

Devenir de la matière organique particulaire dans un milieu eutrophe tropical

(baie de Biétri, lagune Ébrié, Côte d'Ivoire)

Daniel GUIRAL (1)

RÉSUMÉ

La baie de Biétri située dans la zone urbaine d'Abidjan est soumise à des rejets industriels et domestiques dont l'impact eutrophisant est en partie limité par l'existence de communications avec des milieux moins pollués (mer et baie de Koumassi).

En cinq ans, l'accroissement du volume des rejets, lié à l'expansion de la ville, s'est soldé par un doublement du seston d'origine non chlorophyllienne et par une augmentation de 30 % de sa partie détritique.

Dans les eaux de surface les biomasses algales sont très élevées en particulier pour les stations éloignées de la communication avec la mer.

L'évolution saisonnière des concentrations en chlorophylle présente une évolution complexe où les précipitations et/ou la salinité jouent un rôle déterminant.

A cette richesse sestonique coïncident des concentrations très élevées en carbone dans les sédiments. La répartition spatiale du carbone organique est fonction de la granulométrie des sédiments et des caractéristiques hydrodynamique et bathymétrique de la baie.

La charge organique totale des sédiments de surface a été estimée pour l'ensemble de la baie à 397 tonnes correspondant à une concentration moyenne de $93 \text{ g.m}^2\text{cm}^{-1}$.

La matière organique au cours de sa sédimentation est l'objet d'une forte activité minéralisatrice visant essentiellement les radicaux azotés. De ce fait elle montre dès l'interface un haut degré d'évolution (l'humine représentant 50 % du Carbone organique total).

Dans les couches superficielles du sédiment, il y a reprise des activités minéralisatrices où 51 % des composés acido-solubles et 86 % des composés hydrolysables sont métabolisés. Pour les couches profondes l'activité minéralisatrice est freinée par des processus géochimiques de complexation et d'immobilisation de la matière organique.

Dans les sédiments, les populations bactériennes hétérotrophes anaérobies et plus particulièrement sulfato-réductrices sont très abondantes et coexistent avec une microflore hétérotrophe aérobie. Cette dernière bien qu'héritée des eaux libres s'est profondément modifiée et est constituée essentiellement de bactéries Gram + (Bacilles sporulés et cocci).

Les résultats présentés mettent en évidence l'importance des activités de minéralisation se déroulant dans la couche d'eau oxygénée de surface. L'équilibre observé qui correspond à un certain niveau de pollution repose donc essentiellement sur l'activité des organismes photosynthétiques pourvoyeurs d'oxygène.

MOTS-CLÉS : Matière organique particulaire — Phytoplancton — Sédiments — Bactéries — Eutrophie — Milieux saumâtres tropicaux.

(1) Centre de Recherches Océanographiques, B.P. V 18, Abidjan (Côte d'Ivoire).

ABSTRACT

EVOLUTION OF THE PARTICULATE ORGANIC MATTER IN AN EUTROPHIC TROPICAL BAY

(Biétri Bay, Ebrie lagoon, Ivory Coast)

Biétri Bay, located in the urban area of Abidjan receives industrial and domestic sewages which disturbing effects are partly limited by the existence of communications with less polluted waters.

Due to the expansion of the town during the last 5 years, the increase of the volume of sewages doubled the seston amount and particularly the one coming from non phototrophic producers. By the same time the detritic part increased by 30 %.

In the upper part of the water algal biomasses are very important and particularly in places where the sea cannot play its diluting effect. Rains and salinity are of paramount importance for the complex evolution of phototrophic concentrations along the different seasons.

In the sediment, the amount of organic carbon is very high. Its distribution depends on the granulometry of the sediment as well as on the currents of the water and on the morphology of the bay.

The total organic amount of the surface sediment is estimated to be 397 tons, corresponding to an average of 93 g.m²cm⁻¹.

The organic matter and especially the nitrogen compounds are actively mineralized during its sedimentation. Thus the nature of the organic matter is highly modified at the interface water-sediment where 50 % of the total organic carbon is made of humine. In the surface layer, the mineralizing activity is important: 51 % of the hydrolysable fraction (HCl 2N) and 86 % of the hydrolysable fraction (HCl 6N) is metabolized. In the deeper part of sediment, this activity is inhibited by geochemical process (complexation and immobilization of organic matter).

In the sediment, anaerobic heterotrophic bacterial populations and particularly sulfate reducers are in great abundance and coexist with aerobic heterotrophic microflora. The latter is coming by sedimentation from the upper part of water and its composition is modified: it consists essentially in Gram positive bacteria (Cocci and Endospore-forming bacteria).

The results presented in this paper show the importance of the mineralizing activities in the well oxygenated surface water. The equilibrium of the ecosystem in relation to the present level of pollution is essentially dependant on the photosynthetic activity which supplies the system with oxygen.

KEY WORDS : Particulate organic matter — Phytoplankton — Recent lagoon sediments — Bacteriobenthos — Eutrophy — Brackish tropical lagoon.

INTRODUCTION

La matière organique inerte observée à l'interface eau-sédiment présente une double origine :

— une source autochtone qui correspond à la biomasse interne du milieu aquatique et comprend des végétaux, des animaux, des algues et des bactéries mortes ;

— une source allochtone qui comprend des composés organiques issus des activités humaines et des organismes animaux et végétaux entraînés par les eaux de ruissellement ou les rivières.

L'importance relative de ces deux sources est variable selon les milieux. Dans le cas de la baie de Biétri, les apports d'origine anthropique revêtent une importance toute particulière, cette baie étant soumise à de très importants rejets d'effluents domestiques et industriels.

En 1974, ces déversements étaient estimés à 1,5 m³.s⁻¹ (Novo, 1974) par temps sec, alors que la population d'Abidjan ne regroupait que 800.000 habi-

tants. A ces déversements, principalement d'origine industrielle (savonnerie, abattoirs, teinturerie...), se sont ensuite ajoutés des rejets domestiques dont les débits se sont accrus au rythme de développement de l'agglomération abidjanaise et de sa population (estimée en 1980 à 1.696.000 habitants). Enfin, depuis 1981, cette baie déjà considérée comme fortement eutrophe (DUFOUR et SLEPOUKHA, 1975) a été retenue pour servir transitoirement de lagune d'oxydation à l'ensemble des effluents industriels et domestiques de l'agglomération urbaine d'Abidjan.

L'étude présentée ici, qui a pour but de suivre la transformation de la matière organique, a été réalisée antérieurement à l'installation du collecteur d'eaux usées et témoigne donc d'une situation initiale à partir de laquelle il sera possible d'évaluer l'impact réel de cet aménagement.

La baie de Biétri, objet de cette étude, appartient au système lagunaire Ébrié de Côte d'Ivoire (fig. 1). D'une superficie de 550 ha pour un volume de 21,10⁶ m³, elle présente une profondeur moyenne de 3,50 m. Cette baie, incluse dans la zone urbaine

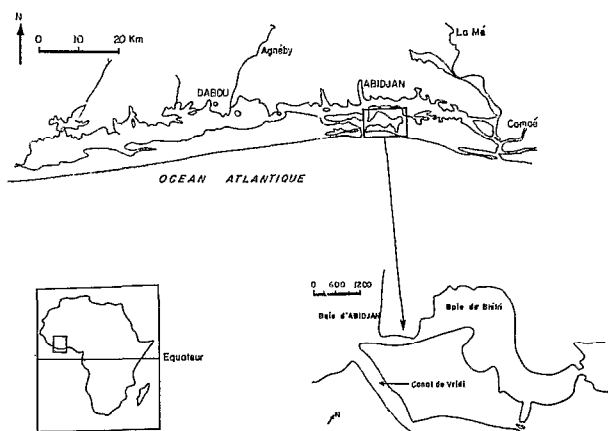


Fig. 1. — Plan général de situation de la Baie de Biétri

d'Abidjan, constitue un écosystème relativement clos, ouvert à son extrémité ouest par une passe de 450 m² (la mettant en relation avec le canal de Vridi, exutoire artificiel de la lagune Ébrié vers l'océan), et à son extrémité est par des buses de 16 m² (la reliant à la baie de Koumassi). Posées en 1980, ces buses devaient rétablir les échanges supprimés lors de la construction de la digue de Koumassi. Dans la réalité, l'impact de cet aménagement s'est avéré très faible, les volumes entrant et sortant quotidiennement par cette communication ne représentant que 8 % des échanges totaux et 4 % du volume total de la baie (GURAL et LANUSSE, à paraître).

De ce fait, les temps de résidence des eaux de surface estimés en 1975, n'ont pas été significativement modifiés et sont respectivement de 4 à 5 jours dans la partie est, de 1 à 2 jours dans la partie ouest directement influencée par les courants de marée (ARFI *et al.*, 1981).

Cette opposition entre secteur ouest et est de la baie existe aussi au niveau bathymétrique où la zone sous influence marine présente une profondeur moyenne supérieure à celle observée en fond de baie (fig. 2). Cependant, cette carte ne correspond qu'à un document provisoire, les fonds de la baie étant en perpétuelle évolution par suite des dragages et remblaiements.

1. Techniques d'étude

1.1. ÉTUDE DE LA PHASE ORGANIQUE PARTICULAIRE DANS LES EAUX

L'évolution saisonnière de la biomasse photosynthétique a été suivie de 1979 à 1980 mensuellement tous les trois mètres par la mesure

fluorimétrique des concentrations en chlorophylle a et en phaeophytine sur 15 stations réparties dans l'ensemble de la baie (fig. 2). Sur ces mêmes stations, des mesures complémentaires des caractéristiques physicochimiques (température, salinité, oxygène dissous, sels nutritifs), ont été réalisées tous les mètres (l'ensemble de ces observations fera l'objet d'une présentation ultérieure).

Des analyses simultanées des concentrations en carbone, azote et phosphore particulaires et des teneurs en chlorophylle ont été réalisées en 1980, permettant ainsi de définir les rapports caractéristiques du seston organique de surface en baie de Biétri. A cet effet, le matériel particulaire est recueilli sur filtre de fibre de verre de porosité 0,45 μ , préalablement grillé à 400 °C et conservé à -20 °C. L'azote et le carbone particulaires sont ensuite déterminés à l'analyseur CHN par chromatographie en phase gazeuse après décomposition à la chaleur en présence d'oxyde de cuivre (Hewlett Packard 185 B). Le phosphore particulaire est oxydé par le persulfate de sodium (méthode de MENZEL et CORWIN, 1965), puis dosé à l'auto-analyseur Technicon ^(R).

1.2. ÉTUDE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SÉDIMENTAIRE

Pour l'étude de la répartition spatiale du matériel organique, les sédiments de surface ont été prélevés à l'aide d'une benne (type Orange Peel) sur 35 stations choisies en fonction des données bathymétriques (fig. 2) (LEMASSON *et al.*, 1981) au cours d'une campagne organisée de janvier à février 1980.

Les densités du sédiment frais après séchage à 60 °C ont été obtenues par pesée d'un volume de 250 à 500 ml de dépôt frais. Les concentrations en carbone organique ont été déterminées sur le sédiment sec décarbonaté (acide orthophosphorique) et mesurées par spectrophotométrie infra-rouge sur un appareil automatique Leco.

Pour les stations correspondant à la radiale W.O. (stations 5, 13, 23, 25, 27, 28 et 33) (fig. 2), les sédiments ont été prélevés par carottage (type Milbrick) et échantillonnés tous les 2 cm. Sur ces échantillons, les densités bactériennes hétérotrophes aérobies ont été estimées par ensemençement de suspensions-dilutions de 1 à 10⁻⁶ sur boîtes de Petri à raison de 2 boîtes par niveau et par dilution. Deux types de milieu ont été utilisés : le premier est classiquement retenu pour les populations bactériennes d'origine marine : milieu d'Oppenheimer et Zobell 2216 E ; le second à l'opposé est caractérisé par une salinité nulle : Nutrient Agar DIFCO. Le comptage des bactéries formant colonies a été réalisé après une semaine d'incubation à 30 °C.

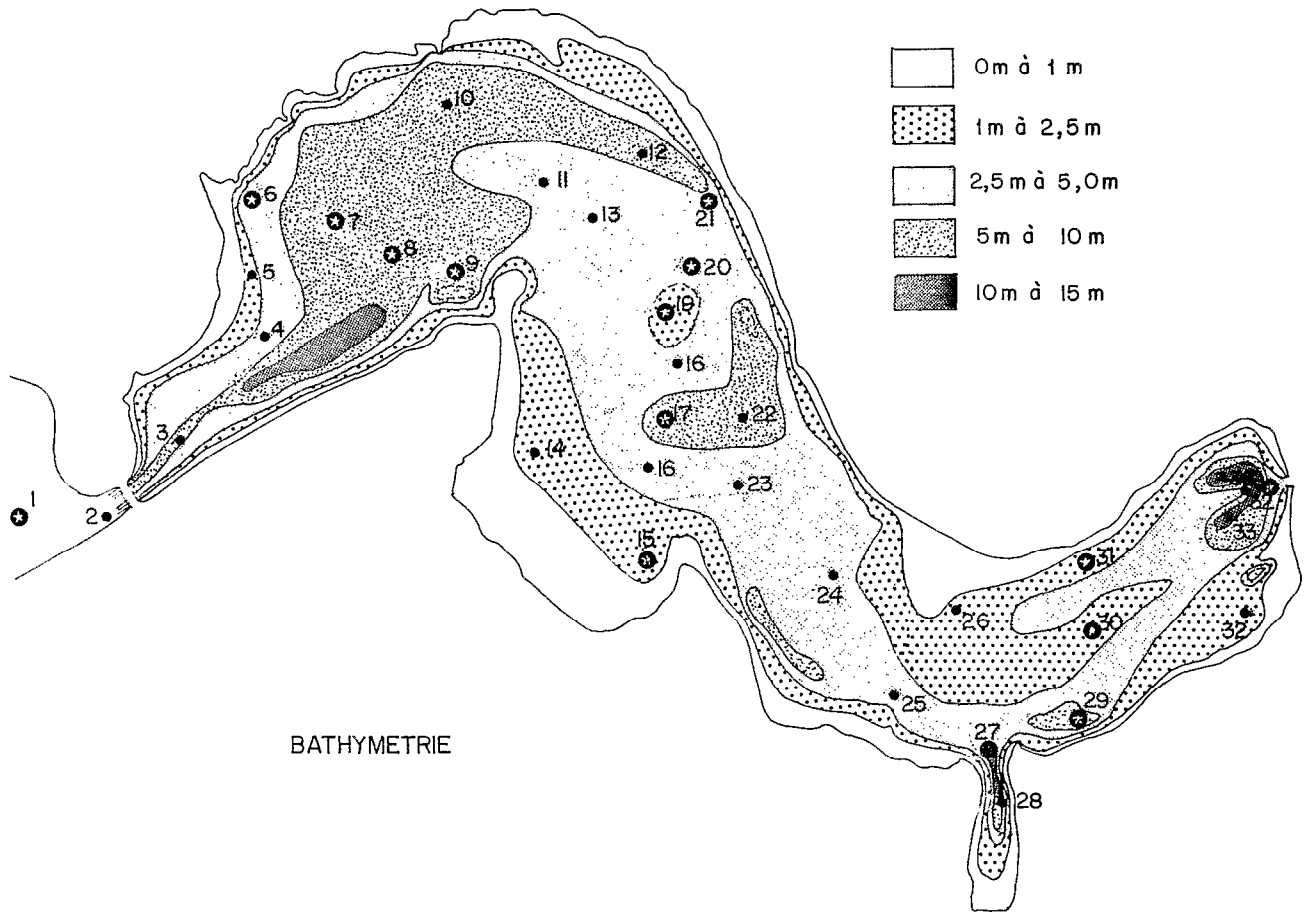


FIG. 2. — Carte bathymétrique et situation des diverses stations prospectées en baie de Biétri (les stations marquées d'une étoile furent suivies mensuellement de 1979 à 1980 pour étudier l'évolution physico-chimique des eaux)

Pour l'étude plus approfondie réalisée sur la carotte prélevée en station 27 (fig. 2), nous avons estimé les densités des populations bactériennes hétérotrophes aéro-anaérobies par comptage des bactéries formant colonies sur milieu gélosé de WIDDEL (1981). Deux substrats organiques ont été testés : acétate et lactate à la concentration finale de 10 moles.l⁻¹. L'existence après une semaine d'incubation à 30 °C d'un halo noir indicateur d'une activité sulfatoréductrice nous a permis d'estimer le pourcentage de bactéries sulfatoréductrices par rapport à l'ensemble des bactéries hétérotrophes aéro-anaérobies. La matière organique des diverses strates a ensuite été fractionnée selon le protocole décrit dans une publication antérieure (GUIRAL, 1983). Les composés carbonés des diverses fractions acido-solubles, acides fulviques et humiques, hydrolysable de l'humine et résiduel de l'humine ont été déterminés par oxydation au bichromate de Potassium. Les concentrations en glucides ont été

dosées sur les fractions acido-soluble et fulvique par la méthode de DUBOIS *et al.* (1956).

Les concentrations en phaeopigments ont été dosées par mesure fluorimétrique (HOLM-HANSEN et

TABLEAU I

Équations caractéristiques et composition élémentaire moyenne du seston organique en baie de Biétri (1980). Cp, Np, Pp, Chla et Phae exprimés en µatg.l⁻¹

$cp = 6,645 Np + 0,046 \quad (rs = 0,888, N = 36)$			
$cp = 1,860 (Chla + phae) + 92,792 \quad (rs = 0,912, N = 17)$			
$cp = 46,72 e \quad 0,842 Pp \quad (rs = 0,867, N = 34)$			
\bar{Cp}	\bar{Np}	\bar{Pp}	
138	20,7	1,11	
107	16	1	

RIEMANN, 1978), après extraction acétonique et centrifugation du sédiment frais ressuyé.

Les concentrations en carbone organique total ont été dosées par coulométrie après combustion dans l'oxygène et fixation du CO₂ par la baryte.

L'azote organique, après minéralisation et entraînement de l'ammoniac formé, est dosé colorimétriquement à l'autoanalyseur Technicon ⁽¹⁴⁾.

2. Résultats

2.1. CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DU SESTON ORGANIQUE DANS LES EAUX

Composition élémentaire du seston organique

La composition élémentaire du seston organique dans les eaux de surface (tabl. I) déterminée en 1980, diffère significativement de celle obtenue en 1975 sur le même milieu et selon les mêmes méthodes par LEMASSON *et al.* (1981). En particulier la valeur du carbone particulaire (Cp) d'origine non végétale

(obtenue par extrapolation à partir de la droite de corrélation Cp concentration en chlorophylle et phaeophytine) est passée de 40,81 µatg.l⁻¹ à 92,79 µatg.l⁻¹. De même, si l'on considère le phosphore particulaire (Pp) comme négligeable, la valeur de Cp correspondant à une concentration nulle en Pp, permet d'estimer la teneur moyenne annuelle en Cp détritique. Cette valeur égale à 35 µatg.l⁻¹ en 1975 est maintenant de 47 µatg.l⁻¹.

Au cours de ces cinq dernières années, l'accroissement des rejets organiques d'origine domestique s'est donc soldé par un doublement de la partie non chlorophyllienne du seston et par une augmentation de 30 % de sa partie détritique.

Répartition spatiale de la matière organique d'origine végétale

Les valeurs moyennes des concentrations en chlorophylles observées dans les eaux de surface au cours de deux cycles annuels en 15 stations réparties sur l'ensemble de la baie (tabl. II) sont très élevées.

TABLEAU II

Répartition spatiale des concentrations moyennes en chlorophylle *a* des eaux de surface en baie de Biétri (1979-1980), exprimées en µg.l⁻¹

1	6	7	8	9	15	17	19	20	21	27	29	30	31	34	Station
10,0	24,5	23,1	24,6	23,6	30,5	30,1	28,6	34,5	37,4	69,4	56,5	59,1	63,7	67,6	X
21	22	22	31	22	22	31	22	31	22	21	22	31	22	31	N
7,6	19,2	15,8	16,4	15,8	19,2	17,3	26,4	29,0	27,6	49,1	44,4	35,8	47,4	52,3	σ

Elles montrent un fort enrichissement de l'entrée ouest vers le fond de la baie. De plus sur une même radiale les concentrations déterminées pour les stations situées près de la berge nord sont généralement plus élevées que celles des stations correspondantes situées au centre de la baie ou près de la rive sud.

Les stations de fond de baie, très riches en surface, ont des concentrations qui décroissent très rapidement avec la profondeur (tabl. III). Pour la station 34, par exemple, à 6 m la concentration en chlorophylle ne représente que 3 % de celle de surface alors qu'à la station 1 on observe au même niveau une concentration correspondant à 43 % de celle de surface. De plus, à cette station, 70 % des

pigments sont constitués de chlorophylle *a* active alors qu'elle ne représente à la station 34 que 50 % des pigments chlorophylliens.

Les rejets industriels et domestiques déversés jouent donc un rôle eutrophisant très net à l'échelle globale de cette baie. Ce rôle est accru pour les zones les plus éloignées de la communication de la baie avec la mer par le canal de Vridi. Ces biomasses très élevées notées dans les couches superficielles constituent un arrêt pour les développements algaux des niveaux sous-jacents. Ceci se traduit par une variation de la couche euphotique (1) qui est respectivement de 2 m (station 34) et de 5 m (station 1).

L'étude comparative des résultats obtenus pour les 15 stations montre des fluctuations globales

(1) Déduite des profils de pénétration lumineuse et correspondant à la profondeur pour laquelle l'énergie lumineuse est égale à 1 % de l'énergie incidente.

TABLEAU III

Concentration moyenne en chlorophylle *a* et phaeophytine à diverses profondeurs au cours d'un cycle annuel (1980)

	Station 1				Station 34			
	0 m	3 m	6 m	9 m	0 m	3 m	6 m	9 m
Chl <i>a</i> $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	10,0 (14)	10,0 (14)	4,3 (14)	2,9 (13)	81,0 (18)	30,0 (18)	2,6 (18)	1,6 (18)
phae $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2,1 (13)	2,2 (13)	1,7 (13)	1,3 (12)	12,9 (15)	9,6 (15)	2,4 (15)	2,4 (15)

(Nombre d'observations)

TABLEAU IV

Matrice de corrélation de rang inter station des concentrations en chlorophylle *a* dans les eaux de surface en baie de Biétri (1979-1980)

	1	6	7	8	9	15	17	19	20	21	27	29	30	31	34
1	x														
6	0,431	x													
7	0,550	0,550	x												
8	0,664	0,643	0,959	x											
9	0,591	0,697	0,925	0,820	x										
15	0,293	0,714	0,750	0,697	0,834	x									
17	0,151	0,598	0,698	0,698	0,631	0,779	x								
19	0,290	0,459	0,722	0,674	0,721	0,712	0,789	x							
20	0,453	0,849	0,719	0,729	0,606	0,789	0,709	0,529	x						
21	0,336	0,898	0,616	0,638	0,599	0,658	0,619	0,426	0,975	x					
27	0,400	0,677	0,556	0,644	0,756	0,857	0,705	0,652	0,588	0,565	x				
29	0,227	0,569	0,600	0,579	0,784	0,783	0,746	0,712	0,712	0,593	0,782	x			
30	0,383	0,561	0,687	0,699	0,754	0,723	0,624	0,550	0,635	0,556	0,841	0,801	x		
31	0,225	0,440	0,574	0,590	0,636	0,674	0,722	0,708	0,488	0,428	0,748	0,761	0,836	x	
34	0,050	0,305	0,251	0,264	0,383	0,465	0,547	0,330	0,346	0,293	0,786	0,760	0,679	0,591	x

coefficient hautement significatif ($\alpha = 1\%$)
 coefficient significatif ($\alpha = 5\%$)

lement synchronisées sur l'ensemble de la baie avec cependant 2 exceptions pour les stations 1 et 34.

En effet en excluant ces 2 stations la matrice de corrélation (tabl. IV) montre que sur les 78 combinaisons relatives aux 13 stations restantes 43 sont hautement significatives ($\alpha = 1\%$) et 68 significatives ($\alpha = 5\%$). Le dendrogramme obtenu à partir de cette matrice (fig. 3) regroupe les stations en 5 sous-ensembles et confirme l'originalité des stations 1 et 34 qui correspondent à des zones de contact entre la baie de Biétri et les écosystèmes adjacents (station 1 Milieu marin par l'intermédiaire du canal de Vridi ; station 34 Baie estuarienne de Koumassi très faiblement polluée). Le premier sous-ensemble regroupe les stations 9, 15 et 29 (correspondant à des

stations situées près de la berge sud) et 27, 30 et 31 (correspondant aux stations les plus riches en chlorophylles). Les deux sous-ensembles suivants regroupent les stations centrales des 2 radiales nord-sud (stations 17, 19 et stations 8, 7). Enfin les stations 6, 20 et 21 (correspondant à des stations situées près de la berge nord) constituent le dernier sous-ensemble.

Malgré une certaine unité de fonctionnement observée à l'échelle de la baie il existe un rythme saisonnier spécifique selon la situation des stations. D'après le tableau II l'amplitude de ces fluctuations est proportionnelle au niveau moyen des concentrations (coefficient de variation compris entre 0,63 station 15 et 0,92 station 19).

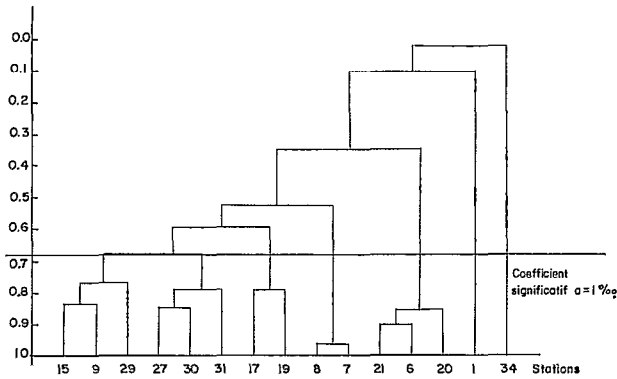


FIG. 3. — Dendrogramme représentant la matrice de similitude inter station vis-à-vis de leur concentration en chlorophylle a

Évolution saisonnière des concentrations en chlorophylle dans les eaux de surface

Les concentrations moyennes en chlorophylle des eaux de surface pour les 13 stations caractéristiques de la baie (fig. 4) présentent une évolution complexe où les précipitations et/ou la salinité semblent jouer un rôle prépondérant. Au cours de la grande saison sèche les concentrations restent sensiblement constantes et voisines de 50 mg.m³. Avec l'arrivée des pluies, la salinité, l'énergie lumineuse, la température des eaux et leur concentration en chlorophylle diminuent très rapidement. Au cours de la petite saison sèche, l'arrêt des précipitations permet une remontée sensible de la salinité alors que les températures présentent leur valeur minimale annuelle (27 °C) et que les conditions d'éclairement sont très défavorables. Cette période très particulière se traduit par une brusque remontée des concentrations en chlorophylle et ceci pour l'ensemble des stations suivies. Au cours de la seconde saison des pluies qui, en 1979, fut relativement longue et peu marquée, les concentrations après être restées à un niveau très bas croissent ensuite très rapidement pour atteindre leur valeur maximale fin octobre. A partir de cette date, les valeurs montrent des fluctuations très importantes liées à des explosions phytoplanctoniques dans les zones les plus riches de fond de baie.

2.2. ÉTUDE DE LA RÉPARTITION SPATIALE ET DE L'ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SÉDIMENTAIRE

Répartition spatiale de la matière organique sédimentaire

La répartition des densités des sédiments de surface (fig. 5) montre une très forte hétérogénéité

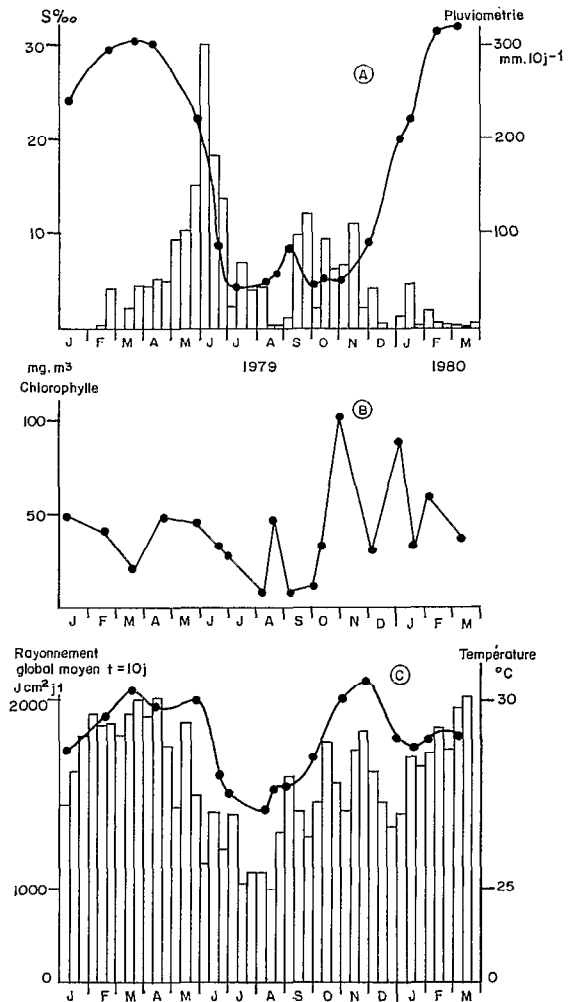


FIG. 4. — Évolution saisonnière des paramètres bioclimatologiques, de la salinité, de la température et des concentrations en chlorophylles dans les eaux de surface en baie de Biétri (janvier 1979-mars 1980). A : Pluviométrie et salinité ; B : Concentration en chlorophylle ; C : Rayonnement solaire global et température

spatiale à l'échelle de la baie ; les valeurs étant comprises entre 1,5 kg.m².cm⁻¹ (station 27) et 15,9 kg.m².cm⁻¹ (station 30) (tabl. V). D'une manière générale les sédiments de faible densité présentant des teneurs en eau très élevées occupent les zones les plus profondes et se situent donc plus particulièrement dans la partie ouest de la baie. Localement et généralement dans les zones de hauts fonds s'observent des sédiments constitués en majeure partie de grains de quartz non classés d'origine fluviale avec trace d'altération éolienne (grains subanguleux luisant plus ou moins picotés). Deux

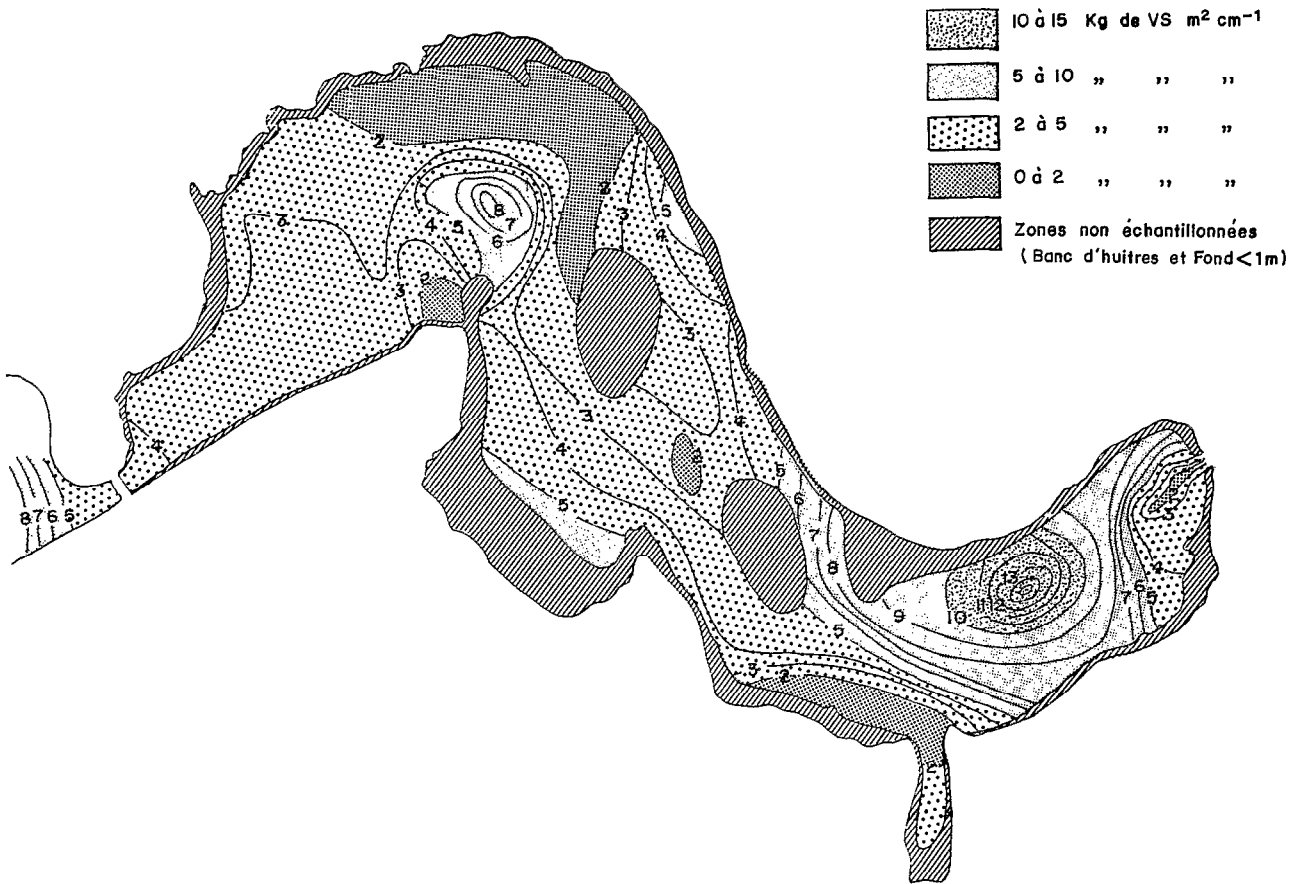


FIG. 5. — Répartition spatiale de la densité du sédiment à l'interface eau-sédiment en baie de Biétri (poids de vase sèche (VS) correspondant à un volume de 10 l de vase fraîche)

TABEAU V

Taux d'hydratation, densité et concentration en C. organique des sédiments de surface en baie de Biétri

Station	Densité Sédiment		Concentration en C. organique	
	Frais $\text{kg. m}^{-2} \text{cm}^{-1}$	Teneur en eau $\text{g. g}^{-1} \text{Sédiment}$ Sec	$\text{mg. g}^{-1} \text{Sédiment}$ Sec	$\text{g m}^{-2} \text{cm}^{-1} \text{Sédiment}$ Frais
1	8,0	91	11,50	100
2	4,4	198	34,70	150
3	4,0	215	42,60	170
4	3,3	267	27,35	90
6	3,0	330	46,50	140
7	3,3	270	34,85	115
8	3,0	277	34,40	105
9	2,4	342	33,80	80
10	1,7	488	27,45	50
11	9,5	55	5,15	50
12	1,9	447	36,00	70
13	1,9	484	41,70	80
14	4,4	214	35,90	160
15	5,5	145	18,00	90
16	3,5	234	48,70	170
17	2,6	346	63,15	165
20	3,8	218	17,10	65
21	5,2	148	7,90	40
22	3,4	99	29,20	100
23	2,0	450	44,20	45
25	1,8	556	62,50	110
26	9,5	67	6,85	65
27	1,5	607	67,60	100
28	2,7	348	53,15	145
29	7,7	83	7,30	55
30	15,9	33	2,85	45
31	11,7	37	7,40	90
32	4,9	151	19,40	95
33	2,3	413	58,60	135
34	3,1	274	52,50	165
35	7,9	75	12,70	100
5	2,9	297	/	/

zones au centre de la baie n'ont pu être échantillonnées car formant un banc continu d'huitres mortes. La partie nord de la baie directement soumise aux rejets industriels (huileries-savonnerie) présente un sédiment vaseux très fin recouvrant sur une quinzaine de cm un sédiment sableux grossier analogue à celui décrit précédemment.

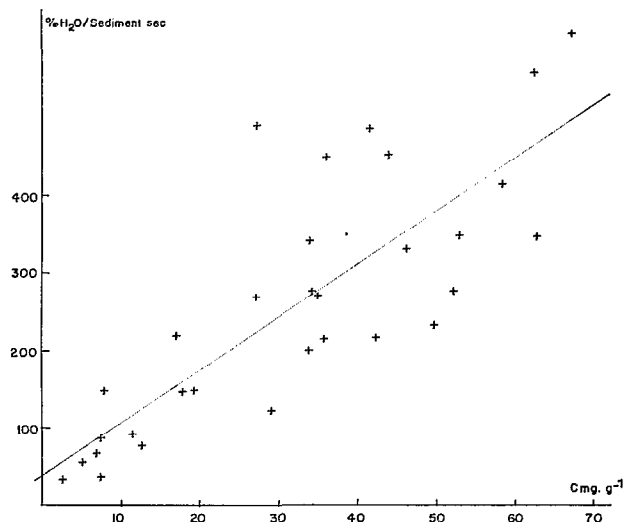


FIG. 6. — Relation concentration en carbone organique, teneur en eau à l'interface eau-sédiment. $\% \text{H}_2\text{O} = 6,799/\text{C}/39,94$; $R = 0,808$ $N = 31$

Les sédiments vaseux à faible densité présentent toujours des teneurs en carbone (exprimées en fonction du poids sec de sédiment) très élevées supérieures à 60 mg.g^{-1} . A l'opposé, les sédiments sableux des zones de haut fond montrent des concentrations 10 fois plus faibles. Cette liaison existant entre composition granulométrique et teneur en carbone organique se traduit aussi par une corrélation hautement significative entre les taux d'hydratation (exprimés en pourcentage du poids sec) et les concentrations carbone organique (fig. 6). D'une manière générale, les valeurs observées de carbone organique sont très élevées ($\bar{X} = 31,95 \text{ mg.g}^{-1}$) et confirment le caractère fortement eutrophe de cette baie. Pour tenir compte des très fortes disparités granulométriques existant entre les divers sédiments nous avons choisi d'exprimer les concentrations en carbone organique par unité de volume de sédiment. Ce mode d'expression conduit à une estimation plus exacte du stock organique sédimentaire (fig. 7).

On observe une zonation nord-sud avec accumulation organique dans la partie sud de la baie. Cette répartition doit être mise en relation avec la configu-

ration et l'hydrodynamique de la baie. En particulier, l'anse sud (stations 14.15.16) qui se situe en dehors des zones influencées par les courants de marée ou par les échanges avec la baie de Koumassi, abritée des vents dominant de direction S.-O., constitue une zone de calme propice à la sédimentation du matériel particulaire.

La charge totale en carbone organique, déterminée par planimétrie pour les 78 % de la baie effectivement prospectés, peut être estimée à 397 tonnes correspondant à une concentration moyenne de $93 \text{ g.m}^2.\text{cm}^{-1}$. Malgré l'existence de zones sableuses à très faible capacité absorbante et de courants hydrodynamiques de surface importants principalement dans la partie ouest, la baie de Biétri est l'objet d'une sédimentation organique active qui conduit à une accumulation sédimentaire importante. Ce phénomène résulte de la richesse en seston organique observée au sein de la colonne d'eau libre.

Évolution de la matière organique sédimentaire au cours de son enfouissement

La matière organique produite *in situ* ou apportée par les effluents après sédimentation vient enrichir la fraction organique des sédiments de surface. Lors de cette sédimentation elle est l'objet d'attaques enzymatiques qui conduisent par hydrolyse à la libération des éléments les plus labiles. En particulier le rapport C/N du matériel organique correspondant à la couche superficielle du sédiment d'une station profonde ($Z = 10 \text{ m}$) montre comparativement à celui déterminé pour le seston des eaux superficielles une forte libération des composés azotés liée aux processus d'ammonification (C/N du Seston 6,7, C/N sédimentaire 11,8). Cette évolution se poursuit ensuite au sein de la colonne sédimentaire en milieu confiné.

Dans les 10 premiers centimètres, la décroissance de l'azote et du carbone est très rapide; l'azote y étant plus rapidement métabolisé le rapport C/N atteint une valeur maximale à -7 cm (fig. 8). A partir de ce niveau les concentrations en carbone, en azote ainsi que leurs rapports respectifs restent sensiblement constants. A partir de 22 cm les concentrations en carbone et azote augmentent très brutalement et atteignent à -28 cm des valeurs supérieures à celles observées en surface du sédiment.

Ce brusque accroissement noté en profondeur ne peut être attribué qu'à une modification de la nature et/ou de la quantité du matériel organique mort sédimenté.

En surface, les fortes diminutions observées pour le carbone et l'azote coïncident avec une disparition très rapide des composés glucidiques (déterminés sur les fractions acidosolubles et fulvique) confirmant

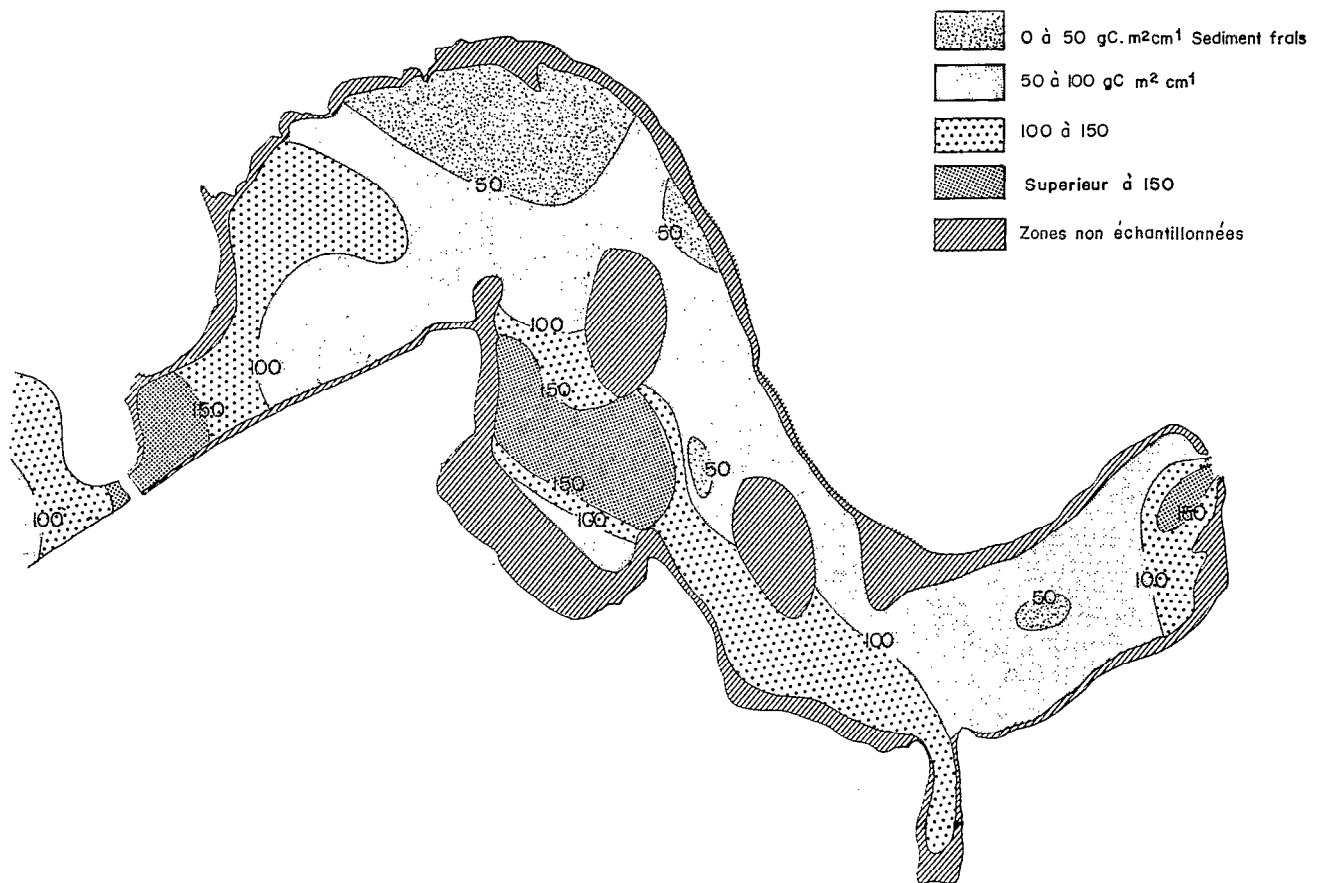


FIG. 7. — Répartition spatiale des concentrations en carbone organique à l'interface eau-sédiment de la baie de Biétri

TABLEAU VI

Analyse chimique de la matière organique sédimentaire (station 27) : (a) en $\mu\text{g.g}^{-1}$; / valeurs non déterminées ; (b) en % du C. total

Niveau	C.Acido soluble		C.Acido fulvique		C.Acido Humique		C.Hydrolysable		C.Humine		C.Total	N.Total	C/H
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)			
0.2 cm	1350	2,3	4625	7,9	13140	22,4	7270	12,4	32295	55,0	58680	5800	10,1
2.4	660	1,3	1830	3,6	9570	18,6	1030	2,0	38310	74,5	51400	4900	10,5
4.6	515	1,1	860	1,8	9270	19,1	970	2,0	36945	76,0	48560	4500	10,6
6.8	255	0,6	1135	2,8	4315	10,5	825	2,0	34710	84,1	41240	3600	11,5
8.10	265	0,7	1615	4,3	6370	17,0	750	2,0	28480	76,0	37480	3700	10,1
10.12	240	0,6	1280	3,3	4555	11,6	780	2,0	32425	82,5	39280	3700	10,6
12.14	340	0,8	1725	4,2	5275	12,8	225	0,5	33755	81,7	41320	3800	10,9
16.18	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	43120	3900	11,1
16.18	430	1,0	2010	0,5	4710	10,6	890	2,0	36360	81,9	44400	4000	11,1
18.20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	44560	4100	10,9
20.22	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	44200	3800	11,6
22.24	425	1,0	2005	4,8	4360	10,4	840	2,0	34370	81,8	42000	3900	10,8
24.26	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	52200	5200	10,0
26.28	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	71480	6400	11,2

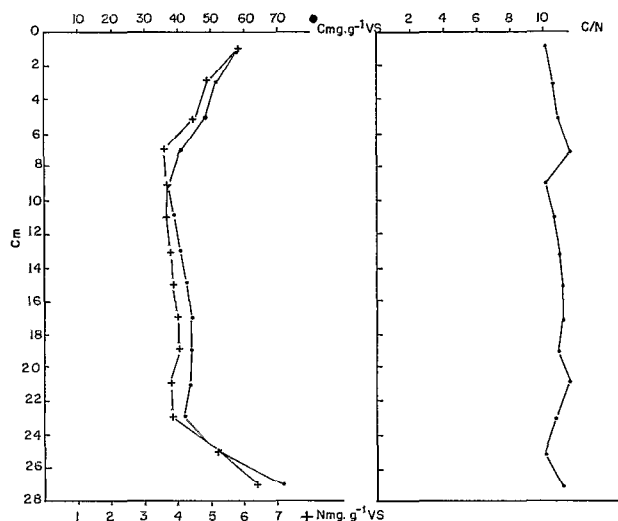


FIG. 8. — Évolution en fonction de l'enfouissement des concentrations en carbone et azote au sein d'une carotte sédimentaire prélevée à la station 27

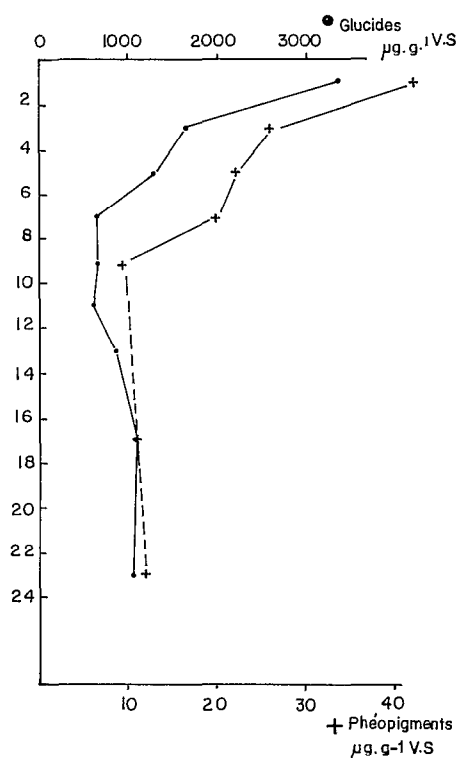


FIG. 9. — Évolution en fonction de l'enfouissement des concentrations sédimentaires en glucides et en phaeopigments (station 27)

ainsi l'élimination très rapide des fractions hydrosolubles facilement métabolisables. Cette minéralisation des composés carbonés de faible poids moléculaire coïncide avec une disparition très rapide des phaeopigments sédimentaires issus du matériel végétal sédimenté (fig. 9). Le carbone organique déterminé globalement et représenté fig. 8 a été ensuite fractionné par des extractions successives libérant des composés de plus en plus intimement liés à la matrice minérale. Les résultats de ce fractionnement chimique sont représentés sur la figure 10. Le carbone résiduel de l'humine formé par des composés très fortement polymérisés et intimement liés au support minéral représente plus de 50 % du C Total et ceci dès la surface. Ce résultat traduit la longue évolution présédimentaire de la matière organique au cours de son transit au sein de la colonne d'eau libre de cette station profonde.

L'activité minéralisatrice au sein des sédiments peut être mise en évidence par les diminutions pondérales et relatives des fractions acido-soluble et hydrolysable conduisant ainsi à un enrichissement des composés les plus polymérisés ; ceux-ci dès 7 cm représentent plus de 80 % des composés organiques.

Dans les couches sédimentaires profondes cette activité minéralisatrice est limitée par un piégeage du matériel organique sous forme de complexes argilo-humiques au sein des fractions minéralogiques fines. De ce fait le taux de matière humifiée (ou facteur humique BORDOVSKIY, 1965) mis en solution au cours de l'extraction alcaline diminue avec la profondeur passant de 30 % à 15 %. De plus, dans

les couches superficielles, cette diminution du facteur humique coïncide avec un accroissement du pourcentage d'acides humiques au sein de la matière alcalino-soluble. Les acides fulviques ne représentent plus à 4-6 cm que 8 % des composés humiques. Enfin l'analyse en chromatographie sur gel de Dextrane (G 100) des acides humiques purifiés confirme le haut degré de polymérisation de ces molécules. Les composés exclus c'est-à-dire possédant un poids moléculaire supérieur à 100.000 constituent 70 % de l'ensemble des acides humiques (fig. 11).

Pour cette station profonde la matière organique sédimentaire présente dès son dépôt un haut degré d'évolution. Dans les sédiments, en l'absence d'oxygène, l'activité minéralisatrice des organismes hétérotrophes est très rapidement freinée au profit des processus d'humification et de piégeage du matériel organique détritique au sein des pelites. De ce fait le rôle fonctionnel du milieu sédimentaire en zone profonde à Biétri peut se résumer globalement à des phénomènes de condensation et d'immobilisation de la matière organique. Les processus de minéralisation qui ne concernent que les molécules les plus labiles se déroulent d'une manière quasi

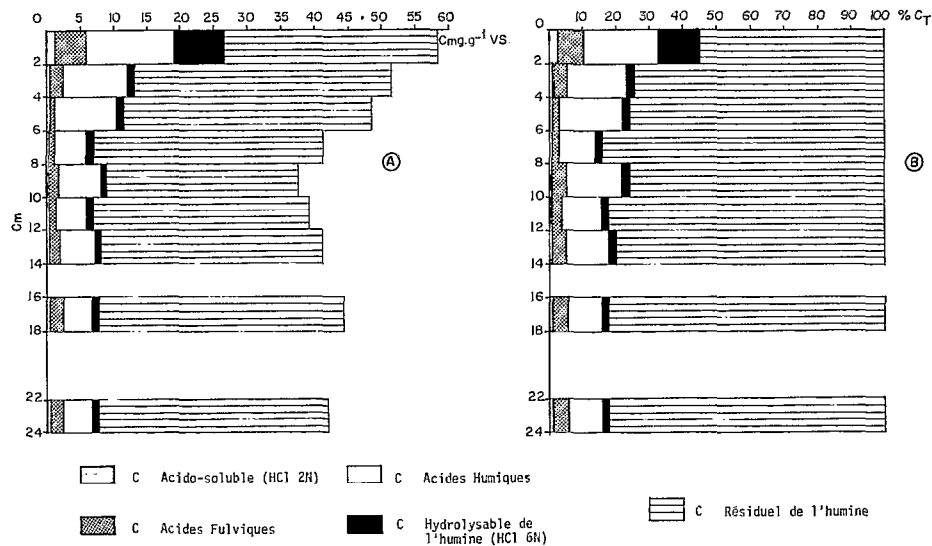


FIG. 10. — Fractionnement de la matière organique sédimentaire (station 27). A : Représentation pondérale ; B : Pourcentage relatif des diverses fractions en fonction de la concentration totale en C. organique

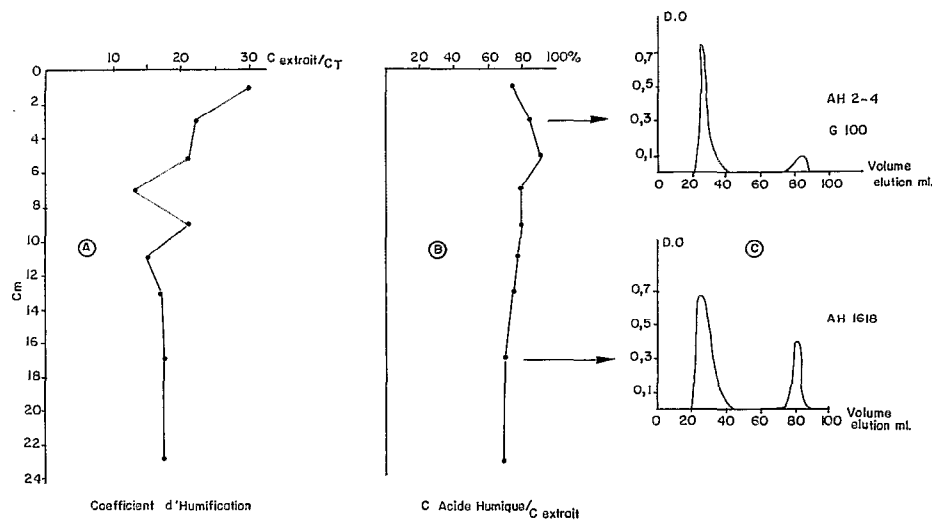


FIG. 11. — Évolution en fonction de l'enfouissement de quelques caractéristiques du carbone organique dans la matière humifiée sédimentaire (station 27). A : Coefficient d'humification ; B : Rapport entre les concentrations en carbone des acides humiques et les concentrations en composés alcalino-solubles ; C : Chromatogramme des acides humiques purifiés sur gel de Dextrane G 100

exclusive dans la couche superficielle du sédiment où environ 50 % des composés acido-solubles et 85 % des composés hydrolysables sont métabolisés.

Peuplements bactériens associés à la matière organique sédimentaire

Les peuplements bactériens présents au sein des sédiments constituent 2 communautés : l'une spéci-

quement inféodée au milieu sédimentaire, l'autre issue du milieu aquatique et entraînée lors de la sédimentation du matériel particulaire. Ce phénomène de sédimentation permet l'existence d'une microflore hétérotrophe aérobie ou microaérophile au sein des sédiments les plus anoxiques (BENSOUSSAN *et al.*, 1978).

Dans les sédiments prélevés à la station 27 ces 2 communautés dénombrées sur milieu gelosé sont

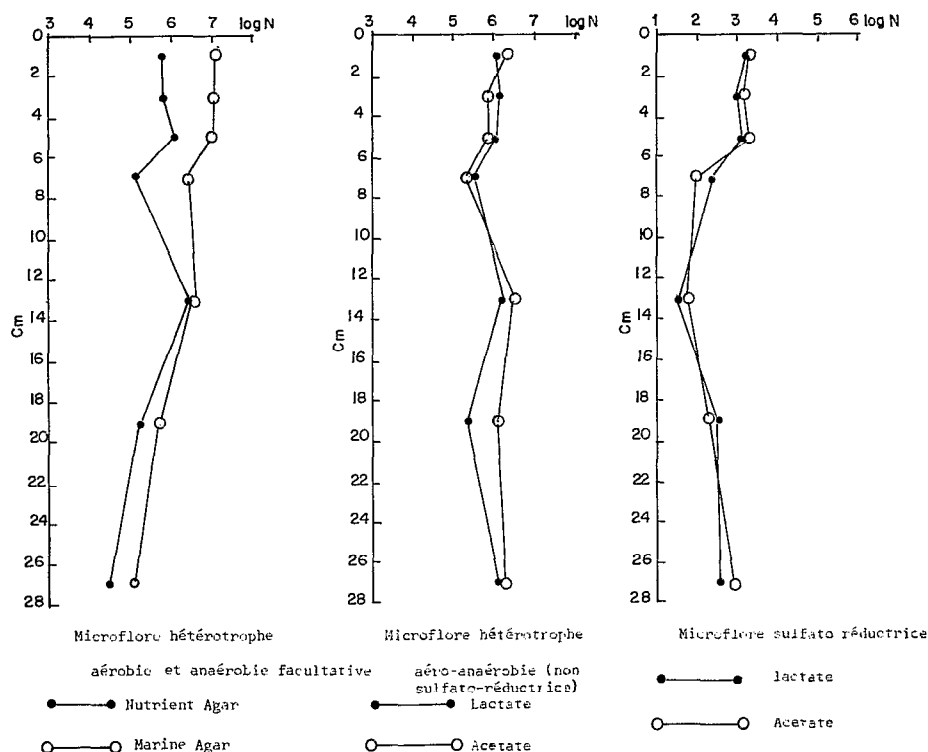


FIG. 12. — Densité des peuplements bactériens hétérotrophes aérobie et anaérobies (station 27) (log N Bactéries ml⁻¹)

dans un rapport en faveur des hétérotrophes anaérobies (fig. 12).

Les bactéries constituant les microflores hétérotrophes aéroanaérobies non sulfatoréductrice qui utilisent des acides organiques de faible poids moléculaire (acétate, lactate) ne montrent pas d'évolution numérique en fonction de l'enfouissement. Les bactéries métabolisant le lactate dominent dans les couches subsuperficielles du sédiment (2 à 8 cm) alors que celles utilisant l'acétate prédominent dans les couches profondes et dans la pellicule de surface en contact avec l'eau libre.

Le nombre de bactéries sulfatoréductrices (B.S.R.) dans les 6 premiers cm, où il représente 1/1.000^e des hétérotrophes aéroanaérobies, décroît ensuite avec la profondeur et passe à une valeur minimale à 12-14 cm où il ne constitue plus que 1/100.000^e des hétérotrophes anaérobies. En dessous de ce niveau les densités de B.S.R. augmentent de nouveau et atteignent à 24 et 26 cm la valeur de 12.10² germes/ml soit 1/1.000^e des hétérotrophes aéroanaérobies.

A l'opposé des bactéries hétérotrophes aéroanaérobies, le rapport entre les densités de B.S.R. lactate + ou acétate + ne varie pas significativement avec la profondeur.

Les bactéries hétérotrophes aérobie et anaérobies facultatives montrent, pour toutes les stations, une décroissance avec l'enfouissement. Cette décroissance est d'autant plus marquée que les densités sont élevées dans les couches sédimentaires superficielles (fig. 13). En effet, si les densités de surface varient selon les stations de 10⁵ à 10⁷, dans les couches profondes les concentrations sont toutes voisines de 10⁴ germes/ml. Les dénombrements réalisés dans les sédiments de surface selon une radiale O. Est ne montrent pas d'enrichissement des communautés bactériennes hétérotrophes aérobie et anaérobies facultatives. Elles ne reflètent donc pas le phénomène d'eutrophisation progressive qui affecte les populations phytoplanctoniques.

Par l'utilisation de deux milieux de culture différents par leur salinité et leur teneur en composé organique nous avons tenté d'utiliser les bactéries hétérotrophes aérobie comme organismes test permettant de retracer l'histoire sédimentologique de la baie. En effet au dernier paragraphe nous avons observé un enrichissement et une modification de la composition élémentaire de la matière organique dans les couches sédimentaires profondes.

L'étude des populations bactériennes hétéro-

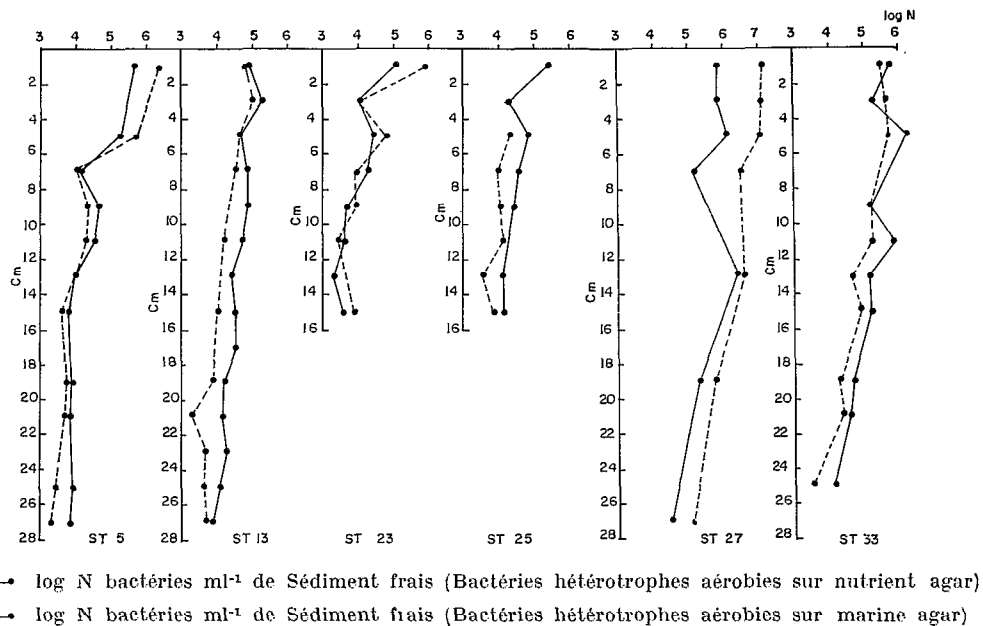


FIG. 13. — Densité des bactéries hétérotrophes aérobies au sein des sédiments d'une radiale ouest-est (baie de Biétri)

trophes aérobies associées à cette matière organique devait pouvoir fournir des informations relatives à son origine marine ou continentale.

En réalité les deux milieux tests (Nutrient Agar et Milieu 22160 de Zobell) nous ont fournis des évaluations sensiblement équivalentes ; de plus leurs variations sont très étroitement corrélées ($r_s = 0,901$, $N = 51$). L'observation microscopique des colonies isolées révèle une dominance de bactéries Gram+ (Bacilles sporulés et cocci). Cette prédominance est généralement observée dans les dépôts marins récents (BENSOUSSAN *et al.*, 1978). De plus ces bactéries comparativement à celles isolées des eaux libres montrent en culture pure des capacités métaboliques plus diversifiées (CAUMETTE, *en préparation*).

Bien qu'héritées des eaux libres par sédimentation, les bactéries aérobies sédimentaires constituent un peuplement spécifique (GUIRAL et CAUMETTE, 1983).

Les conditions écologiques très particulières (1) enregistrées au niveau des sédiments exercent une pression de sélection très forte sur les communautés colonisant ce type de milieu. La composition des

peuplements bactériens au cours de leur enfouissement reflète donc de moins en moins la structure des peuplements originels.

De ce fait notre tentative de retracer l'histoire sédimentologique de la baie de Biétri à partir de la comparaison des densités bactériennes hétérotrophes aérobies sur milieu salé et doux s'est avéré impossible.

De plus la croissance en fonction de la teneur en sel du milieu de culture n'est peut-être pas le critère le plus discriminant pour isoler des peuplements bactériens strictement marins ou lagunaires (GUELORGE et PERTHUISOT, 1983).

CONCLUSION

La baie de Biétri, soumise à des rejets urbains et agro-industriels, présente toutes les caractéristiques d'un milieu eutrophe. La biomasse algale (traduite par les concentrations en chlorophylle) y est très élevée et s'accroît de l'entrée de la baie à sa partie orientale. Cette richesse des eaux se répercute directement sur les dépôts qui montrent une charge organique anormalement élevée. Localement, cette

(1) Richesse en composés organiques à haut degré d'évolution qui favorisent le développement et le maintien d'une flore bactérienne à potentialité enzymatique élevée.

Confinement qui, tout en favorisant les contacts substrats-organismes, accroît les compétitions interspécifiques et limite le développement des bactéries hétérotrophes aérobies strictes.

richesse est modulée en fonction des paramètres hydrodynamiques et bathymétriques qui conditionnent les taux de sédimentation. De plus, la granulométrie des sédiments joue un rôle non négligeable dans l'accumulation de la matière organique. Dans les zones profondes à caractère fortement réducteur ($Eh < -350$ m V), la matière organique s'accumule et présente dès la surface un très haut degré d'évolution. Ce caractère traduit la forte activité des organismes minéralisateurs présents dans l'eau libre. Cependant à la surface des sédiments cette matière organique est à nouveau soumise à une minéralisation complémentaire. A cette activité biologique de dégradation enzymatique de surface (affectant principalement les glucides et les composés azotés) se superposent en profondeur des processus d'insolubilisation de nature géochimique. Cette activité biologique est le fait d'organismes bactériens essentiellement anaérobies, les bactéries hétérotrophes aérobies, bien qu'à forte densité, ne peuvent, dans un tel contexte, jouer un rôle réellement efficace. Cette minéralisation anaérobie sédimentaire se solde par une production de composés soufrés réduits (les sulfates d'origine marine servant d'accepteur terminal d'électrons pour les réactions d'oxydation).

En se référant aux données relatives au seston organique, on constate un accroissement très rapide de la charge détritique non chlorophyllienne lié à l'accroissement des rejets urbains. Cependant, malgré cette augmentation de la charge polluante, la minéralisation de la matière organique semble toujours se dérouler d'une manière satisfaisante selon deux étapes successives et complémentaires. La première

se déroule dans les eaux libres oxygénées, la seconde en phase anaérobie au niveau des sédiments. Les composés minéraux libérés des dépôts sont ainsi restitués à l'écosystème et participent à l'accroissement de la biomasse algale photosynthétique responsable en grande partie de l'oxygénation des eaux de surface. Cette très importante charge polluante a profondément modifié la structure des communautés phytoplanctoniques en favorisant le développement d'espèces de petites tailles à activité métabolique très intense (Dinoflagellés, Englenophycées, Cryptophycées et Chlorophycées, ARFI *et al.*, 1981).

Dès à présent, ce milieu fonctionne comme un bassin de lagunage naturel dont l'équilibre précaire n'est conservé que par l'existence de communications avec des milieux moins eutrophes (en particulier par les pénétrations d'eaux marines via le canal de Vridi).

L'augmentation des rejets organiques prévue dans ce milieu dans les plans d'assainissement de la ville d'Abidjan nécessite donc une surveillance accrue des processus de minéralisation, de sédimentation et d'immobilisation de la matière organique particulaire. Les temps de génération et les taux d'activité métabolique des bactéries hétérotrophes aérobies et des organismes photosynthétiques sur lesquels repose l'équilibre actuel du milieu ne pouvant s'accélérer indéfiniment au rythme de l'accroissement des rejets.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'ORSTOM le
14 juin 1984*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARFI (R.), DUFOUR (P.) et MAURER (D.), 1981. — Phytoplancton et Pollution : Premières études en baie de Biétri, Côte d'Ivoire. Traitement mathématique des données. *Océanologica Acta*, 4(3) : 319-330.
- BENSOUSSAN (M.), BIANCHI (A.), BIANCHI (M.) et LIZARRAGA-PARTIDA (M. L.), 1978. — Potentialités cataboliques des populations bactériennes isolées des sédiments de la fosse de Cariaco, de la plaine du Demerara et du cône de l'Amazone, *in*: Géochimie organique des sédiments marins profonds, Orgon II, Atlantique - N. E. Brésil, Éd. C.N.R.S. Paris : 13-26.
- BORDOVSKIY (O. K.), 1965. — Accumulation and transformation of organic substances in marine sediments special issue : organic matter in marine sediments. *Mar. Geol.*, 3 : 3-114.
- CHARLES-DOMINIQUE (E.) et DURAND (J. R.), 1979. — Les lagunes de Côte d'Ivoire. Bibliographie provisoire. *Arch. Sci. C.R.O. Abidjan*, 5 : 1-24.
- COLCANAP (M.) et DUFOUR (P.), 1982. — L'assainissement de la ville d'Abidjan. Évolution, Recommandations, Proposition d'alternatives. Rapport d'expertise auprès des Ministères de l'Environnement de Côte d'Ivoire de France : 1-299.
- DUBOIS (M.), GILLE (K. A.), HAMILTON (J. K.), REBERS (P. A.) et SMITH, 1956. — Colorimetric method for determination of sugar and related substances. *Anal. Chem.*, 28 : 350-356.
- DUFOUR (P.) et SLEPOUKHA (M.), 1975. — L'oxygène dissous en lagune Ébrié : Influence de l'hydroclimat et des pollutions. *Doc. Scient. C.R.O. Abidjan*, 6 (12) : 78-118.
- GUELORGE (O.) et PERTHUISOT (J. P.), 1983. — Le domaine paralique : Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. *Travaux du laboratoire de Géologie ENS*, (16) : 1-137.

- GUIRAL (D.), 1983. — Physicochimie et biogéochimie des eaux et des sédiments à la station d'aquaculture de Layo (lagune Ébrié, Côte d'Ivoire). *Doc. Scient. C.R.O. Abidjan*, 14 (1) : 1-29.
- GUIRAL (D.) et GAUMETTE (P.), 1983. — Description et analyse de la matière organique et des communautés bactériennes associées dans la matrice sédimentaire d'une lagune tropicale (baie de Biétri, Côte d'Ivoire). Communication au XXII^e congrès de l'association internationale de limnologie, Lyon, 21-28 septembre 1983.
- GUIRAL (D.) et LANUSSE (A.). — Contribution à l'étude hydrodynamique de la baie de Biétri. *Doc. Scient. C.R.O. Abidjan (à paraître)*.
- HOLM HANSEN (O.) et BRIEMANN, 1978. — Chlorophyll a determination improvements in methodology. *Oikos*, 30 : 438-447.
- LEMASSON (L.), PAGÈS (J.) et DUFOUR (P.), 1981. — Lagune de Biétri. Bathymétrie, courants et taux de renouvellement des eaux. *Arch. Scient. C.R.O. Abidjan*, 3 : 13-24.
- LEMASSON (L.), PAGÈS (J.), DUFOUR (P.) et CREMOUX (J. L.), 1981. — Matière organique particulaire et biomasse dans une lagune tropicale. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 13 (3) : 191-212.
- MENZEL (D. W.) et CORWIN (N.), 1965. — The measurement of total phosphorus in sea water based on the liberation of organically bound fraction by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.*, 10 (2) : 280-282.
- NOVO (B.), 1974. — La pollution des eaux par l'industrie d'Abidjan. Rapport dactylographié Secrétariat d'État chargé des mines, Abidjan : 1-15.
- PFENNING (N.), WIDDEL (F.) et TRÜPPER (H. G.), 1981. — The dissimilatory sulfate reducing bacteria, in : M. P. Starr, H. Stolp, H. G. Trüpper, A. Balodus, H. G. Schlegel (eds), *The Prokaryotes*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York : 926-947.
- STRICKLAND (J. D. H.) et PARSONS (T. R.), 1968. — A Practical Handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 167 : 1-305.