

# La matière organique dans les dépôts de l'archipel de Kerguelen. Distribution spatiale et saisonnière

Matière organique  
Distribution spatiale  
Cycles saisonniers  
Iles Kerguelen  
Organic matter  
Spatial distribution  
Seasonal cycles  
Kerguelen Islands

D. Delille <sup>a</sup>, F. Gadel <sup>b</sup>, G. Cahet <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire Arago, 66650 Banyuls-sur-Mer, France.

<sup>b</sup> Centre de Recherches de Sédimentologie marine, Université de Perpignan, 66025 Perpignan, France.

Reçu le 8/9/78, révisé le 13/11/78, accepté le 20/11/78.

## RÉSUMÉ

La matière organique représentée par le carbone et l'azote offre dans les dépôts sous climat subantarctique une distribution spatiale directement contrôlée par les processus sédimentologiques, se traduisant par une diminution très nette des teneurs vers le large et un enrichissement sur les côtes ouest liées à l'action des courants d'origine éolienne.

L'analyse physicochimique du matériel organique traduit son origine essentiellement marine.

Les cycles saisonniers qui affectent la matière organique restent marqués malgré la température relativement basse et peu variable tout au long de l'année. Un enrichissement des dépôts en matériel organique se manifeste en hiver et en été. Il intervient une succession logique dans le temps entre l'apport lui-même et les processus de dégradation.

La liaison est très nette dans le temps entre l'évolution du carbone hydrolysable, fraction facilement assimilable, et la distribution des populations microbiennes hétérotrophes. Le carbone minéral semble également en rapport avec les fluctuations des biomasses bactériennes, rendant compte en partie de leur activité.

Au niveau du bilan du carbone transité dans les couches superficielles des analogies s'observent avec les mécanismes qui se manifestent sous climat méditerranéen; des différences interviennent toutefois quant à l'amplitude des cycles et leur rythme beaucoup plus irrégulier en domaine méditerranéen.

*Oceanol. Acta*, 1979, 2, 2, 181-193.

## ABSTRACT

Spatial and seasonal distribution of organic matter in Kerguelen island deposits

The spatial distribution of organic carbon and nitrogen in superficial subantarctic deposits depends essentially on sedimentological processes. Organic matter concentration decreases offshore, and is more pronounced close to the western coasts, under the influence of wind-derived currents.

The physico-chemical nature of this organic material suggests a marine origin. Seasonal fluctuations which affect the sediments occur despite relatively low temperature variations throughout the year, and increasing concentration is observed in winter and summer. A logical time sequence between inputs and decomposition processes may also be observed.

This sequence is particularly noticeable as far as the evolution of hydrolysable carbon (an easily assimilable fraction) and the distribution of heterotrophic microbial populations are concerned. Mineral carbon appears also to be related to variations in the bacterial biomasses and partially responsible for their activity.

The carbon budget in the superficial layers shows similar features with processes observed under Mediterranean climatic conditions, but with certain differences concerning the amplitude of the cycles and their rhythm, which is much less regular in the Mediterranean region.

*Oceanol. Acta*, 1979, 2, 2, 181-193.

## INTRODUCTION

Poursuivant l'étude de la matière organique sur les zones littorales et les plateaux continentaux, nous avons été amenés à reconnaître sa distribution et ses caractéristiques physicochimiques dans les domaines lagunaires et la zone littorale méditerranéenne (Cahet, Gadel, 1976), puis sur le plateau continental catalan (Gadel, 1975). La possibilité de disposer de prélèvements en zone subantarctique (archipel de Kerguelen, Delille, 1977 *b*) nous a permis de transposer les mêmes méthodes d'étude à cette région climatique afin de disposer d'éléments de comparaison entre des milieux géographiques bien définis.

Deux orientations principales ont dominé nos recherches : la première correspond à l'analyse de la distribution spatiale de la matière organique dans divers fjords et sur le plateau continental, selon plusieurs radiales, la seconde porte sur l'examen des fluctuations saisonnières affectant le matériel organique et certaines de ses fractions majeures dans un fjord (fjord Bossière) au niveau d'un site bien défini et sur un ensemble de stations représentant une moyenne générale.

Un dosage systématique du carbone nous a paru préférable à celui de la matière organique, d'une part pour reconnaître le taux de matériel organique inclus dans les dépôts, d'autre part pour rendre compte des apports et pertes saisonnières, apparents au niveau d'un bilan général intégrant les enrichissements et les appauvrissements consécutifs aux transformations et lessivages. Le carbone constitue un élément représentatif de la matière organique totale; à ce titre, ses fluctuations traduisent de manière précise ces divers phénomènes. La possibilité d'analyser deux fractions organiques, de caractéristiques physicochimiques bien définies, permet de préciser ces mêmes processus (Cahet, Gadel, 1976) :

- une première fraction, généralement abondante, correspond à des substances relativement résistantes, à l'état particulaire ou adsorbé (*carbone lié et particulaire - CLP*);
- une seconde, de moindre importance quantitative (*carbone hydrolysable - CH*) est constituée de composés participant activement aux processus biogéochimiques (Gorshkova, 1955; Trichet, 1966). Elle dépend du caractère labile des composés azotés et des hydrates de carbone qui constituent parfois une part non négligeable de la matière organique.

## LES MILIEUX D'ÉTUDE

Situé par 49° de latitude sud et 70° de longitude est, l'archipel de Kerguelen représente, avec l'île Heard, légèrement plus au sud, les seules parties émergées du

plateau connu sous le nom de *Kerguelen-Gaussberg* (fig. 1). Il est constitué par plus de 400 îles et îlots dont la superficie totale atteint 6 500 km<sup>2</sup> pour un développement de côtes de 2 800 km. De nombreuses péninsules ne sont reliées à la terre principale ou *Grande Terre* que par des cordons très étroits. Si la plus grande des îles mesure 200 km<sup>2</sup>, les îlots inférieurs au kilomètre carré sont légion.

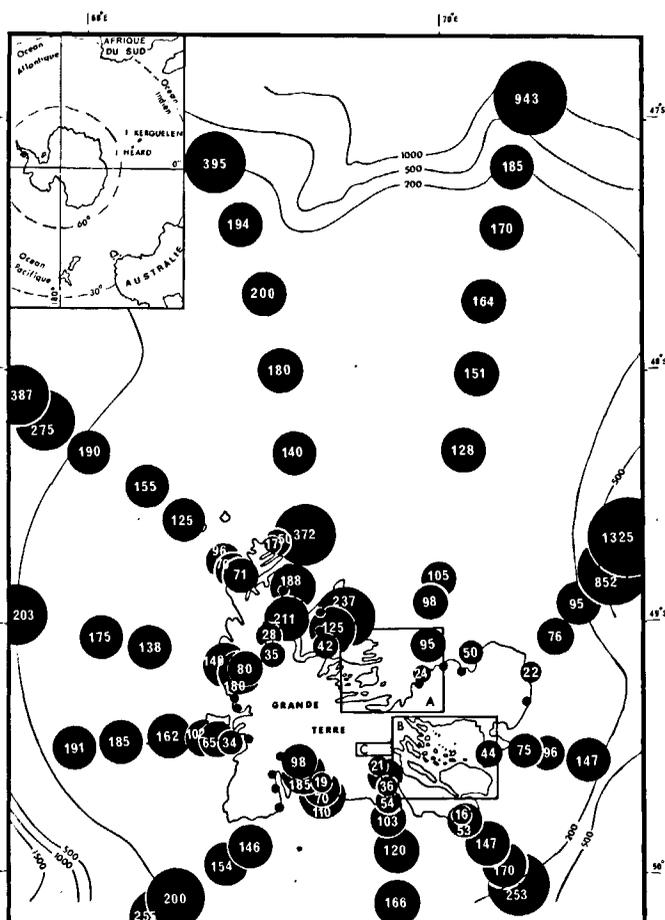
Sauf en ce qui concerne la baie du Morbihan, les données bathymétriques sont encore fragmentaires. Les limites du plateau continental restent imprécises. Sa superficie équivaut à environ 6 à 7 fois celle des terres émergées, soit 45 000 km<sup>2</sup>; quant à sa profondeur moyenne, elle doit être voisine de 200 m.

Au sud-est de l'archipel de Kerguelen, le vaste golfe du Morbihan (30 × 20 km environ) s'ouvre sur l'Océan Indien par la Passe Royale, large de 12 km (fig. 2).

Figure 1

Situation géographique de l'archipel de Kerguelen : A, golfe des Baleiniers; B, golfe du Morbihan; C, fjord Bossière. Profondeur des prélèvements sur le plateau continental (le diamètre des cercles est proportionnel à la profondeur).

*Location map of Kerguelen archipelago. Sample depths on the shelf (circle is proportional to depth).*



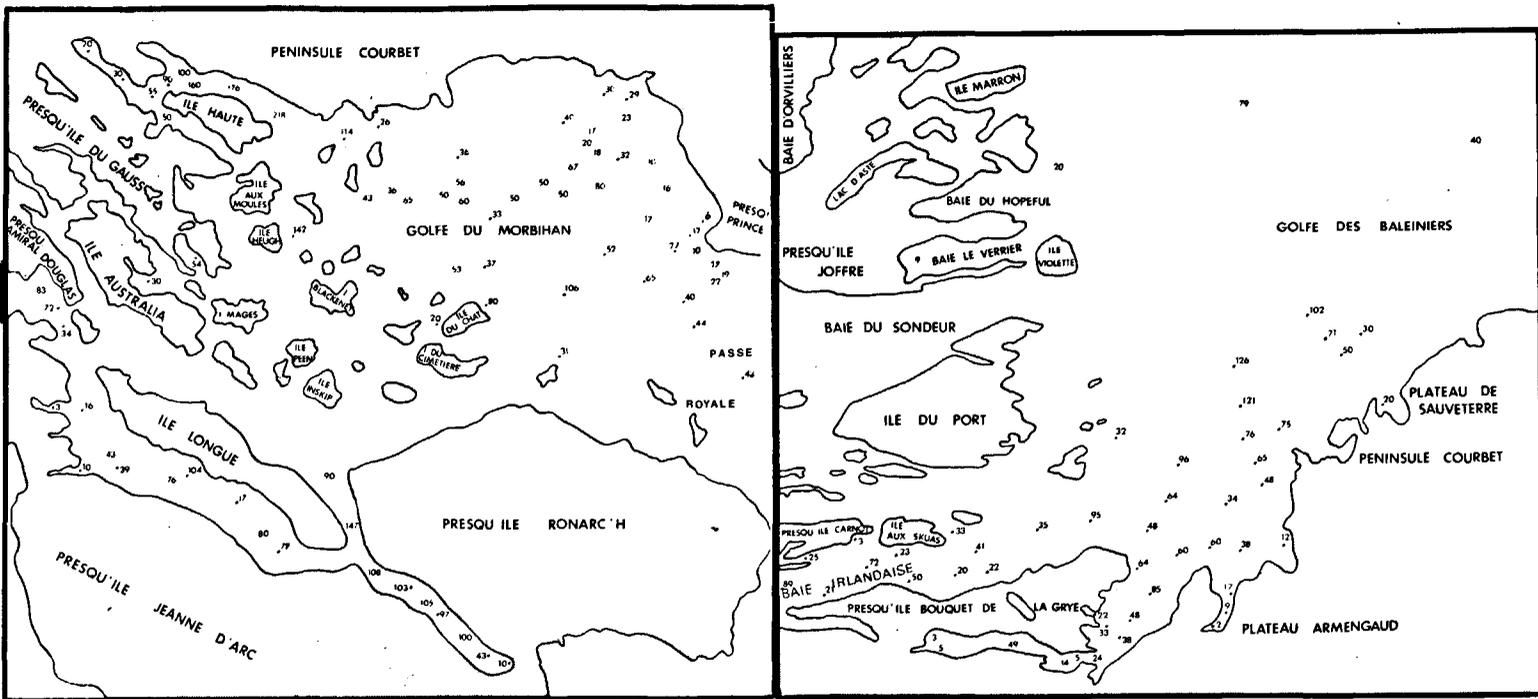


Figure 2  
 Situation géographique de la baie du Morbihan et du golfe des Baleinières : C, fjord Bossière.

Les échanges entre la baie et les eaux océaniques semblent ainsi relativement aisés. Il faut noter toutefois la présence d'un seuil dont la profondeur ne dépasse pas 40 m. En remontant vers le nord-ouest, après une première zone libre, on rencontre un réseau complexe d'îles, auquel succède la région des fjords, réceptacles naturels des eaux de pluie et de fonte des neiges.

Le plus long, le fjord Bossière (fig. 3) atteint un développement d'une quinzaine de kilomètres pour une largeur n'excédant pas quelques dizaines de mètres aux passages les plus resserrés. Onze points de prélèvements sont régulièrement répartis le long de ce fjord, le plus continental de l'archipel (Delille, 1977 a) (fig. 2). L'accès de la zone la plus en amont (point 0) est rendu difficile par la présence d'un banc de moules situé entre les stations M et N ne laissant qu'un étroit chenal, décelable uniquement à marée basse. Le point 0, seule station où les eaux soient sensiblement adoucies, n'a

Location map of the golfe du Morbihan and the golfe des Baleinières.

pu être étudié que de manière sporadique et est exclus des diverses moyennes.

Toutes les valeurs numériques des dix autres stations sont intégrées en un point représentatif de l'ensemble défini comme *Bossière moyenne*. Le détail des résultats figure dans les travaux précédents (Delille, 1977 a et b). Leur analyse statistique fera l'objet d'une étude ultérieure. Sur le plateau continental (fig. 1), les radiales prolongent les fjords principaux de l'archipel. Leur choix a été réalisé afin d'assurer une couverture optimale du plateau à partir des fjords les plus importants. Les prélèvements effectués au carottier Reineck court couvrent toute une gamme de sédiments, de sables à éléments grossiers à des vases silteuses (pH 6,00 à 7,80 Eh + 250 à - 150 mV, Delille, 1977 b). L'utilisation de ce carottier est justifiée par l'obtention de sédiments non perturbés permettant la récupération de la couche superficielle, (0-2 cm), objet de l'étude.

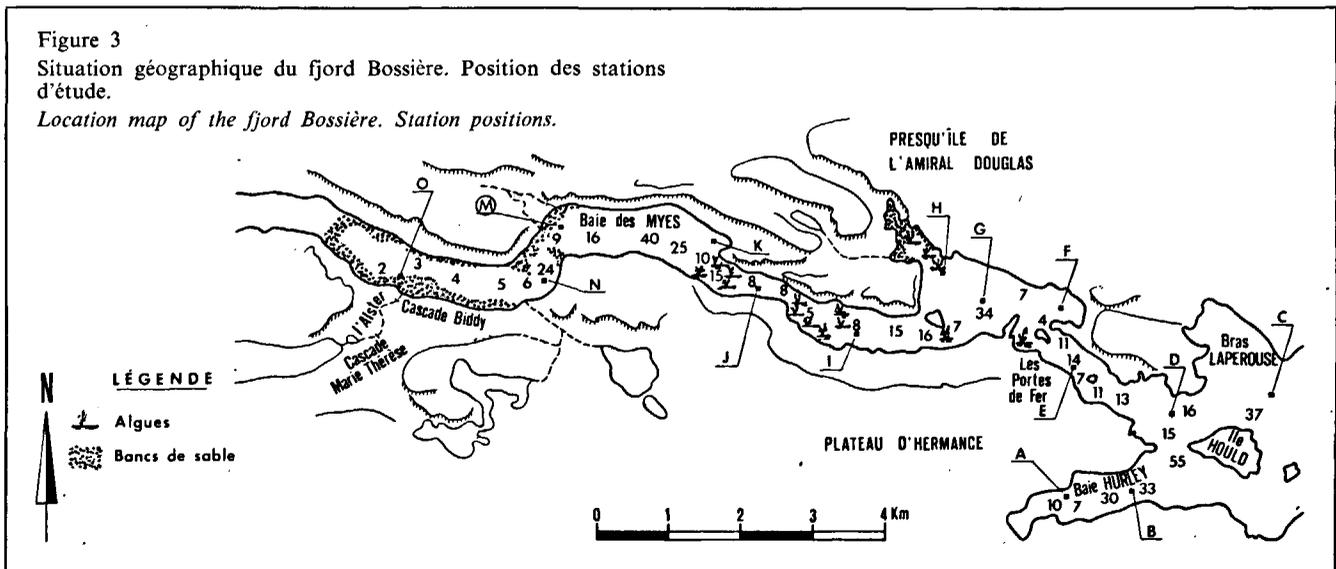


Figure 3  
 Situation géographique du fjord Bossière. Position des stations d'étude.  
 Location map of the fjord Bossière. Station positions.

## MÉTHODES D'ÉTUDE

Diverses techniques d'analyse de la matière organique sont généralement utilisés :

- *l'oxydation par voie humide*, presque aussi ancienne que l'oxydation par voie sèche (Walkley, Black, 1934; Piper, 1947; Anne, 1947), a été améliorée (Wakeel, Riley, 1956). Elle est encore fréquemment employée (Cortecchi, 1975; Wanatabe, 1975; Koyama *et al.*, 1975). Cette méthode est faussée par la présence de matériel organique résistant à la minéralisation (Buchanan, Longbottom, 1970; Gadel, Ragot, 1973). Toutefois, la présence de tels produits, bien que possible dans le golfe du Morbihan, ne permet pas d'expliquer les imprécisions de la méthode, surtout au niveau d'un cycle saisonnier. Tous les principes réducteurs peuvent interférer ( $S^{--}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe^{++}$ , etc.). Bien qu'ils présentent une proportion non négligeable dans un grand nombre d'échantillons, leur influence ne dépasse tout de même pas quelques pourcents du résultat obtenu.

- les résultats obtenus par *perte au feu* facilitent la détermination des prises d'essai optimales pour chaque échantillon et permettent de surmonter le handicap du domaine d'utilisation assez restreint de la colorimétrie. Bien qu'améliorée, la précision de cette méthode reste insuffisante pour l'analyse des cycles saisonniers. Notre choix final s'est porté sur la technologie Leco utilisant la *combustion par voie sèche* avec mesure par conductibilité thermique du  $CO_2$  dégagé (Cahet, Gadel, 1976). Seules les mesures obtenues par cette méthode seront prises en considération dans la présente étude.

### Le carbone organique et ses différentes formes

La méthode comprend l'oxydation du matériel carboné par l'oxygène dans un four à induction, (1 200°C), la purification du gaz carbonique dégagé au cours de la combustion par fixation des autres produits gazeux (composés soufrés, chlore, eau...), l'évaluation du  $CO_2$  par conductibilité thermique.

Pour l'analyse du carbone organique total (C org. T), l'échantillon finement broyé (250 mg) est décarbonaté à l'acide orthophosphorique 1 M dans une nacelle en aluminium à chaud (70°C). Après siccité complète, la nacelle et son contenu sont introduits dans un creuset à combustion (Cauwet, 1975).

Pour obtenir la teneur en *carbone organique lié et parti-*

*culaire (CLP)* du sédiment, le dosage s'effectue sur une aliquote du résidu insoluble sec, après décarbonatation de l'échantillon brut (HCl 10 % à 70°C) et lavage à l'eau distillée. La valeur obtenue est rapportée au poids de sédiment total.

La fraction organique mise en solution au cours de la décarbonatation, souvent négligée, renferme des composés dissous ou faiblement liés au sédiment (*carbone hydrolysable - CH*). Compte tenu de l'hydrolyse relativement douce, elle ne représente toutefois pas l'ensemble du carbone hydrolysable obtenu par hydrolyse acide complète (HCl 6 N à reflux). Par différence entre le taux de carbone organique total et la teneur en carbone CLP on obtient le pourcentage de cette fraction carbonée (*CH*). Le *carbone minéral* ( $C_m$ ) est obtenu par différence entre le carbone total et le carbone organique total.

### L'azote organique

La méthode de Kjeldahl reste le procédé standard. Le dosage de l'ammonium formé peut s'effectuer par entraînement à la vapeur ou par colorimétrie. Dans ce dernier cas, l'ensemble de la méthode peut être automatisée (Kammerer *et al.*, 1967; McDaniel *et al.*, 1967; Lagarde, 1972). Des méthodes semi-automatisées utilisant des sondes spécifiques sont également possibles (Bremmer, Tabataba, 1972; Stevens, 1976). Pour les faibles teneurs, la précision des analyseurs C, H, N, n'équivaut pas à celles des méthodes Kjeldahl (Giraud G., communication personnelle). Nous nous en sommes tenus à la méthode classique d'entraînement à la vapeur avec dosage en retour de l'ammonium distillé.

L'azote organique est obtenu par différence entre l'azote total (Kjeldahl) et l'azote ammoniacal dosé par distillation directe sans minéralisation.

D'autres paramètres relatifs aux différentes formes de l'azote ( $NH_3$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ) ont été analysés, mais ne figurent pas dans la présente note (voir Delille, 1977 a et b).

### Estimation de la microflore hétérotrophe

Les numérations bactériennes ont été réalisées à l'aide d'une méthode de dilution en milieu liquide (Pochon, Tardieux, 1962) sur le milieu de Zobell 2216 E (Oppenheimer, Zobell, 1952). La durée de l'incubation est de 20 jours à 20°C.

## RÉSULTATS

### Distribution spatiale de la matière organique

Avec une teneur moyenne en *carbone organique* de 0,85 % en poids sec PS, les valeurs relevées dans les dépôts du plateau continental de Kerguelen concordent parfaitement avec celles des standards océaniques. Dans l'ensemble, elles sont toutefois légèrement supérieures aux taux observés dans les dépôts du plateau continental en Méditerranée occidentale : 0,35 à 0,85 % (Gadel, 1975).

Certains secteurs géographiques présentent un enrichissement marqué en matériel organique, lié aux conditions particulières régnant dans les fjords. Avec un maximum de 8,18 % C org. PS, les teneurs sont malgré tout encore assez éloignées de celles fournies par Strom (1955) pour un fjord de Norvège (23 %), mais proches des valeurs relevées par Folger (1972) dans certains bassins côtiers des États-Unis (< 11 % C org.).

Les cartes de distribution spatiale du carbone organique pour la fin de l'été font apparaître un très fort gradient décroissant de la côte vers le large (fig. 4). Les golfes étudiés apparaissent ainsi très nettement enrichis par rapport à l'ensemble du plateau continental : concentration moyenne plus que doublée pour le golfe du Morbihan (1,85 % C org. PS), résultat en accord avec ceux de Lang (1971) (moyenne 1,93 % C org. PS).

A l'intérieur même des golfes du Morbihan et des Baleiniers, des petits bassins isolés, aux dépôts généralement anoxiques, présentent les teneurs les plus élevées.

Dans la plupart des cas, les teneurs en *carbone lié et particulaire CLP* correspondent à l'essentiel du matériel organique. Le *carbone hydrolysable CH* représente un pourcentage relativement constant du carbone organique total. Son importance tend à s'élever dans les sédiments anoxiques riches en matière organique de quelques stations des fjords à l'ouest de la baie du Morbihan. Il peut même devenir prépondérant dans certains de ces dépôts et représenter jusqu'à 70 % du carbone organique. Ces derniers résultats confirment les données antérieures (Cahet, Gadel, 1976) obtenues sur une station située dans le Bras Baudissin. Ce type de sédiment, caractérisé par sa richesse en fractions hydrolysables au turn-over rapide, représente toutefois un cas extrême qui reste exceptionnel.

Les dépôts marins de l'archipel de Kerguelen peuvent être considérés comme riche en *azote organique* (fig. 5) comparativement aux sédiments du plateau continental catalan (Gadel, 1975). La distribution des teneurs en azote organique dans les dépôts fait apparaître une moyenne générale de 2,2 % N org. PS plus faible que celle donnée par Lang (1971) (3,0 N org. PS). Toutefois l'échantillonnage inclut de nombreux sédiments sableux appauvris en matériel organique, ce qui peut expliquer cette faible discordance. Pour les vases du golfe du Morbihan les teneurs évoluent entre 0,9 et 6,9 % N org. PS, valeurs en accord avec celles de Lang (1971) pour la même région (1,0 à 7,0 N org. PS).

La distribution de l'azote organique rend compte des phénomènes majeurs qui affectent la répartition du carbone organique : gradient décroissant de la côte vers le large sur le plateau continental, gradient croissant de l'ouest vers l'est dans le golfe des Baleiniers, accroissement des valeurs dans le golfe du Morbihan.

Les valeurs du *rapport C/N* s'accordent avec celles de Lang (1971) bien que leur distribution soit un peu plus irrégulière : moyenne de 6,86 pour le golfe du Morbihan; moyenne de 6,57 pour la même région d'après Lang (1971) (fig. 6). Le parallélisme des répartitions spatiales du carbone et de l'azote organiques se trouve souligné par la distribution relativement homogène du rapport C/N. Seules les stations très proches de la côte s'individualisent par des valeurs plus élevées : moyenne de 12,53 pour les stations de la zone intertidale.

Dans ces régions volcaniques dépourvues de séries sédimentaires carbonatées, les dépôts sont généralement pauvres en *carbonates*; les teneurs en carbone minéral ne dépassent pas 1 %  $C_m$  PS (fig. 7). Les seuls enrichissements perceptibles sont liés au développement biogène (bryozoaires, moules, jusqu'à 6 %  $C_m$  PS) et à un degré moindre à la précipitation chimique des carbonates liée aux processus de respiration biologique. Les teneurs des sédiments du golfe du Morbihan varient de 0,1 à 1 %  $C_m$  PS pour une valeur moyenne de 0,41 %  $C_m$  PS (fig. 7). L'agrément avec les résultats de Lang (1971) pour la même région est excellent. Les dépôts du golfe des Baleiniers et du plateau continental montrent des teneurs encore plus faibles, avec des moyennes respectives de 0,19 et 0,25 % PS. Seule la région sud-est où les sédiments sont très riches en bryozoaires se distingue très nettement de la moyenne générale par des taux élevés de l'ordre de 3,5 à 6 %  $C_m$  PS.

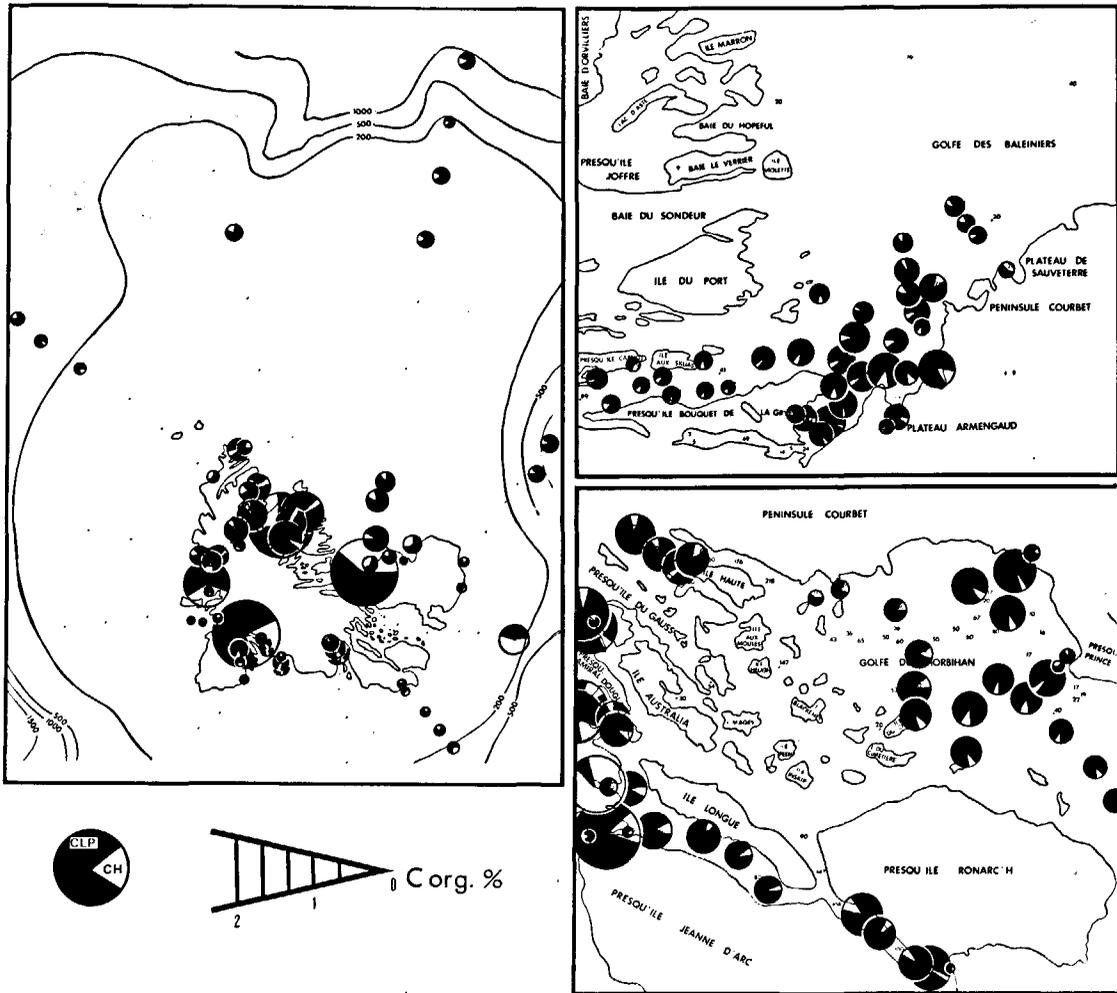


Figure 4  
Répartition spatiale  
des teneurs en car-  
bone organique  
*Spatial distribution  
of organic carbon.*

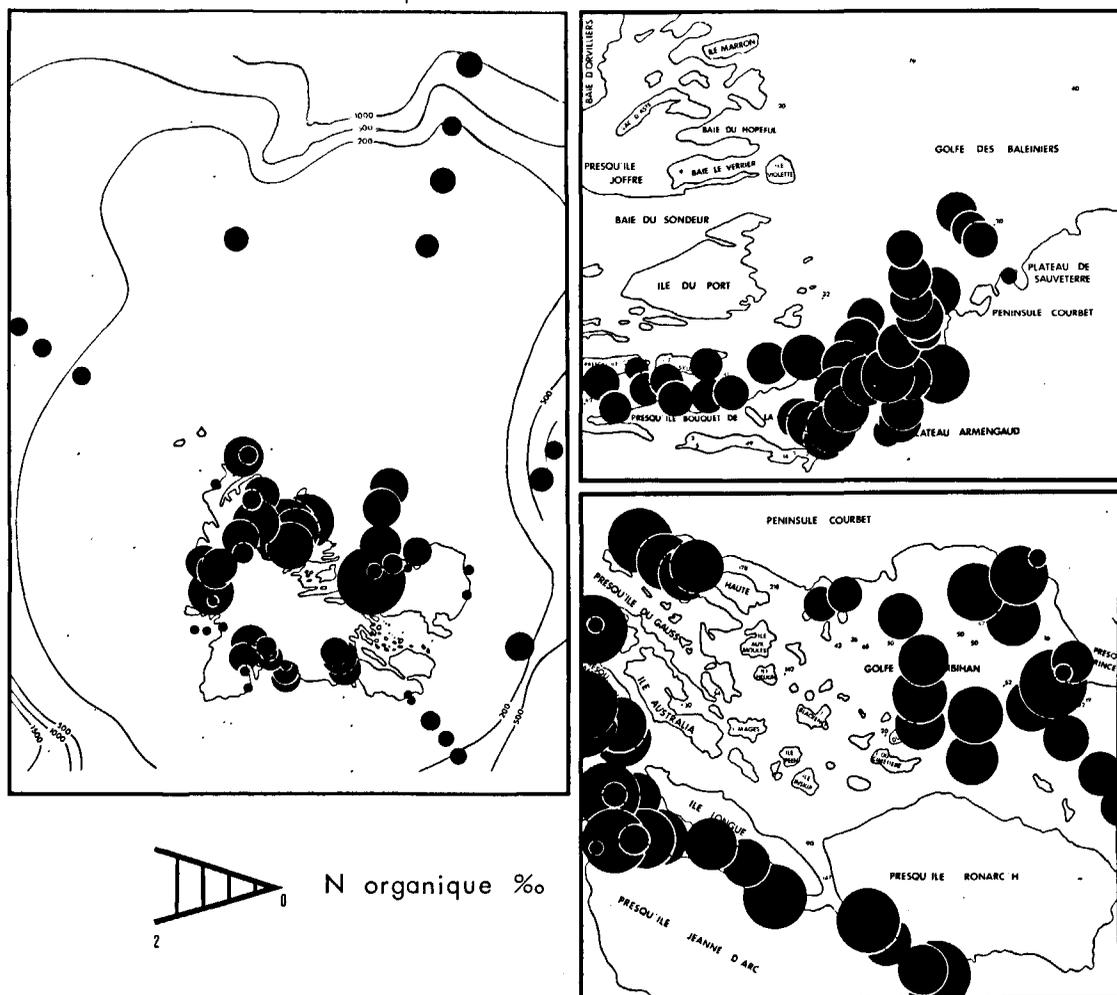


Figure 5  
Répartition spatiale  
des teneurs en azote  
organique.  
*Spatial distribution  
of organic nitrogen.*

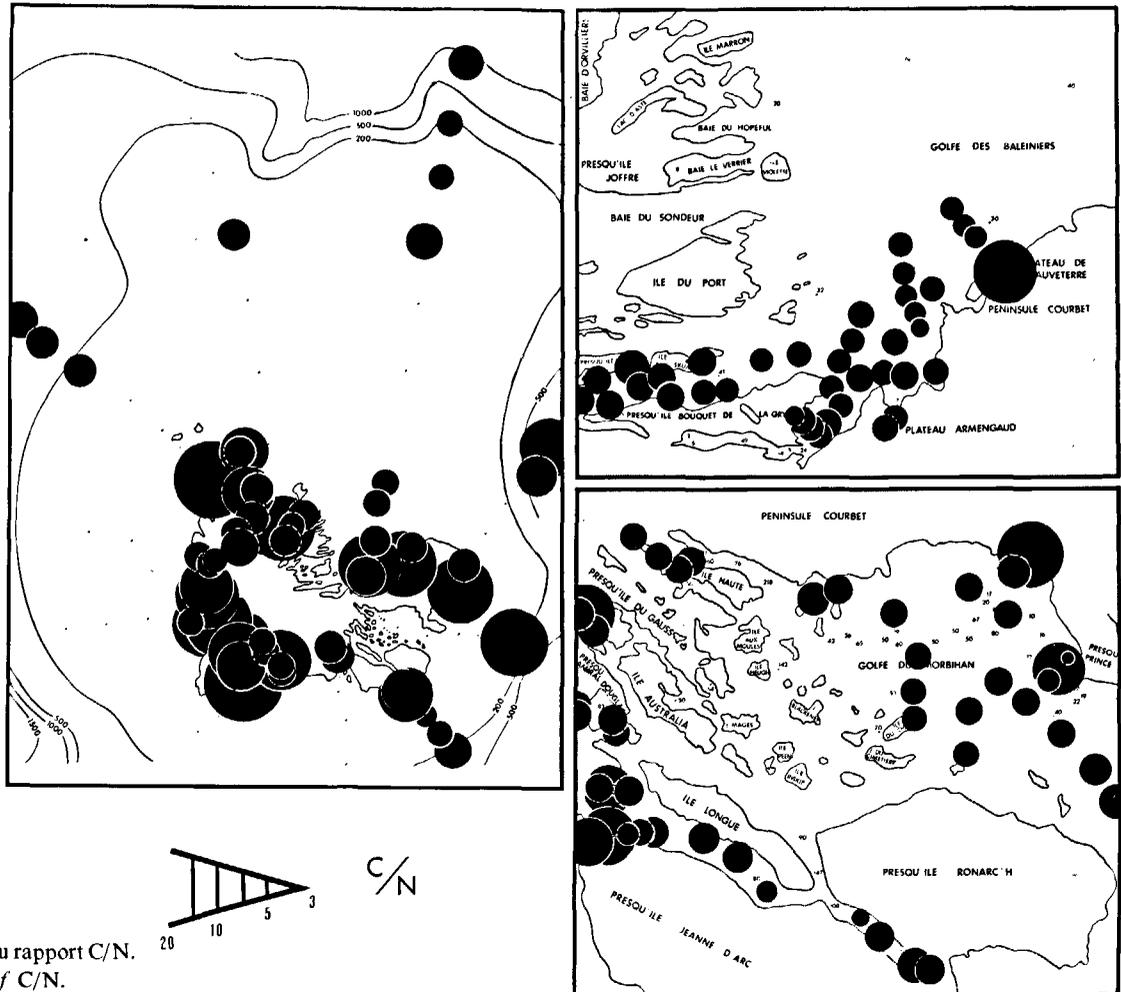


Figure 6  
Répartition spatiale du rapport C/N.  
Spatial distribution of C/N.

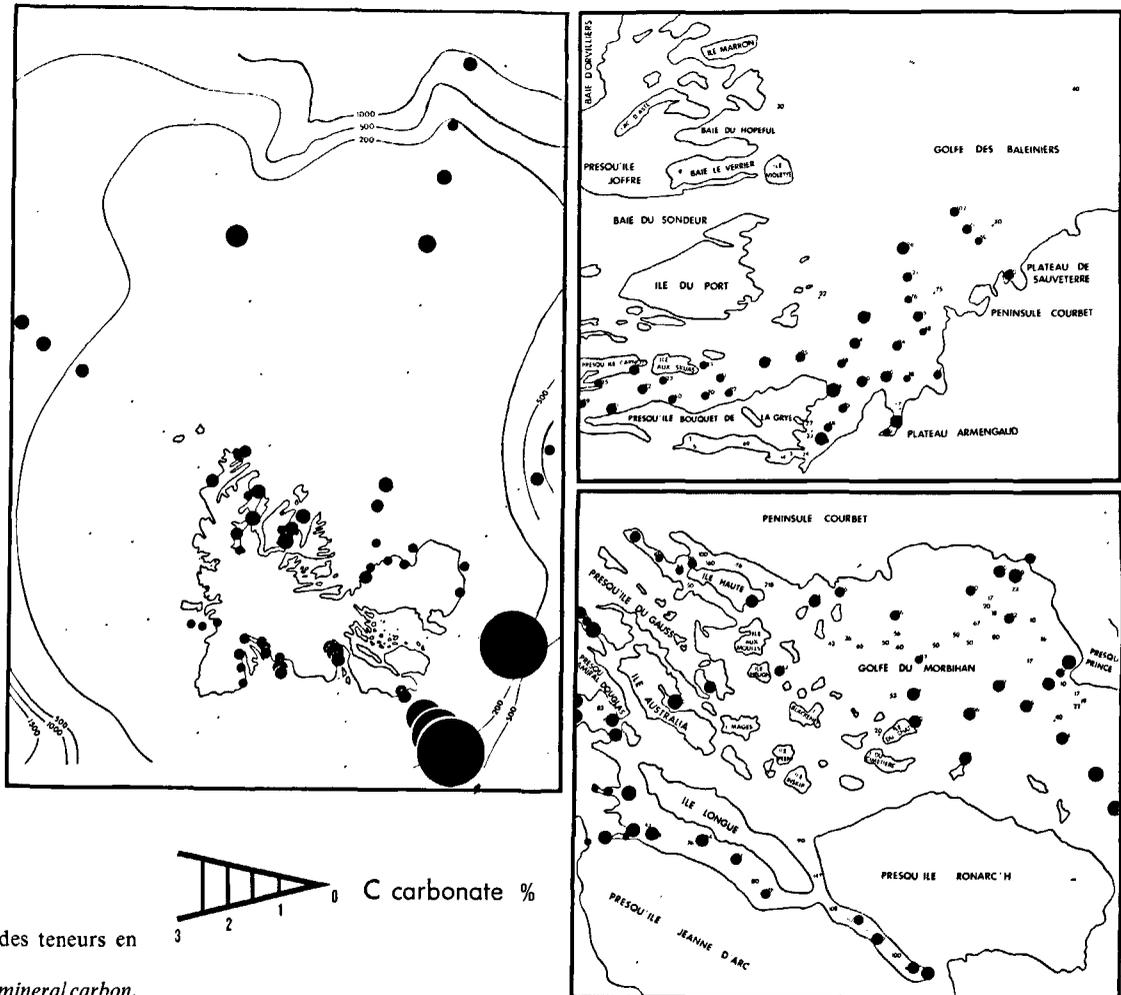
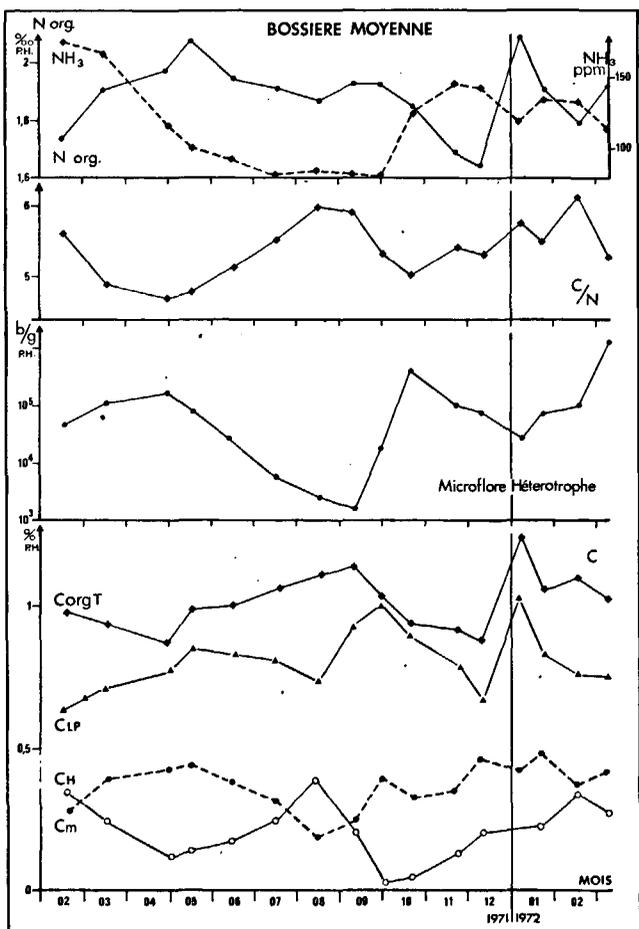


Figure 7  
Répartition spatiale des teneurs en carbonates.  
Spatial distribution of mineral carbon.

**Variations saisonnières de la matière organique**

Les variations saisonnières sont relativement peu différentes pour le *carbone lié et particulaire (CLP)* d'une part et le *carbone hydrolysable (CH)* d'autre part (fig. 8 et 9). Minimales en automne, les valeurs du CLP s'élèvent plus ou moins régulièrement pendant l'hiver et jusqu'au début du printemps. Interviennent ensuite successivement une période de décroissance (minimum à la fin du printemps), puis une brutale remontée qui mène à un maximum au cœur de l'été (tableau 1).

Figure 8  
Cycles annuels du carbone, de l'azote organique, du rapport C/N et de la microflore hétérotrophe (moyenne des stations du fjord Bossière).  
*Seasonal cycles of carbon, organic nitrogen, C/N and heterotrophic microflora (average for fjord Bossière stations).*



L'évolution saisonnière du CH présente également deux maximums mais le premier est décalé dans le temps : août au lieu d'octobre. Ce décalage, apparent si l'on considère la moyenne des stations de Bossières (fig. 8), disparaît pour certaines stations particulières comme le point M (fig. 9).

Pour l'azote organique, les fluctuations sont assez régulières (fig. 8 et 9) et relativement proches de celles décrites par Ho et Lane (1973) pour un sédiment anoxique d'estuaire de Louisiane et par Driscoll (1975) pour la Buzzard Bay (fig. 10). Le cycle est bimodal

Figure 9  
Cycles annuels du carbone, de l'azote organique, du rapport C/N et de la microflore hétérotrophe (station M du fjord Bossière).  
*Seasonal cycles of carbon, organic nitrogen, C/N and heterotrophic microflora (fjord Bossière M station).*

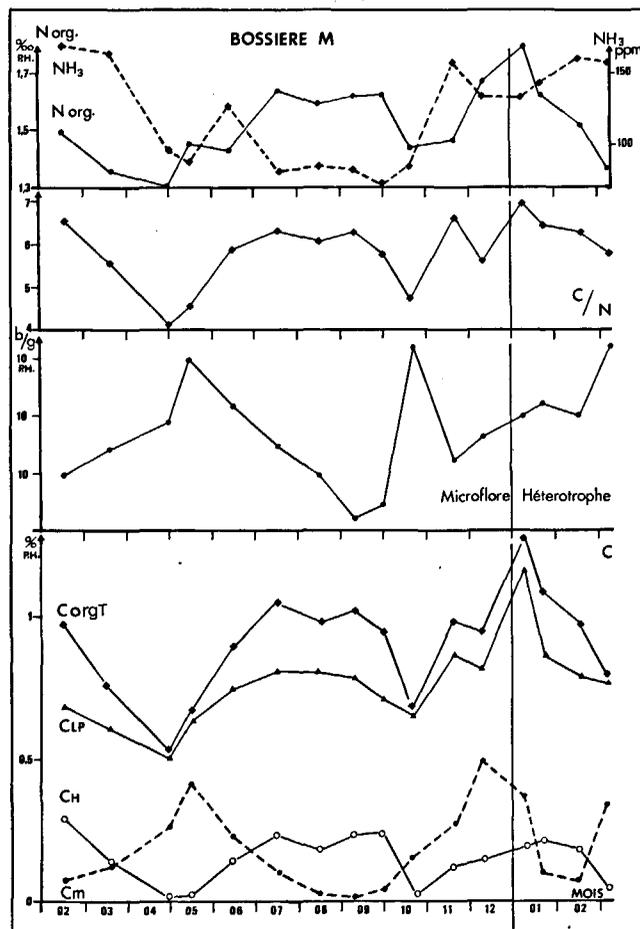


Tableau 1

Données numériques sur les variations saisonnières des teneurs en carbone organique total (C. org. T), hydrolysable (CH), lié et particulaire (CLP), minéral ( $C_m$ ) et en azote organique (N org.) dans les dépôts des stations du fjord Bossière (valeurs rapportées au poids humide).

Numerical data on seasonal variations of total organic carbon (C org. T), hydrolysable carbon (CH), bound and particulate carbon (CLP), mineral carbon ( $C_m$ ) and organic nitrogen (N org.) in the deposits of the fjord Bossière.

## A. Bossière - station M

Date	19/2	17/3	29/4	11/5	11/6	16/7	14/8	8/9	29/9	22/10	23/11	9/12	7/1	22/1	18/2	7/3
C org. T (%)	0,97	0,75	0,52	0,66	0,88	1,04	0,98	1,02	0,95	0,68	0,98	0,94	1,36	1,07	0,97	0,80
CLP (%)	0,68	0,61	0,51	0,64	0,74	0,81	0,80	0,79	0,71	0,66	0,86	0,81	1,17	0,86	0,79	0,76
CH (%)	0,29	0,14	0,01	0,02	0,14	0,23	0,18	0,23	0,24	0,02	0,12	0,14	0,19	0,21	0,18	0,04
N (%)	1,49	1,35	1,28	1,46	1,44	1,64	1,30	1,52	1,63	1,44	1,47	1,68	1,95	1,64	1,58	1,30
C/N	6,51	5,55	4,06	4,52	6,11	6,34	6,12	6,29	5,82	4,72	6,66	5,59	6,97	6,52	6,38	5,79
$C_m$ (%)	0,08	0,13	0,26	0,41	0,23	0,10	0,02	0,01	0,04	0,15	0,27	0,49	0,37	0,10	0,07	0,34

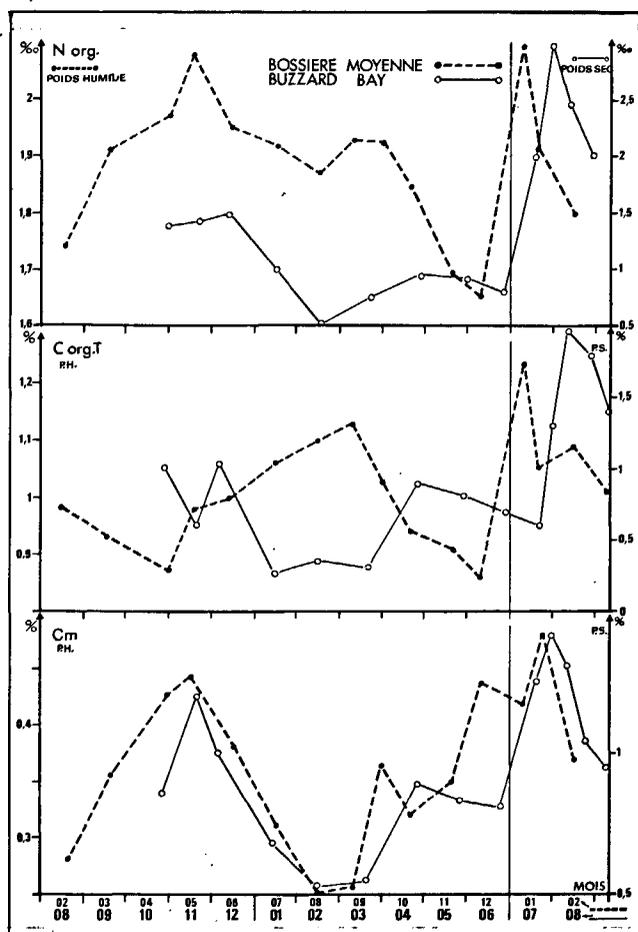
## B. Bossière - moyenne de 10 stations

Date	19/2	17/3	29/4	11/5	11/6	16/7	14/8	8/9	29/9	22/10	23/11	9/12	7/1	22/1	18/2	7/3
C org. T (%)	0,98	0,94	0,87	0,99	1,00	1,06	1,11	1,14	1,03	0,93	0,92	0,87	1,24	1,05	1,10	1,02
CLP (%)	0,64	0,71	0,77	0,85	0,83	0,81	0,73	0,93	1,01	0,89	0,79	0,67	1,02	0,83	0,76	0,75
CH (%)	0,35	0,24	0,11	0,14	0,17	0,24	0,39	0,21	0,02	0,04	0,12	0,20	0,22	0,22	0,34	0,27
N (%)	1,74	1,91	1,95	2,08	1,95	1,92	1,87	1,93	1,93	1,85	1,69	1,63	2,15	1,92	1,79	1,93
C/N	5,63	4,92	4,46	4,76	5,13	5,52	5,96	5,91	5,34	5,03	5,44	5,34	5,76	5,47	6,14	5,28
$C_m$ (%)	0,27	0,39	0,42	0,44	0,38	0,31	0,18	0,24	0,39	0,32	0,35	0,46	0,42	0,48	0,36	0,42

Figure 10

Comparaison des fluctuations saisonnières du carbone et de l'azote organiques et du carbone minéral dans les dépôts de la baie du Morbihan et de la Buzzard Bay (Driscoll, 1975).

Comparison of seasonal fluctuations of organic carbon and nitrogen and mineral carbon in Morbihan and Buzzard Bay deposits.



avec un maximum en hiver et un autre en été. Le parallélisme entre l'évolution de l'azote organique et celle du carbone organique est net et logique. Driscoll signale une corrélation très étroite carbone-azote organique. Cette relation est également décelable dans les dépôts du golfe du Morbihan (fig. 8).

L'évolution saisonnière des carbonates ( $C_m$ ) est régulière et présente deux maximums bien différenciés : fin du printemps - début de l'été, fin de l'automne.

Driscoll (1975) obtient un cycle identique dans une baie peu profonde du Massachusetts (Buzzard Bay). Le rapprochement de ces résultats avec les nôtres est spectaculaire. Les deux courbes correspondant à l'évolution des carbonates se superposent presque exactement (fig. 10).

## DISCUSSION

## Distribution spatiale

La distribution spatiale de la matière organique se trouve contrôlée vers le large par plusieurs facteurs. L'accroissement de la profondeur d'eau qui accentue la minéralisation du matériel organique au cours de son transit vers le fond et l'abondance des tests de diatomées au niveau du dépôt limitent l'importance de la fraction organique déposée. La corrélation relative entre les distributions du carbone organique et de la teneur en eau, bien qu'elle soit en partie masquée par l'influence de l'éloignement à la côte, témoigne d'une

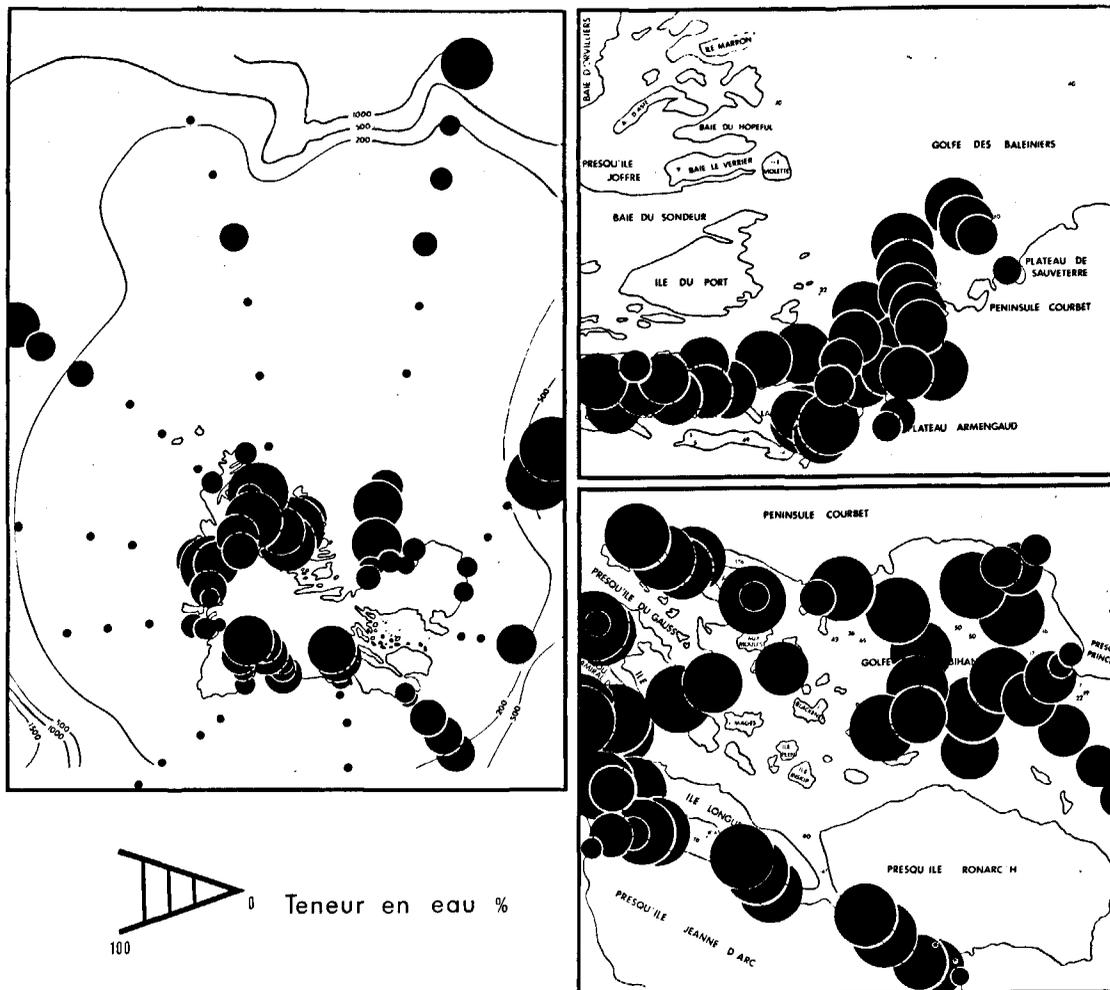


Figure 11  
Répartition spatiale  
des teneurs en eau  
des dépôts.  
*Spatial distribution  
of water content in  
sediments.*

action des facteurs hydrodynamiques contrôlant ces deux paramètres (fig. 11). Les fjords voient souvent s'accumuler un taux de matière organique relativement important par suite des conditions très particulières du milieu : caractère anoxique, effet de seuil...

La baie Irlandaise, au sud-ouest du golfe des Baleinières, au contraire, s'individualise par des teneurs nettement plus faibles. Sa situation, directement exposée aux vents d'ouest dominants, associée à des dimensions plus vastes et à un caractère plus ouvert lié à l'absence de seuil, favorise un transit du matériel organique en direction de la côte est du golfe. Un gradient croissant ouest-est est ainsi très apparent dans le golfe des Baleinières.

L'origine essentiellement marine du matériel organique inclus dans les dépôts semble confirmée par diverses données :

- la présence dans les sédiments de débris d'algues, de tubes de vers, de spicules d'éponge et de tests de diatomées. Les diatomées peuvent représenter 50% de certains dépôts du golfe du Morbihan (Lang, 1971); Les sédiments très profonds à la lisière du plateau continental sont presque exclusivement constitués de débris de diatomées (diatomites):
- la richesse en fraction labile représentée par le CH.
- les fortes teneurs en composés azotés soulignées notamment par la faible valeur du rapport C/N. Les valeurs de ce rapport dans les dépôts (généralement

voisines de 6) sont très proches des données connues pour les matériaux d'origine marine (algues, diatomées...). Il faut préciser que l'apport d'origine terrestre, relativement modeste en importance (zone littorale pauvre en végétation), peut présenter par ailleurs des valeurs assez basses du rapport C/N (Tourbières d'*Acoena* C/N = 8.5. Lang, 1971).

Pour trancher de manière définitive les incertitudes sur l'origine autochtone ou allochtone de la matière organique des sédiments des fjords, il paraît souhaitable de mener des études plus approfondies comme l'étude du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (Nissebaum, Kaplan, 1972; Gadel, Letolle, 1974), du rapport ribose/glucose (Mopper, 1973; Degens, Mopper, 1975). Toutefois, une étude antérieure (Debyser *et al.*, 1977) réalisée sur un sédiment très anoxique du Bras Baudissin, fjord où l'influence allochtone devrait être la plus sensible, révèle des particularités qui traduisent une origine indéniablement marine. Les caractéristiques physicochimiques des substances humiques s'apparentent à celles du matériel marin. Les acides humiques (fractions insolubles à pH 2 des composés alcalinosolubles) du fjord Baudissin présentent des rapports H/C et N/C relativement élevés : H/C = 1,41 et N/C = 0,110 comparativement aux valeurs relevées pour cette même fraction dans des dépôts typiquement planctoniques (baie de Bourgneuf H/C = 1,40 et N/C = 0,100 et dans des sédiments d'origine continentale (golfe de Guinée H/C = 0,88 et N/C = 0,044) (Debyser, Gadel, 1976). Les résidus d'hydrolyse des acides humiques comme

le kérogène offrent des teneurs en azote assez exceptionnelles. Par ailleurs, la prépondérance des acides  $C_{16}$  et  $C_{18}$  confirme une origine marine soulignée par un mode d'acides de  $n-C_{12}$  à  $n-C_{20}$  centré sur  $n-C_{16}$  provenant d'esters d'acides organiques marins (Debyser *et al.*, 1977; Dastillung, 1977).

En conclusion, il apparaît que les matières organiques rencontrées dans les dépôts de l'archipel de Kerguelen sont principalement d'origine marine, sans toutefois pouvoir écarter la possibilité d'une participation de substances organiques issues des tourbières en bordure de mer.

#### Variations saisonnières

• En ce qui concerne les *variations saisonnières*, si l'on considère l'ensemble du carbone organique C org. T, on constate que (fig. 8 et 9) : le cycle saisonnier est inverse par rapport à celui de la microflore hétérotrophe (Delille, 1977 a) (Bossière moyenne : coefficient de corrélation  $r = -0,780$ ; Bossière M :  $r = -0,500$ ). En valeurs absolues, les fluctuations du carbone minéral ( $C_m$ ) compensent presque celles du C org. T disparu.

L'accumulation du carbone minéral semble ainsi être d'origine biologique et correspondre à des bicarbonates d'origine bactérienne (Bossière moyenne :  $r C_m/Bact. = 0,800$ ; Bossière station M :  $r = 0,940$ ). Cette formation de bicarbonates peut être en rapport aussi bien avec la flore hétérotrophe globale qu'avec les flores hétérotrophes spécialisées de type sulfatoréductrices (Delille, Lagarde, 1974; Delille, 1977 a et b).

Dans l'examen des relations entre la distribution du carbone organique et la manifestation hétérotrophe, on remarque que le carbone hydrolysable, facilement disponible, suit de manière inverse l'évolution de la biomasse bactérienne (Bossière M :  $r = -0,663$  pour l'ensemble de l'année;  $r = -0,834$  entre septembre et avril). Cette fraction carbonée est la première assimilée, phénomène bien apparent sur la moyenne des stations Bossière où le CH disparaît avant la diminution du CLP. Le décalage observé dans le temps entre les fractions CH et CLP apparaît donc logique. D'autre part, le carbone hydrolysable atteint, pour l'ensemble des stations, des valeurs voisines de 0, ce qui limite le développement de l'hétérotrophie dans le dépôt à certaines périodes de l'année (automne-fin de printemps).

Le carbone minéral et le carbone hydrolysable apparaissent donc sous ces latitudes comme de bons *tests chimiques de l'action biologique*.

• Par comparaison avec d'autres régions du globe, la concordance entre les cycles observés et les fluctuations obtenues par Driscoll (1975) pour la Buzzard Bay est parfaite pour le carbone minéral et l'azote organique et moins bonne pour le carbone organique total (fig. 10). Il subsiste néanmoins une certaine analogie, mais avec un décalage dans le temps. Ceci s'applique également au cycle obtenu par Hartwig (1976) sur la côte californienne. Bien que les stations d'étude se situent sous climat froid, les variations d'amplitude

enregistrées sont du même ordre de grandeur qu'en Méditerranée. Dans les deux cas, survient une forte minéralisation de la matière organique dans l'eau; l'importance du brassage des masses d'eau autour des îles de Kerguelen contribue certainement à sa disparition.

La fraction de la matière organique minéralisée dans la zone pélagique euphotique peut être considérable (Océan Atlantique : 90 % Riley, 1951; Mer Noire : 80 à 95 % Deuser, 1971). Il ne reste donc que 10 % de matière organique susceptible de sédimenter. Toutefois, ce chiffre pourrait être supérieur dans l'archipel de Kerguelen pour deux raisons majeures :

- le temps de transit du matériel organique dans la tranche d'eau paraît plus réduit;
- l'activité microbienne serait plus faible par suite des températures plus basses.

Un apport très important est enregistré en juillet dans le fjord Bossière. En quelques jours, en effet, des quantités notables de matière organique, équivalent à 36 g de carbone par mètre carré (sur la base de 11 kg en moyenne de vase par mètre carré), apparaissent et disparaissent à la surface du dépôt. Une accumulation progressive de matériel organique sédimenté intervient durant la saison froide. Le réchauffement printanier est mis à profit par les flores microbiennes dont l'indice de puissance à la surface des dépôts s'élève en même temps que celui du phytoplancton dans l'eau. La phase printanière se produit dans un contexte général de croissance de la plupart des êtres vivants plus ou moins affectés jusqu'alors par la rigueur des conditions hivernales. Les produits libérés par la flore bactérienne peuvent être très rapidement réutilisés en cette période où la minéralisation est plus forte dans les sédiments que l'apport. A cette époque, le CH vient à approcher des valeurs nulles. Ensuite, on assiste à une diminution de la matière organique totale (été-automne) (valeur négative de la droite de tendance). L'accumulation de matière organique dans le dépôt se trouve donc modérée par la reprise de l'activité microbienne en automne (comme en climat méditerranéen). Cette phase correspond à une période de disparition du phytoplancton dans la zone pélagique. Il existerait une relation entre la productivité primaire pélagique et la teneur en carbone organique sédimentaire (Hall *et al.*, 1970; Rowe, 1971; Jonasson, 1972).

Le cycle annuel de la microflore hétérotrophe est plus étroitement apparenté à celui du carbone organique qu'à celui de l'azote organique. Il convient de remarquer la concordance inverse entre l'évolution des bactéries hétérotrophes et celle du rapport C/N (Bossière moyenne  $r = -0,517$  pour l'année,  $r = -0,831$  pour la période automne-hiver; Bossière M :  $r = -0,407$  pour l'année,  $r = -0,650$  pour la période automne-hiver). Les phases de croissance bactérienne interviennent durant les périodes d'abaissement du rapport C/N, probablement durant les périodes de meilleure disponibilité de la matière organique.

• Disposant de données rapprochées dans le temps, nous avons tenté d'établir un *bilan du carbone* en intégrant les courbes obtenues en fonction de la date de

prélèvement pour la fraction déterminée. Nous avons tenu compte de la *fraction totale*  $F_t$  du paramètre chimique et de la *fraction stockée ou résiduelle*  $F_s$ . Cette dernière est comprise arbitrairement entre l'axe des temps et la moyenne des minimums. La différence entre les deux fractions  $F_t$  et  $F_s$  correspond au flux de matière, *fraction mobile*  $F_m$  du composé mis en jeu pendant le laps de temps considéré (1 an). Nous rapportons ensuite cette fraction à une unité de volume. En effet, il paraît préférable d'utiliser une expression des résultats par unité de volume ( $1 \text{ m}^2 \times 1 \text{ cm} = 10 \text{ dm}^3$ ), plus réaliste en biogéochimie bien que le choix d'une épaisseur de 1 cm soit tout à fait arbitraire.

A partir d'un étalon, on obtient par planimétrie des poids de carbone organique total  $C_t$  et de carbone stocké  $C_s$  en milligrammes par unité de poids de sédiment sec. La différence entre le poids  $C_t$  et le poids  $C_s$  donne le *taux de carbone CLP ou CH* qui a transité par an dans le sédiment.

Pour étendre cette donnée à une unité de volume, il faut connaître le poids de vase sèche correspondant au volume considéré ( $10 \text{ dm}^3$ ). Pour un volume de  $10 \text{ dm}^3$  ( $\text{m}^2 \times \text{cm}$ ) nous sommes parvenus à des poids secs de 11,9 et 10,8 kg respectivement pour la moyenne des stations et le point M du fjord Bossière.

Les résultats diffèrent entre les deux types de valeurs disponibles. Les quantités de CLP et de CH totales sont dans un rapport de 1 à 2. Par contre cette différence s'atténue considérablement pour les fractions mobiles  $F_m$  surtout pour le CLP (tableau 2). Les variations peuvent être en rapport soit avec le taux de matière organique du dépôt soit avec la teneur en eau. La quantité de matière organique joue d'ailleurs un rôle primordial.

Dans les dépôts de l'archipel de Kerguelen trois cas semblent se présenter :

– la station Bossière M correspond à un milieu aux conditions plus anoxiques où la matière organique incorporée au dépôt est relativement faible, phénomène qui se reflète dans la quantité peu importante de CLP stocké. Le carbone hydrolysable correspond essentiellement à la fraction mobile, ce que nous avons déjà observé sous climat méditerranéen;

– la moyenne des stations du fjord Bossière présente quelques analogies avec la station précitée, mais les quantités de carbone CLP stocké et de CH mobile se trouvent doublées. Par contre, la quantité de CLP mobile est voisine. Ces observations rendent compte de la forte minéralisation du matériel organique au cours du transit dans la tranche d'eau et après son dépôt. Aussi serait-il intéressant de connaître la vitesse de recyclage du matériel déposé;

– le troisième exemple analysé antérieurement (Cahet, Gadel, 1976) représente un cas exceptionnel. La seule analogie avec les autres stations correspond aux taux de carbone CLP mobile (tableau 2). Pour le CLP stocké, cette station ressemble aux stations méditerranéennes. Au niveau du carbone hydrolysable, il constitue un exemple type d'enrichissement du dépôt en matériel algaire, avec un apport suffisamment conséquent pour que le CH soit toujours présent, sans arriver à une utilisation complète de cette fraction.

Tant pour l'amplitude des variations saisonnières que pour les cycles majeurs (minéralisation printanière et automnale), on observe une certaine homogénéité de distribution du carbone organique en valeurs relatives dans les dépôts des fjords de l'archipel de Kerguelen et des stations lagunaires et marines méditerranéennes (Cahet, Gadel, 1976). Toutefois, dans l'archipel de Kerguelen, bien que de plus faible amplitude (0 à 10°C), la rigueur des températures entraîne des fluctuations marquées, mais de modèle plus simple. Au contraire, les variations, de température importantes (10 à 30°C) dans les lagunes méditerranéennes associées à une tranche d'eau réduite, introduisent deux périodes supplémentaires de minéralisation; l'hiver et l'été où les fortes températures entraînent l'apparition d'épiphénomènes de faible amplitude.

Les variations annuelles des teneurs en carbone hydrolysable apparaissent bien comme représentatives d'une fraction disponible et utilisable par la communauté hétérotrophe dont elle rend compte des fluctuations. Toutefois, elle ne fait que traduire des phénomènes généraux sans relation avec la vitesse de recyclage des substances organiques.

Dans les faciès appauvris en carbonates de l'archipel de Kerguelen, les fluctuations de  $C_m$  peuvent être utilisées comme test chimique des phénomènes biologiques.

Tableau 2

Bilan du carbone lié et particulaire (CLP) et du carbone hydrolysable (CH) dans les dépôts par poids sec.  
*Budget of bound and particular carbon (CLP) and hydrolysable carbon (CH) in sediments.*

Stations	A		B		C		D				G		H		I	J
	WE	WS	VS	VH	VS	VH	VS	VH	E	F	VS	VH	VS	VH		
Bossière M	77	23	2,5	10,8	5,8	1,3	2,5	0,6	14,4	6,2	1,6	0,4	1,4	0,3	4,0	3,6
Bossière moy.	68	32	3,8	11,9	8,2	2,6	1,9	0,6	31,1	7,1	2,1	0,7	1,8	0,6	7,9	6,8
Baudissin KBS (Cahet, Gadel, 1976)	74	26	3,0	11,5	24,5	6,4	3,5	–	73,5	10,5	35,2	9,2	15,2	–	105,6	60,0

A, phase liquide, (%); B, poids ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ ); C, poids ( $\text{mg} \cdot \text{CLP}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; D, poids ( $\text{mg} \cdot \text{CLP}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; E, poids ( $\text{g} \cdot \text{CLP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; F, poids ( $\text{g} \cdot \text{CLP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; G, poids ( $\text{mg} \cdot \text{CHg}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; H, poids ( $\text{mg} \cdot \text{CHg}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) mobile; I, poids ( $\text{g} \cdot \text{CH} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) total; J, poids ( $\text{g} \cdot \text{CH} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) mobile.

## REFERENCES

- Anne P., 1947. Dosage rapide du carbone organique dans les sols, *Ann. Agron.*, **2**, 161-172.
- Bremner J. M., Tabatari M. A., 1972. Use of ammonia electrode for the determination of ammonium in Kjeldahl analysis of soils, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **3**, 159-165.
- Buchanan J. B., Longbottom M. R., 1970. The determination of organic matter in marine muds. The effect of the presence of coal and the routine determination of protein, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **5**, 158-159.
- Cahet G., Gadel F., 1976. Bilan du carbone dans des sédiments lagunaires et marins méditerranéens : effets des processus biologiques saisonniers et diagenétiques, *Arch. Hydrobiol.*, **77**, 1, 109-138.
- Cauwet G., 1975. Optimisation d'une technique de dosage du carbone organique des sédiments, *Chem. Geol.*, **16**, 59-63.
- Cortecchi G., 1975. Isotopic analysis of sulfate in a south Pacific core. *Mar. Geol.*, **19**, 5, M69-M74.
- Dastillung M., 1977. Lipides de sédiments récents, thèse Doct. Sci., Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg.
- Debyser Y., Gadel F., 1976. *Géochimie organique des sédiments marins profonds. Orgon I, Mer de Norvège*, Éditions du Cnrs.
- Debyser Y., Leblond C., Dastillung M., Gadel F., 1977. Études géochimiques de sédiments marins et lacustres, 8<sup>th</sup> International Congress on organic geochemistry, Moscou.
- Degens E. T., Mopper K., 1975. Early diagenesis of organic matter in marine soils, *Soil Sci.*, **119**, 1, 65-72.
- Delille D., 1977 a. Cycles bactériens du soufre et de l'azote dans les dépôts sédimentaires du fjord Bossière (archipel de Kerguelen), in: Adaptations within Antarctic Ecosystems, (Proc. 3<sup>th</sup> Scar Symp. Antarctic Biology), edited by G. A. Liano, Gulf Pub. Comp.
- Delille D., 1977 b. Contribution à l'étude du rôle des populations bactériennes dans les principaux cycles biologiques (C, N, S, P) établis en milieu sédimentaire subantarctique (archipel de Kerguelen), thèse Doct. Sci. Nat. Univ. Claude-Bernard, Lyon, 286 p.
- Delille D., Lagarde E., 1974. Contribution à l'étude écologique des milieux subantarctiques. V. Recherches sur les cycles biologiques du soufre et du carbone dans les dépôts sédimentaires de la baie du Morbihan (archipel de Kerguelen), *Rev. Inst. Pasteur Lyon*, **7**, 149-165.
- Deuser W. G., 1971. Organic carbon budget of the Black Sea, *Deep-Sea Res.*, **18**, 10, 995-1004.
- Driscoll E. G., 1975. Sediment-Animal-Water interaction. Buzzard Bay, Massachusetts, *J. Mar. Res.*, **33**, 3, 275-302.
- Folger D. W., 1972. Texture and organic carbon of bottom sediments in some estuaries of United States, *Geol. Soc. Am.*, **133**, 391-408.
- Gadel F., 1975. Distribution de la matière organique sur le plateau continental catalan : le carbone et l'azote, *Vie Milieu*, **25** (AB), 141-156.
- Gadel F., Letolle R., 1974. L'utilisation sédimentologique de la teneur <sup>13</sup>C de la fraction organique dans les dépôts récents. Application à la région côtière du golfe du Lion, *Bull. Cent. Rech. Pau*, **8**, 2, 537-554.
- Gadel F., Ragot J. P., 1973. Sur l'allochtonie de la fraction organique particulière des dépôts quaternaires récents du golfe du Lion, 6<sup>e</sup> Congrès International de Géochimie Organique, Rueil-Malmaison, Paris.
- Gorshkova T. I., 1955. Organic matter in the Sea of Azov and Taganrog Bay, *Tr. Vses Nauchna-Issled, Morsk. Khoz, Okeanogr.*, **31**, 1.
- Hall D. J., Cooper W. E., Werner E., 1970. An experimental approach to the production dynamics and structure of freshwater animal communities, *Limnol. Oceanogr.*, **15**, 839-928.
- Hartwig E. O., 1976. Nutrient cycling between the water column and a marine sediment. I. Organic carbon, *Mar. Biol.*, **34**, 3, 285-295.
- Ho C. L., Lane J., 1973. Interstitial water composition in Barataria Bay (Louisiana), *Estuar. Coast Mar. Sci.*, **1**, 2, 125-135.
- Jonasson P. M., 1972. Ecology and production of profundal benthos, *Oikos suppl.*, **14**, 1-148.
- Kammerer P. A., Rodel M. G., Hugues R. A., Lee G. F., 1967. Low level Kjeldahl nitrogen determination on the Technicon Autoanalyser, *Environ. Sci. Technol.*, **1**, 340-342.
- Koyama C., Handa N., Sugimura Y., 1972. *Analysis of fresh water and sea water*, Kodanska, ed., Tokyo, 294 p.
- Lagarde E., 1972. Recherches sur la réduction bactérienne des composés oxygénés de l'azote, thèse Doct. Sci., Univ. Montpellier, 210 p.
- Lang J., 1971. Contribution à l'étude sédimentologique du Golfe du Morbihan, *CNFERA*, **19**, 1-44.
- McDaniel W. H., Hemphill R. N., Donaldson W. T., 1967. Automatic determination of total Kjeldahl nitrogen in estuarine waters, *Technicon Symposium Automation in Analytical Chemistry*, **1**, 363-367.
- Mopper K., 1973. Aspects of the biogeochemistry of carbohydrates in aquatic environments, Ph. D. Thesis Joint-Program, Mass. Inst. Technol. and Woods Hole Oceanog. Inst.
- Nissenbaum A., Kaplan I. R., 1972. Chemical and isotopic evidence for *in situ* origin of marine humic substances, *Limnol. Oceanogr.*, **17**, 4, 570-582.
- Oppenheimer C. H., Zobell C. E., 1952. The growth and viability of sixty three species of marine bacteria as influenced by hydrostatic pressure, *J. Mar. Res.*, **11**, 10-18.
- Piper C. C., 1947. *Soil and plant analysis*, University Press Adelaide, 368 p.
- Pochon J., Tardieux P., 1962. *Techniques d'analyses en microbiologie du sol*, Ed. La Tourelle Saint-Mandé, Paris, 111 p.
- Riley G. A., 1951. Oxygen, phosphate and nitrate in the Atlantic ocean, *Bull. Bingham Oceanogr. Collect.*, **13**, 1-126.
- Rowe G. T., 1971. Benthic biomass and surface productivity, in: *Fertility of the sea*, 2, edited by J. D. Costlow, Gordon and Breach, New York.
- Steven R. J., 1976. Semi-automated ammonia probe determination of Kjeldahl nitrogen in fresh water, *Water Res.*, **10**, 2, 171-175.
- Strom K. M., Land-lacked waters and the deposition of black muds, in: *Recent Marine sediments*, edited by P. D. Trask, 356-372.
- Trichet J., 1966. Étude des premiers stades d'évolution de la matière organique dans les vases en milieu récifal (Polynésie française), *Adv. in Org. Geochem.*, edited by G. D. Hobson, G. C. Speers, Pergamon press, 265-284.
- Wakeel S. K., Riley J. P., 1956. The determination of organic carbon in marine muds, *J. Cons. perm. Int. Explor. Mer*, **22**, 180-183.
- Walckley A., Black I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci.*, **37**, 29-38.
- Wanatabe Y., 1975. Effects of partial sterilization epibenthic microbial community of river bed, *Jpn. J. Ecol.*, **25**, 2, 53-60.