

***Cycle hydrologique annuel
d'une baie lagunaire eutrophe :
la baie de Biétri
(lagune Ebrié, Côte d'Ivoire)***

Robert ARFI (1), Daniel GUIRAL (2),
Jean-Pascal TORRETON (2)

RÉSUMÉ

La baie de Biétri est une baie eutrophe située dans la partie estuarienne de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Une étude du cycle hydrologique annuel conduite en 1979 et 1980 en 3 stations et portant sur la température, la salinité, la transparence, l'oxygène, le $P-PO_4$ et les pigments chlorophylliens a permis de définir la double zonation horizontale et verticale que l'on y observe. La première, limitée aux variables biologiques, se reflète dans le caractère d'eutrophie qui croît d'ouest en est, en liaison avec l'éloignement de la communication avec l'océan. La partie orientale est ainsi caractérisée par une biomasse algale importante (plus de 50 mg m^{-3} de chlorophylle a), sans saisonnalité apparente et aboutissant périodiquement à des crises dystrophiques (plus de 100 mg m^{-3} de chlorophylle a). La partie occidentale présente une évolution saisonnière marquée caractérisée par un pic annuel de chlorophylle a, en saison des pluies (60 à 80 mg m^{-3} contre 2 à 10 mg m^{-3} le reste de l'année). Concernant essentiellement les variables physico-chimiques, la stratification verticale s'observe au-dessus des dépressions de 10 à 14 m , en relation avec les cycles marqués de salinité et de température des eaux de surface de la baie. En début d'année (période d'étiage), la salinité est de 27 à 30 ‰ et diminue avec l'arrivée de la grande saison des pluies en avril-mai, à laquelle succède la crue du Comoë jusqu'en novembre. La présence permanente d'eau marine piégée au fond de ces dépressions isolées induit une stratification de densité 9 à 10 mois sur 12. Celle-ci délimite un hypolimnion fortement anoxique où l'on observe une accumulation de phosphates. L'augmentation progressive de la salinité dans la lagune au cours de la Grande Saison Sèche et l'installation d'une remontée côtière en mer en janvier, provoquent un affaiblissement annuel du gradient de densité pour une courte période.

MOTS-CLÉS : Lagunes côtières — Stratification — Eutrophication — Circulation verticale — Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

ANNUAL HYDROLOGICAL CYCLE OF AN EUTROPHIC BAY : THE BIETRI BAY (EBRIÉ LAGOON, IVORY COAST)

Located in the estuarine part of the Ebrié Lagoon (Ivory Coast), the Biétri Bay is an eutrophicated area. A study of the annual hydrological cycle performed 1979 and 1980 thre different stations has allowed a more accurate definition of the horizontal and vertical structure of the bay. The first horizontal structure, which affects exclusively

(1) Océanographe, Centre d'océanologie méditerranéenne, Marseille Luminy, France.

(2) Hydrobiologistes ORSTOM, CRO, BP V 18, Abidjan, Côte d'Ivoire.

biological variables, was reflected by eutrophication, which increased with the distance from the opening to the ocean. The eastern part presented a high algal biomass (more than 50 mg m^{-3} chlorophyll a) with no evident annual cycle, evolving periodically into dystrophic crisis (more than 100 mg m^{-3} chlorophyll a). The western part, less eutrophic, showed a marked seasonal cycle, with a strong annual peak of chlorophyll a during the rainy season (60 to 80 mg m^{-3} compared to 2 to 10 mg m^{-3} the rest of the year). Affecting mainly the physical and chemical variables, vertical stratification of the water column was observed above the 10 to 14 m deep depressions, in relation with the pronounced annual cycle of salinity and surface water temperature. During low continental inputs, at the beginning of the year, salinity ranged from 27 to 30‰ and decreased during the main rainy season (beginning in April-May) and the Comoë River flood in November. The stagnation of marine water trapped at the bottom of the isolated depressions induced a density stratification during 9 to 10 months of the year, with an anoxic hypolimnion where phosphates accumulated. The increase of salinity all along the main dry season and the development of coastal oceanic upwelling in January, induced the annual weakening of the density gradient for a short period of time.

KEY WORDS : Coastal lagoons — Stratification — Eutrophication — Vertical mixing — West Africa.

Le système lagunaire Ebrié (Côte d'Ivoire) communique depuis 1951 avec l'océan Atlantique par le canal de Vridi. Cette lagune s'étend sur 130 km le long du littoral ivoirien, et reçoit les eaux du fleuve Comoë et de plusieurs autres rivières, principalement la Mé et l'Agnéby. Les variations hydrologiques sont liées à un facteur spatial (éloignement du canal de Vridi, et donc de l'influence marine), et à un double facteur saisonnier : importance des pluies et des débits fluviaux, d'une part, alternances des saisons sèches et humides d'autre part. La lagune est ainsi constituée d'ensembles juxtaposés géographiquement dont l'extension est variable au cours du temps, et qui présentent des conditions écologiques souvent contrastées.

L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes a été décrit par DURAND et CHANTRAINE (1982). DUFOUR et DURAND (1982) et DUFOUR et LEMASSON (1985) en ont respectivement décrit la production végétale et le régime nutritif. Ces travaux ont mis en évidence l'importance des apports d'eau douce, dans le fonctionnement général de cet écosystème, en insistant sur leur variabilité interannuelle qui peut parfois masquer certains aspects saisonniers. A cette variabilité temporelle, s'ajoute une hétérogénéité spatiale liée aux localisations excentrées de la principale influence continentale (le Comoë débouche à l'extrémité est), et de l'influence océanique (le canal de Vridi, intéresse plutôt la partie centre-est de la lagune). Cette hétérogénéité se reflète au niveau de l'hydrologie, du régime des éléments nutritifs et de la productivité des eaux (DUFOUR, 1984).

Semi-fermée et localisée au centre de la zone d'estuaire (zone III, d'après PAGÈS *et al.*, 1979), la baie de Biétri constitue une entité particulière au sein de cet ensemble (fig. 1). Peu profonde (4 m en moyenne), sa superficie totale est de $6,05, 10^6 \text{ m}^2$,

pour un volume de $22,9, 10^6 \text{ m}^3$. A partir d'une courbe hypsométrique (ARFI et GUIRAL, 1989) on peut estimer les surfaces et les volumes correspondant aux profondeurs comprises entre -5 et -13 m (profondeur maximale). Ceux-ci sont respectivement de $1,36 10^6 \text{ m}^2$ (22% de la surface totale) et $11,2 10^6 \text{ m}^3$ (49% du volume total). Bordée par une zone industrielle, la baie de Biétri est particulièrement polluée par des rejets agro-industriels et domestiques (PAGÈS *et al.*, 1980, ARFI *et al.*, 1981), ce qui se traduit par une intense eutrophisation des eaux (MAURER, 1978; GUIRAL, 1984). Située à proximité du canal de Vridi, l'influence océanique (dont la variabilité a été décrite par MORLIÈRE, 1970) y est particulièrement marquée. En raison de sa localisation, l'effet des crues fluviales est également observé dans cette baie. Les principales caractéristiques hydrodynamiques de cette baie stratifiée dans ses parties les plus profondes ont été décrites (LEMASSON *et al.*, 1981; GUIRAL et LANUSSE, 1984), ainsi que certains aspects du plancton (MAURER, 1978; CAUMETTE *et al.*, 1983) et de l'ichtyocénose (ALBARET et CHARLES-DOMINIQUE, 1982). Enfin, des travaux portant sur les microorganismes ont été réalisés par CAUMETTE (1984, 1985) et CARMOUZE et CAUMETTE (1985). Mais peu de données concernent l'évolution annuelle de l'hydrologie de la baie, et en particulier la brutale déstratification saisonnière que l'on y observe. Le présent travail réalisé sur ce milieu eutrophe vise à préciser ce cycle hydrologique annuel à partir de données recueillies lors d'une étude qui s'est déroulée entre janvier 1979 et décembre 1980 (CHANTRAINE *et al.*, 1984). Il sera suivi d'une seconde étape, plus particulièrement centrée sur les conditions de l'atténuation de la stratification, et les conséquences biogéochimiques et écologiques qui en découlent (GUIRAL *et al.*, 1989).

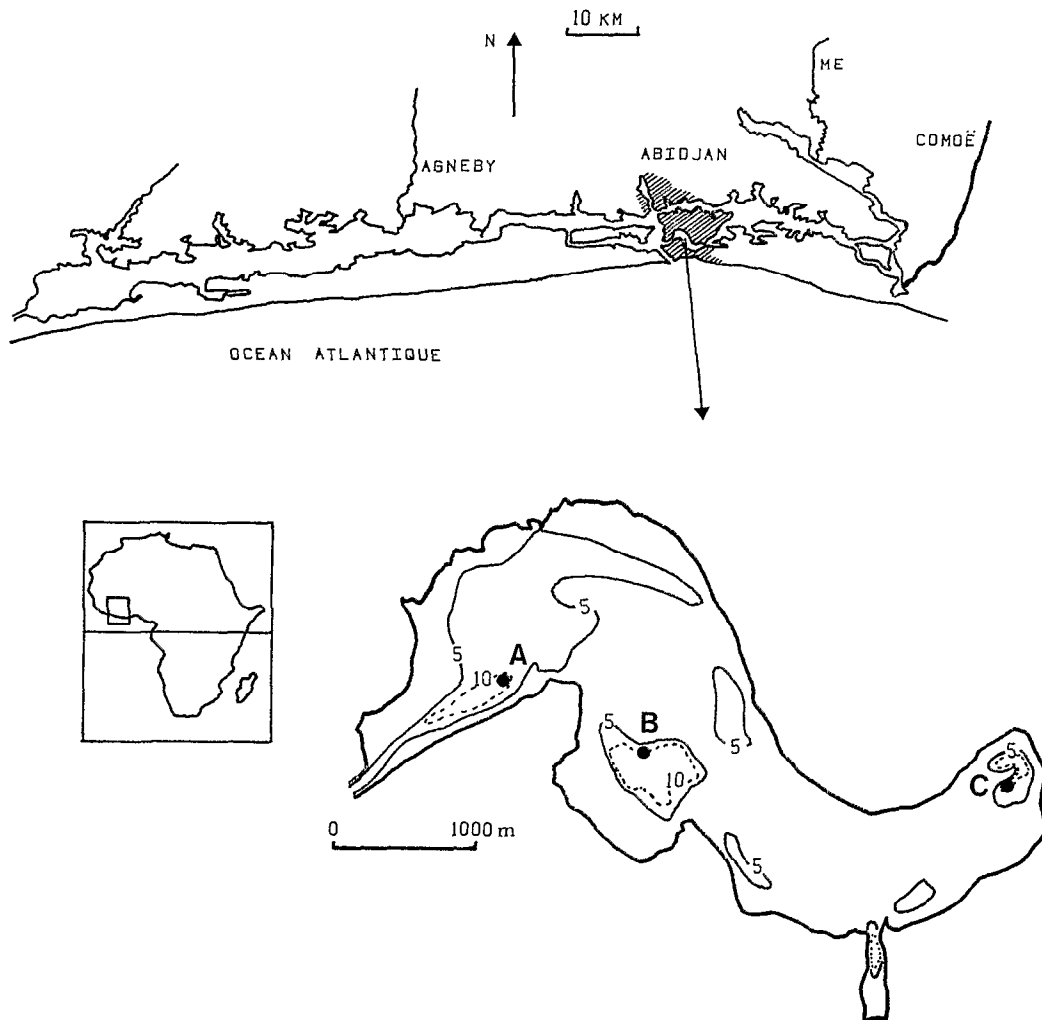


FIG. 1. — Carte de la lagune Ebrié et emplacement des stations de prélèvement en baie de Biétri
Map of Ebrié lagoon and location of the sampling stations in the Biétri bay

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Un réseau de stations réparties sur l'ensemble de la baie a été exploré en 1979 et 1980 sur une base mensuelle. Afin d'analyser le cycle hydrologique annuel moyen de la baie, trois d'entre elles, de profondeur comparable, ont été retenues (fig. 1) : la première, située à l'entrée de la baie dans l'axe d'un chenal de navigation (station A, profondeur : 10 m), reflète la situation prévalant dans la zone de communication entre la baie de Biétri et la partie estuarienne de la lagune Ebrié. La seconde (station B, profondeur : 9 m), présente les conditions générales que l'on peut observer au centre de la baie.

La troisième, enfin (station C, profondeur 11 m), est localisée dans la partie la plus confinée de la baie, à proximité du remblai de la digue de Koumassi. Le percement de ce remblai et l'installation de buses en janvier 1980 ont quelque peu atténué l'isolement de la baie, en permettant une communication limitée des eaux de surface entre les baies de Biétri et de Koumassi, cette dernière étant plus directement influencée par les eaux du Comoë. Les points B et C sont situés au-dessus d'excavations obtenues lors de l'extraction de sédiments pour le comblement et l'aménagement des zones portuaires.

L'étude hydrologique (32 sorties) a porté sur les paramètres suivants :

- température et salinité (sonde Y.S.I. SCT 33),
- transparence de l'eau estimée par la profondeur de disparition d'un disque de Secchi,
- pigments chlorophylliens (extraction à l'acétone et mesure au fluorimètre selon YENTSCH et MENZEL, 1963),
- oxygène dissous, dosé par la méthode de Winkler,
- phosphates dissous, dosés sur autoanalyseur selon STRICKLAND et PARSONS, 1968 (données fragmentaires à partir d'avril 1980).

L'eau était prélevée à -1 et -9 m au moyen d'une bouteille de type Niskin, vers 9 h au point A, 11 h au point B et 12 h au point C. Ainsi, les valeurs des variables influencées par un rythme nyctéméral sont comparables à l'échelle saisonnière.

Les données de température et de salinité de l'eau de mer (mesures effectuées à la station hydrologique côtière d'Abidjan; CISOOKO, 1982a et b) fournissent une bonne information sur l'installation et la disparition des remontées saisonnières d'eau profonde océanique face à Abidjan. Les résultats pluviométriques proviennent de la station climatique d'Adiopodoumé située à 15 km de la baie (MONTENY, 1985); les débits du Comoë sont enregistrés à la station de M'Basso par la Direction des ressources en eau de surface (DRES).

RÉSULTATS

1. Le contexte hydroclimatique en 1979 et 1980

1.1. INFLUENCES CONTINENTALES

Si l'on compare les précipitations à la station d'Adiopodoumé en 1979 (2 145 mm) et 1980 (1 137 mm) à la moyenne portant sur la période 1963-1984 (2 005 mm) et aux valeurs extrêmes pour cette période (maximum en 1963, 2 636 mm; minimum en 1980, 1 137 mm), il apparaît que :

— les précipitations de l'année 1979 ont été légèrement supérieures à la moyenne interannuelle de cette période; 1979 peut donc être considérée comme une année à pluviosité « normale »;

— l'année 1980 peut être assimilée à une année fortement déficitaire, la différence tenant essentiellement en une Grande Saison des Pluies (GSP) 1980 beaucoup moins importante (mais de durée normale) qu'en 1979, et à une Petite Saison des Pluies (PSP) 1980 plus courte que celle de l'année précédente (Monteny, 1985).

La différence entre les volumes de précipitations des deux années ne se répercute pas directement sur les volumes d'eau douce apportés par le Comoë. Si le

volume écoulé en 1980 est effectivement inférieur à celui de 1979 (respectivement 5 882 et 7 379 10^6 m³), cette différence apparaît essentiellement liée à des débits plus faibles lors de la Grande Saison des Pluies, et à une crue moins étalée.

Le déficit pluviométrique a donc principalement concerné la région lagunaire, mais non l'essentiel du bassin versant du Comoë, fleuve qui s'étend sur 1 160 km, et draine un bassin versant de 69 900 km². Ce découplage pluies-crues en 1980 paraît être une caractéristique importante de cette année, au cours de laquelle on observe une répartition annuelle des débits et des pluies différente (tabl. I).

TABEAU I

Comparaison des pourcentages d'eau douce qui ont concerné la zone estuarienne de la lagune Ebrié en 1979 et 1980
The seasonality of fresh inputs (rivers and rains) during 1979 and 1980, expressed as % of annual total

		% VOLUME FLUVIAL		% PRÉCIPITATIONS	
		1979	1980	1979	1980
janvier-avril	(GSS)	0,3	0,6	11,8	14,1
mai-juillet	(GSP)	14,2	6,0	50,5	48,5
août-septembre	(PSS)	48,2	50,6	15,0	3,7
octobre-décembre	(PSP)	37,3	42,7	22,7	33,7

1.2. INFLUENCE OCÉANIQUE

Un indice annuel d'intensité de la remontée côtière a été calculé à partir des données quotidiennes des températures en différents points du littoral ivoirien entre 1978 et 1987 (ARFI *et al.*, 1989). L'indice moyen pour cette période à la station d'Abidjan est de 378 °C j (écart-type : 81 °C j). Pour les années 1979 et 1980, ces indices sont respectivement de 280 et 366. L'année 1979 a donc présenté des épisodes froids moins intenses qu'en 1980, en particulier lors de la Grande Saison Froide. Si l'on compare les deux années (fig. 2), on remarque que la GSF a été plus courte en 1979, avec également des minima thermiques moins bas qu'en 1980 alors que la PSF est comparable d'une année à l'autre.

2. Cycle hydrologique annuel en baie de Biétri

2.1. LE CYCLE THERMIQUE

Proche du canal de Vridi et donc plus directement soumise aux influences océaniques, la station A présente un cycle thermique annuel marqué, de périodicité et d'amplitude sensiblement identiques en surface et en profondeur (fig. 3a). La température augmente régulièrement à partir de février avec l'établissement de la Grande Saison Sèche (GSS), le maximum étant atteint en mai ou en juin. Le début

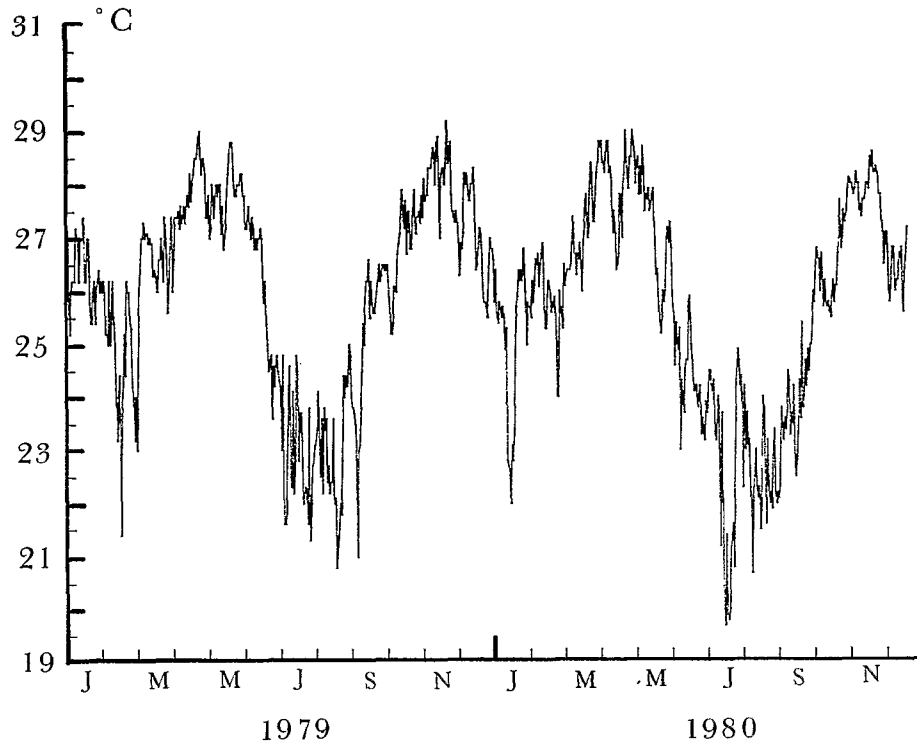


FIG. 2. — Températures quotidiennes à la côte (Port-Bouët) en 1979 et 1980
Daily marine coastal temperatures (Port-Bouët) during 1979 and 1980

de la Grande Saison des Pluies est marqué par un net refroidissement, qui se poursuit lors de la Petite Saison Sèche (PSS), au cours de laquelle on observe le minimum annuel. Cette chute des températures correspond à l'installation de la remontée côtière (Grande Saison Froide océanique côtière -GSF- d'après la classification de MORLIÈRE, 1970) et au refroidissement thermique atmosphérique. À partir du mois d'octobre, le renforcement des influences continentales (crues et précipitations) a pour conséquence l'augmentation progressive de la température; ce réchauffement est interrompu par le retour à une situation de remontée côtière (Petite Saison Froide -PSF- en mer), qui se produit en décembre ou janvier.

Ce cycle thermique annuel se retrouve également aux stations B et C, et correspond ainsi à une évolution saisonnière qui affecte l'ensemble des eaux superficielles de la baie. À l'opposé les eaux profondes au centre et à l'est, isolées au sein d'excavations, sont plutôt homothermes, avec des températures variant peu (température moyenne : 28,7 °C, amplitude annuelle : 1,4 °C).

2.2. LA SALINITÉ

La salinité des eaux superficielles de la baie de Biétri présente un cycle annuel marqué, en relation avec les grands événements hydrologiques qui affectent le secteur estuarien de la lagune (crues ou étiages du Comoë, intrusions marines et intensité variable des remontées d'eau côtières). C'est ainsi (fig. 3b) que la salinité des eaux de surface présente des valeurs comprises entre 27 et 30 ‰ au cours des premiers mois de l'année, période d'étiage du fleuve et donc d'influence marine prépondérante. Puis, ces valeurs diminuent sensiblement avec l'apparition des pluies (GSP); cette dessalure ($S < 5 ‰$) persiste jusqu'à la fin de l'année, la crue du Comoë succédant aux fortes précipitations locales. En profondeur, la salinité varie peu autour de 30 ‰ pour les stations B et C, alors que la station A, dont les eaux sont moins confinées, présente des variations saisonnières plus marquées, en relation avec celles observées pour les eaux de surface.

Le gradient vertical de salinité, particulièrement marqué au centre et à l'est de la baie, s'atténue lors

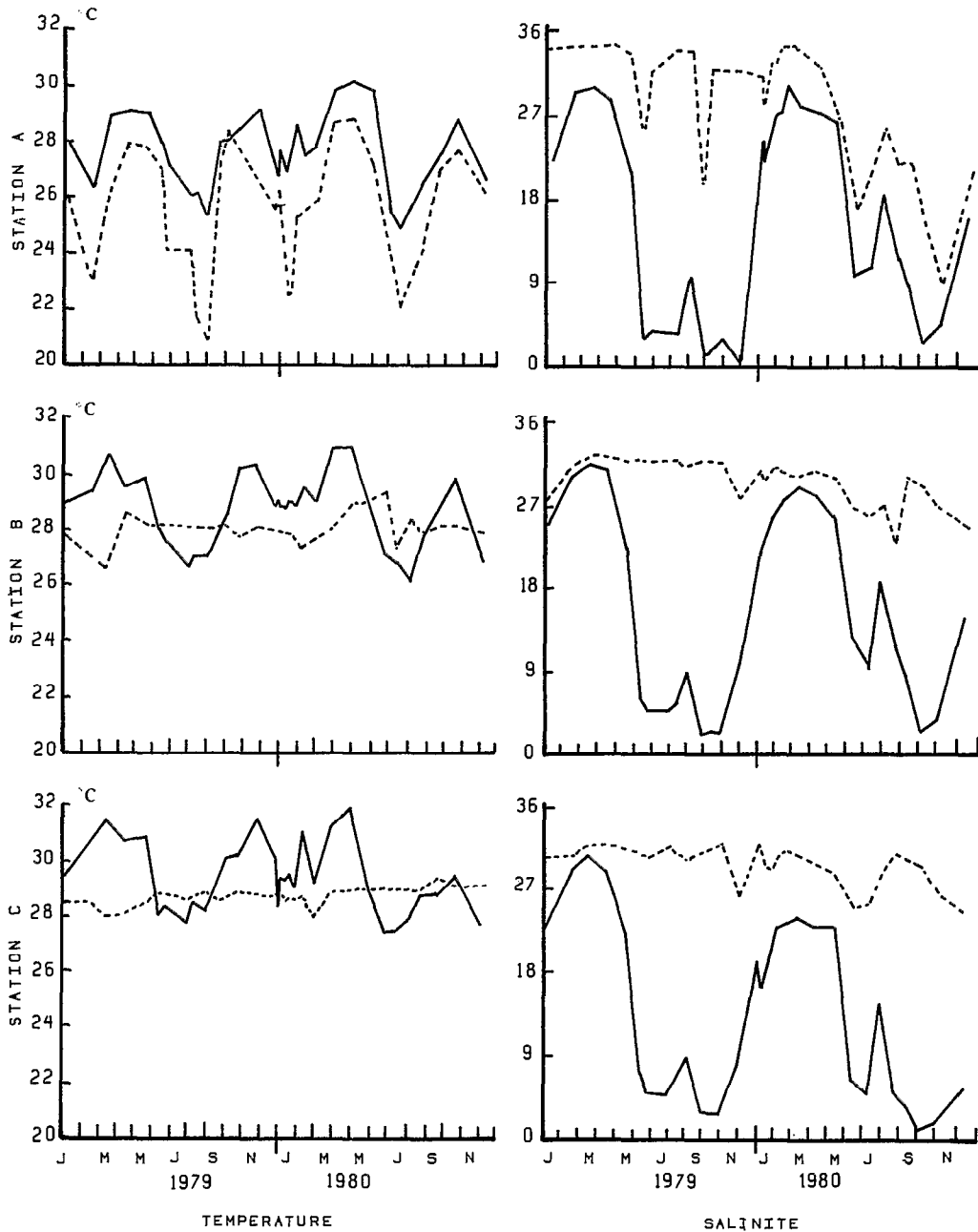


FIG. 3. — Évolution annuelle aux stations A, B et C de la température et de la salinité en surface (—) et au fond (---)
 Yearly evolution of surface (—) and bottom (---) temperature and salinity at stations A, B, C

d'une brève période en janvier-février (différence fond-surface : 1 à 2‰). Liée à la ressalure saisonnière des eaux superficielles de la lagune (influence continentale réduite), cette situation s'oppose à celle observée le reste de l'année, caractérisée par une très

forte stratification (différence de salinité pouvant atteindre 25‰ entre les eaux superficielles et profondes). En 1980, compte tenu du déficit pluviométrique, et de la moindre durée de la crue, la diminution saisonnière de la salinité a été beaucoup

moins prononcée qu'en 1979. Au cours de la GSS de 1980, la couche de surface était ainsi plus salée, et moins nettement isolée de l'hypolimnion. Ceci, combiné à un hydrodynamisme plus prononcé (ouverture des buses de Koumassi) a entraîné une plus forte instabilité verticale de la masse d'eau à cette période, et, globalement, la salinité moyenne des eaux de fond était plus faible en 1980 qu'en 1979.

2.3. LA TRANSPARENCE DES EAUX

La turbidité des eaux augmente d'ouest en est, à mesure que l'on s'éloigne de la communication avec le système lagunaire et l'océan. Les moyennes respectives aux points A, B et C sont de 1,4, 1,1 et 0,8 m, avec des écarts-type de 0,8, 0,4 et 0,3 m. Le secteur oriental de la baie est ainsi le plus turbide, avec une faible variabilité; le secteur occidental est moins turbide, mais les fluctuations sont plus importantes. Cette hétérogénéité des valeurs ne correspond pas à un rythme saisonnier, mais à une variabilité à plus haute fréquence, traduisant l'influence de l'hydrodynamisme lié à la marée (passées d'eau plus ou moins chargée en matériel en suspension selon son origine, baie de Biétri ou système lagunaire extérieur).

A partir de la relation établie par DUFOUR (1984) pour ce milieu, l'épaisseur moyenne de la couche euphotique en ces trois stations peut être estimée à 3,0, 2,4 et 1,7 m. Ainsi, la couche photosynthétiquement active représente respectivement 33, 24 et 18 % de la tranche d'eau en ces trois points.

2.4. LES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS

Les teneurs en pigments chlorophylliens au sein de la couche superficielle varient considérablement d'une extrémité à l'autre de la baie (fig. 4) :

— la station A présente des valeurs relativement peu élevées pour un site lagunaire (entre 2 et 10 mg m^{-3}), avec des pics saisonniers de l'ordre de 60 à 80 mg m^{-3} lors de la saison des pluies. Ces développements sont liés aux apports d'éléments nutritifs, soit directement par les précipitations (LEMASSON et PAGÈS, 1982), soit indirectement par les rejets des émissaires d'orage dans la baie. A l'opposé, la période de crue est caractérisée par des concentrations très faibles, liées au faible temps de résidence en milieu lagunaire des eaux fluviales;

— la station B présente une moindre variabilité saisonnière : les teneurs de base sont plus élevées, de l'ordre de 20 à 30 mg m^{-3} , et le caractère saisonnier des pics est moins marqué;

— la station C est celle où la biomasse chlorophyllienne est la plus abondante. On y observe en fait une succession dans le temps de fortes biomasses algales (valeurs supérieures à 100 mg m^{-3}) à partir d'une valeur de base de l'ordre de 50 mg m^{-3} . Ces

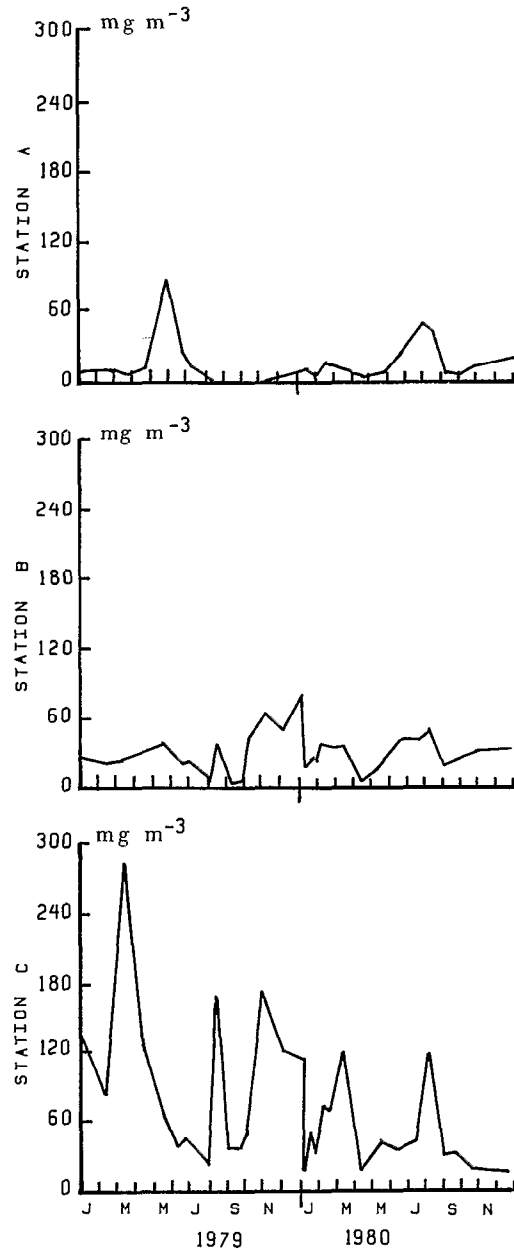


FIG. 4. — Évolution annuelle aux stations A, B et C des concentrations en chlorophylle *a* dans les eaux de surface (les valeurs sont toujours nulles au fond)

Yearly evolution of chlorophyll surface concentrations (values are always 0 near the bottom)

développements phytoplanctoniques n'apparaissent pas liés à un événement extérieur (absence de saisonnalité), mais correspondent plutôt à l'eutrophie de cette partie de la baie et à son instabilité

biologique, caractéristique générale d'un milieu hyperproductif. L'importance de la pollution organique que l'on y observe, et le faible renouvellement des eaux permettent la permanence de cette forte biomasse, et rendent possibles d'exceptionnels mais transitoires développements du phytoplancton (ARFI *et al.*, 1981).

Les eaux profondes ont une biomasse chlorophyllienne très limitée (fig. 4), exprimée le plus souvent sous forme de pigments dégradés. La forte turbidité des eaux superficielles et les conditions d'anoxie qui règnent au sein des couches profondes expliquent cette situation. La biomasse algale présente à ce niveau correspond ainsi à des cellules en cours de dégradation héritées des eaux superficielles par sédimentation.

2.5. L'OXYGÈNE DISSOUS

Pour les concentrations en oxygène dissous, à l'instar de ce qui est observé pour la température et la salinité, on peut opposer les stations B et C à celle située plus à l'ouest dans la baie de Biétri. A la station A (fig. 5), les concentrations varient moins au sein de la couche superficielle (moyenne : $5,90 \text{ mg l}^{-1}$, écart-type : $0,77 \text{ mg l}^{-1}$) que dans la couche profonde (moyenne : $4,71 \text{ mg l}^{-1}$, écart-type : $1,26 \text{ mg l}^{-1}$), où l'on ne relève qu'exceptionnellement des valeurs inférieures à 3 mg l^{-1} . Aux stations B et C, les concentrations en surface sont plus élevées (moyennes respectives : $6,67$ et $8,76 \text{ mg l}^{-1}$), avec une variabilité plus marquée (écarts-type respectifs : $1,52$ et $3,13 \text{ mg l}^{-1}$), sans rythmicité saisonnière apparente. Ces concentrations sont mesurées environ 3 (station A), 5 (B) et 6 heures (C) après le lever du soleil, et correspondent donc à des situations différentes d'activité photosynthétique, mais qui restent comparables pour une même station. L'est de la baie, et, dans une moindre mesure, la partie centrale, étant fortement eutrophisée, parfois dystrophes (MAURER, 1978; DUFOUR, 1984), on y relèvera les plus fortes concentrations mais aussi les plus fortes variations.

Au sein des excavations (stations B et C), l'anoxie est quasi permanente. L'accumulation de matériel organique autochtone et allochtone dans ces strates aphotiques y entraîne une forte consommation d'oxygène. La stratification de densité qui règne dans la baie 10 mois sur 12 et la bathymétrie particulière de ces excavations empêchent le renouvellement de la masse d'eau profonde et son éventuelle réoxygénation par mélange. De plus, toute réoxygénation reposant sur des phénomènes biologiques est impossible, en raison de la très forte charge particulière des eaux de surface.

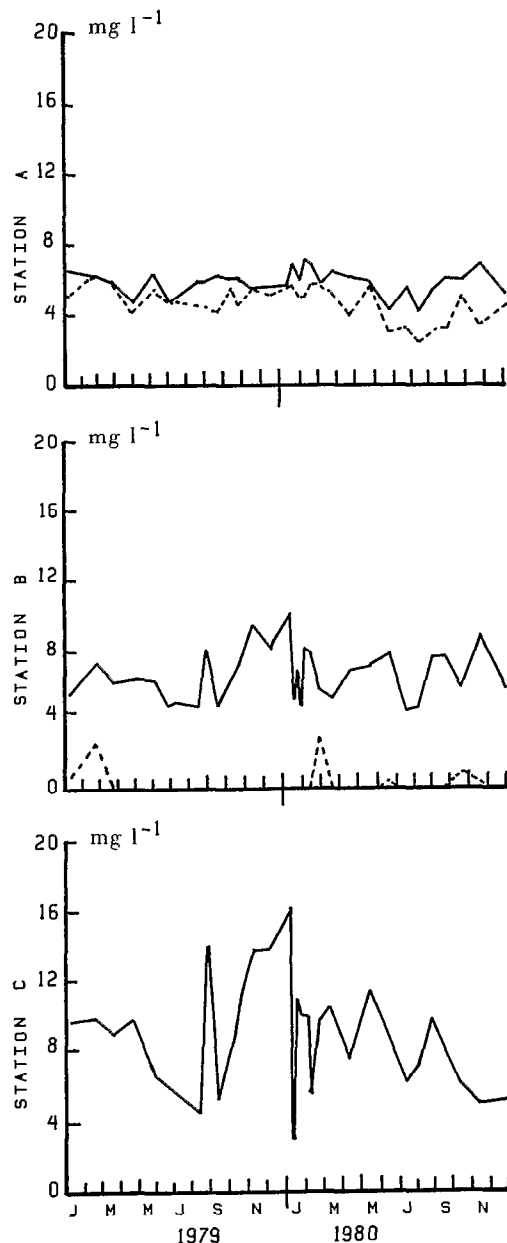


FIG. 5. — Évolution annuelle aux stations A, B et C des concentrations en oxygène dissous en surface (—) et au fond (---)
Yearly evolution of dissolved oxygens (surface (—) and bottom (---) concentrations

2.6. LES PHOSPHATES DISSOUS

Les concentrations en phosphates dissous sont peu élevées dans la couche superficielle, sur l'ensemble de la baie. En dépit des apports permanents d'origine

anthropique, les valeurs fluctuent peu, autour de $1,5 \mu\text{moles l}^{-1}$, l'essentiel des phosphates se trouvant mobilisé au sein de la forte biomasse algale résidant en permanence dans la couche de surface.

La situation est totalement différente dans la couche profonde. Les concentrations que l'on y observe sont très élevées (autour de 50 à $80 \mu\text{moles l}^{-1}$), avec des fluctuations de forte amplitude. L'accumulation de matière organique et la minéralisation qui s'ensuit, l'absence de consommation phytoplanctonique et l'existence d'un sédiment fortement réducteur incompatible avec des processus d'adsorption géochimique favorisent la permanence de ces fortes valeurs. Une diminution saisonnière des teneurs survient lors de la déstratification annuelle; ce phénomène est plus ou moins marqué selon les années.

DISCUSSION

La baie de Biétri est située dans la partie estuarienne de la lagune Ebrié. Elle communique essentiellement avec le reste du système lagunaire par la passe de Biétri et on y retrouve une alternance de situations où dominent les caractéristiques marines ou continentales. L'isolement limité des eaux de surface, mais total des eaux profondes, crée et maintient une stratification partielle de ce milieu, lorsque les fonds sont supérieurs à 5 m .

L'eutrophie observée se limite à la couche superficielle, en particulier dans la partie est de la baie. Cet exceptionnel enrichissement des eaux de surface favorisé par un renouvellement des eaux limité, va induire une forte production locale de matériel organique (PAGÈS *et al.*, 1980; DUFOUR et DURAND, 1982). Une partie de cette production est consommée sur place par un zooplancton abondant (Copépodes Acartiidés et Rotifères, CAUMETTE *et al.*, 1983), une autre est exportée par les marées; enfin, une part importante de cette production sédimente sur place (ARFI et GUIRAL, 1989). Quand cette sédimentation a lieu dans une zone peu profonde et en permanence oxygénée, les produits issus de la minéralisation pourront rapidement être remis à disposition de la partie planctonique du système, entretenant ainsi la forte productivité de la couche superficielle. Cette activité microbienne peut se produire au sein de la colonne d'eau comme dans la couche superficielle du sédiment, généralement oxydée dans cette situation (GUIRAL, non publié). Compte tenu de la bathymétrie de la baie, cette situation prévaut largement.

Au-dessus des excavations, la situation décrite ci-dessus prévaut au sein de la couche superficielle, limitée en profondeur par la zone de gradient de densité. A ce niveau, le ralentissement de la chute du

matériel organique favorise l'activité minéralisatrice des microorganismes (en particulier des bactéries hétérotrophes aérobies), dont la densité diminue considérablement sous la pycnocline (CARMOUZE et CAUMETTE, 1985). La matière particulaire transformée est alors reprise par le système planctonique. Ceci explique les très faibles teneurs en éléments nutritifs que l'on observe en surface (GUIRAL *et al.*, 1989). Les composés organiques déversés en permanence dans la baie sont aussitôt minéralisés, et les métabolites incorporés au sein de la biomasse à mesure de leur disponibilité.

Dans la couche profonde, la poursuite de la sédimentation du matériel organique va se dérouler dans des conditions totalement différentes, en particulier du point de vue des teneurs en oxygène. Mais si les voies de minéralisation sont différentes et sans doute moins performantes, la production de composés réduits est maintenue. L'absence de circulation latérale au sein des excavations favorise l'accumulation du matériel détritique. La zone profonde peut aussi jouer le rôle de piège pour la matière particulaire déposée alentour. Cette hypothèse est corroborée par une granulométrie plus fine et par des teneurs en carbone plus fortes des sédiments prélevés dans ces dépressions, comparativement aux sédiments des hauts-fonds (GUIRAL, 1984). L'absence de circulation verticale (mouvements de convection) conduit à une considérable accumulation de composés minéraux réduits (GUIRAL *et al.*, 1989).

L'atténuation saisonnière de la stratification de densité observée dans la baie de Biétri a pour origine la concordance de deux facteurs :

— après le passage de la crue annuelle, le débit du Comoë diminue rapidement (novembre) et l'influence continentale s'affaiblit à mesure que l'on avance dans la Grande Saison Sèche (décembre-janvier). La salinité des eaux superficielles augmente alors rapidement, et présente progressivement des valeurs proches de celles observées en profondeur. La différence de densité diminue, mais insuffisamment pour induire la déstratification;

— à la fin décembre ou au début janvier, une résurgence intéressant l'ensemble du littoral ivoirien se développe. Les eaux néritiques devant Abidjan sont alors un peu plus salées, mais surtout plus froides. Les eaux de surface de la baie de Biétri provenant d'un mélange d'eaux lagunaire et marine circulant sous l'influence des marées, présentent alors une diminution de température. Ceci induit une élévation de la densité de la couche superficielle qui devient alors peu différente de celle des eaux profondes (isolées de par la bathymétrie, ces dernières ne sont pas affectées par cet événement). On observe alors l'affaiblissement du gradient vertical. Ce phénomène se prolonge tant que les conditions décrites ci-dessus sont réunies.

Le retour des pluies et le réchauffement de la couche superficielle (essentiellement lié à l'arrêt de l'activité de la remontée côtière) entraînent une diminution rapide de la densité des eaux de surface, et la stratification de la masse d'eau s'établit de nouveau dans la baie. Ce schéma se retrouve avec netteté en 1979, année aux précipitations « normales », et de manière plus atténuée en 1980, année caractérisée par des apports continentaux moins importants (faibles précipitations, apports fluviaux moins abondants).

La remontée côtière de janvier joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du milieu lagunaire estuarien, en permettant un affaiblissement du gradient vertical de densité. Cette situation autorise la réalisation de processus aérobies sur l'ensemble de la colonne d'eau, ce qui s'avère important pour le contrôle de la qualité biologique des eaux de la baie de Biétri, très fortement eutrophisées. Bien que beaucoup plus marquée (MORLIÈRE, 1970), la résurgence qui s'installe à partir du mois de juin n'a, comparativement, pas d'impact sur le fonctionnement estuarien. Cette contradiction a deux origines :

— la situation hydroclimatique du milieu lagunaire lors de ces deux événements est très différente. Si la résurgence de janvier se produit au cours d'une période d'apports continentaux très faibles qui a débuté en novembre, celle de juin s'installe lors d'une séquence de très fortes précipitations. L'arrêt temporaire des apports continentaux en août permet une augmentation de la salinité des eaux de surface en lagune, mais ce phénomène est de trop courte durée pour être comparable à ce qui est observé en janvier ;

— le niveau moyen de l'océan, bas lors des séquences de remontée (VERSTRAETE et PICAUT, 1983), conduit à un réajustement des niveaux hydrodynamiques des deux milieux via le canal de Vridi. Cette baisse du niveau océanique, plus marquée de juin à septembre, se traduit au cours du mois d'août par une forte vidange de la lagune qui présente alors son niveau minimal (VARLET, 1978). Ainsi, la propagation de l'influence océanique en milieu lagunaire par le jeu des marées est bien moins importante en août qu'en janvier.

CONCLUSION

Bien que relativement isolée de l'ensemble lagunaire Ebrié, la baie de Biétri demeure largement concernée par les phénomènes hydrologiques saisonniers qui intéressent la lagune. Cette influence est particulièrement sensible dans la partie ouest de la baie, puis s'atténue à mesure que le confinement devient dominant. Le secteur oriental de la baie de Biétri présente dans ses grandes lignes une évolution hydrochimique comparable, mais les variations des paramètres biologiques y revêtent une amplitude beaucoup plus importante. A cette zonation horizontale ouest-est (qui concerne essentiellement la couche de surface) s'ajoute une différenciation verticale surface-fond quand la profondeur est supérieure à 5 m. La stratification de densité observée au-dessus des excavations est particulièrement marquée d'avril à décembre. Au cours des mois de janvier et février, le gradient de densité tend à s'atténuer (voire à disparaître) sous le double contrôle des influences continentales (étiage du Comoë, précipitations faibles ou nulles) et marines (remontée côtière). Cet affaiblissement du gradient a pour conséquence essentielle de permettre la diffusion vers les couches profondes de gaz dissous et de faciliter la sédimentation du matériel particulaire. La brièveté de la conjonction des deux facteurs de contrôle hydroclimatique explique le caractère limité dans le temps de la période où le gradient de densité est affaibli. En cas de non-coïncidence des deux facteurs (ou si l'un ou l'autre est atténué), ce milieu ne connaîtra pas de nette déstratification. Bien que plus intense que celle de janvier, la remontée côtière observée de juin à septembre ne permet pas un affaiblissement suffisant du gradient de densité pour amorcer l'oxygénation temporaire des couches profondes. Les conséquences biogéochimiques de ce phénomène ont pu être décrites en détail à partir de mesures réalisées d'octobre 1985 à mars 1986 (GUIRAL *et al.*, 1989).

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 10 octobre 1989

BIBLIOGRAPHIE

ALBARET (J. J.), CHARLES-DOMINIQUE (E.), 1982. — Observation d'un phénomène de maturation sexuelle précoce chez l'*Ethmalosa fimbriata*, Bowdich, en Côte d'Ivoire. *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, 13 : 23-31.

ARFI (R.), DUFOUR (P.) et MAURER (D.), 1981. — Phytoplancton et pollution : premières études en baie de Biétri (Côte d'Ivoire). Traitement mathématique des données. *Oceanologica Acta*, 4 : 319-329.

- ARFI (R.) et GUIRAL (D.), 1989. — Un écosystème estuarien eutrophe : la baie de Biétri. In Durand J. R., Dufour Ph. et Zabi S. éditeurs : Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. 2. Le milieu lagunaire. *Sous presse*.
- ARFI (R.), PEZENNEC (O.), CISSOKO (S.) et MENSAH (M.), 1989. — Évolution spatio-temporelle d'un indice caractérisant l'intensité de la résurgence ivoiro-ghanéenne. In Le Lœuff P., Marchal E. et Amon-Kothias J. B. éditeurs : Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire 1. Le Milieu marin. *Sous presse*.
- CARMOUZE (J.-P.) et CAUMETTE (P.), 1985. — Les effets de la pollution organique sur les biomasses et activités du phytoplancton et des bactéries hétérotrophes dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. trop.*, 18 (3) : 183-211.
- CAUMETTE (P.), 1984. — Distribution and characterization of phototrophic bacteria isolated from the water of Biétri bay (Ebrié lagoon Ivory Coast). *Can. J. Microbiol.*, 30 : 273-284.
- CAUMETTE (P.), 1985. — Développement des bactéries phototrophes et des bactéries sulfatoreductrices dans des lagunes peu profondes et des lagunes stratifiées. Étude de leur rôle dans le cycle du soufre et dans la production de biomasse. Thèse de Doctorat ès Sciences Univ. Aix-Marseille I, 325 p.
- CAUMETTE (P.), PAGANO (M.) et SAINT-JEAN (L.), 1983. — Répartition verticale du phytoplancton, des bactéries et du zooplancton dans un milieu stratifié en baie de Biétri (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire). Relations trophiques. *Hydrobiologia*, 106 : 135-148.
- CHANTRAINE (J. M.), GUIRAL (D.) et DJEDJE (R.), 1984. — Analyses physicochimiques des eaux de la lagune Ebrié effectuées de 1979 à 1981 au cours des programmes «variabilité interannuelle» et «baie de Biétri». *Archives Scientifiques CRO*, X : 21-71.
- CISSOKO (S.), 1982(a). — Stations côtières et station hydrologique côtière d'Abidjan. Années 1977, 1978 et 1979. *Archives Scientifiques CRO*, VIII (2), 60 p.
- CISSOKO (S.), 1982(b). — Stations côtières et station hydrologique côtière d'Abidjan. Années 1980 et 1981. *Archives Scientifiques CRO*, VIII (3), 60 p.
- DUFOUR (P.), 1984. — Production primaire d'une lagune tropicale (Ebrié, Côte d'Ivoire). Facteurs naturels et anthropiques. Thèse de Doctorat ès Sciences Univ. Pierre et Marie-Curie, Paris, 164 p.
- DUFOUR (P.) et DURAND (J. R.), 1982. — La production végétale des lagunes de Côte d'Ivoire. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 15 : 209-230.
- DUFOUR (P.) et LEMASSON (L.), 1985. — Le régime nutritif de la lagune tropicale Ebrié (Côte d'Ivoire). *Océanogr. trop.*, 20 : 41-69.
- DURAND (J. R.) et CHANTRAINE (J. M.), 1982. — L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 15 (2) : 85-113.
- GUIRAL (D.), 1984. — Devenir de la matière organique particulaire dans un milieu eutrophe tropical. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 17 (3) : 191-206.
- GUIRAL (D.) et LANUSSE (A.), 1984. — Contribution à l'étude hydrodynamique de la baie de Biétri (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire). *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, XV : 1-18.
- GUIRAL (D.), ARFI (R.) et TORRETON (J.-P.), 1989. — Mécanismes et incidences écologiques de l'homogénéisation annuelle de densité dans un milieu eutrophe stratifié. *Hydrobiologia*, 183 : 195-210.
- LEMASSON (L.), PAGÈS (J.) et DUFOUR (P.), 1981. — Lagune de Biétri : bathymétrie, courants et taux de renouvellement des eaux. *Archives Scient. CRO*, VII : 1-12.
- LEMASSON (L.) et PAGÈS (J.), 1982. — Apports de phosphore et d'azote par la pluie en zone tropicale (Côte d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. trop.*, 15 (1) : 9-14.
- MAURER (D.), 1978. — Phytoplancton et pollution. La lagune Ebrié (Abidjan). Le secteur de Cortiou (Marseille). Thèse doctorat de 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille II, 121 p.
- MONTENY (B. A.), 1985. — Données climatiques recueillies à la station ORSTOM Adiopodoumé 1948-1984. *Doc. ORSTOM Adiopodoumé*, 45 p.
- MORLIÈRE (A.), 1970. — Les saisons marines devant Abidjan. *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, I : 1-15.
- PAGÈS (J.), LEMASSON (L.) et DUFOUR (P.), 1979. — Éléments nutritifs et production primaire dans les lagunes de Côte d'Ivoire. Cycle annuel. *Arch. Scientifique CRO*, V : 1-60.
- PAGÈS (J.), DUFOUR (P.) et LEMASSON (L.), 1980. — Pollution de la zone urbaine de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, 11 : 79-107.
- STRICKLAND (J. D. H.) et PARSONS (T. R.), 1968. — A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Ca.*, 167 : 1-305.
- VARLET (F.), 1978. — Le régime de la lagune Ebrié. Côte d'Ivoire. Traits physiques essentiels. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 83, 162 p.
- VERSTRAETE (J. M.) et PICAUT (J.), 1983. — Variations du niveau de la mer, de la température de surface et des hauteurs dynamiques le long de la côte nord du golfe de Guinée. *Océanogr. trop.*, 18 (2) : 139-162.
- YENTSCH (C. S.) et MENZEL (D. W.), 1963. — A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep Sea Res.*, 10 : 221-231.