour caractériser les figures de bioturbation enregistrée dans les sédiments datés Holocène.

Un *remaniement sédimentaire est observé dans les secteurs où les apports trophiques sont importants*. Un taux de mélange relativement grand est obtenu dans les sédiments du Cône inférieur de l'Amazone (4400 m) ($D_B = 0{,}94.10^{-8} cm^2/s$) et dans les sédiments de la Marge du Golfe de Gascogne (2100-2800 m) ($D_B = 0{,}53$ à $0{,}60.10^{-8} cm^2/s$). Dans ces secteurs, les temps de conservation des traces sont de courte durée et les traces observées sont essentiellement des *traces à relief* résultant d'un remaniement en profondeur.

En revanche, les *sédiments provenant des plaines abyssales oligotrophes* (Plaine abyssale de Démérara, Bassin du Cap Vert) *présentent un remaniement très faible, n'excédant pas les deux premiers centimètres de profondeur*. Le temps de conservation des traces est plus long, les traces sont plus densément réparties et sont caractérisées par une abondance relative de *traces superficielles*.

Les variations d'intensité de bioturbation, évaluées d'une part en calculant les taux de mélange des sédiments superficiels et, d'autre part, en estimant l'abondance et la diversité des traces, peuvent être directement reliées à l'écologie des trois bassins profonds étudiés.