

# Caractérisation ionique et isotopique d'un système hydrologique tropical: la lagune Ébrié (Côte d'Ivoire)

Lagune tropicale  
Milieux saumâtres  
Composition ionique  
Oxygène-18  
Hydrodynamique  
Tropical lagoon  
Brackish water  
Ionic composition  
Oxygen-18  
Hydrodynamics

Daniel GUIRAL <sup>a</sup>, André FERHI <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centre de Recherches Océanographiques, BP V 18, Abidjan, Côte d'Ivoire.

<sup>b</sup> Centre de Recherches Géodynamiques, 47, avenue de Corzent, 74203 Thonon-les-Bains, France.

Reçu le 26/11/87, révisé le 23/6/88, accepté le 9/9/88.

## RÉSUMÉ

La lagune Ébrié (Côte d'Ivoire) constitue par sa position à la lisière du domaine marin et du domaine continental, un milieu très original d'un triple point de vue: hydrodynamique, géochimique et écologique. Les apports d'eau d'origine terrestre ou marine confèrent à la lagune une grande diversité de milieux en relation étroite avec les phénomènes hydrodynamiques qui commandent la qualité chimique des eaux, la fréquence de leur renouvellement et dans une certaine mesure le développement des processus d'eutrophisation.

Les analyses effectuées concernent une cinquantaine de points de prélèvement. Elles portent essentiellement sur les éléments majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) et sur l'oxygène-18. L'interprétation des résultats globaux conduit à identifier cinq ensembles bien individualisés:

- la lagune d'Ono, par son fonctionnement hydrodynamique et ses caractéristiques géochimiques, reste totalement indépendante du système Ébrié proprement dit. Cette unité fonctionne comme un réservoir d'eau douce alimenté essentiellement par la nappe et ne présente aucun aspect lagunaire;
- la zone estuarienne vraie, à proximité du canal de Vridi, se caractérise par une forte influence marine;
- la zone para-estuarienne enveloppant la zone précédente et se prolongeant, à l'ouest, jusqu'à la digue de Jacquerville, se caractérise par un mélange d'eau marine et d'eau douce;
- la partie ouest de la lagune, au-delà de la digue de Jacquerville, est constituée essentiellement d'eau d'origine continentale soumise à une forte évaporation comme le montrent les teneurs en oxygène-18 plus élevées qu'en milieu océanique. Le faible renouvellement des eaux, dans ce secteur, s'accompagne d'une eutrophisation intense;
- les lagunes Aghien et Potou, au débouché des principaux fleuves, ne subissent pratiquement pas d'influence marine, et sont constituées d'eau douce de même composition chimique que celle des fleuves qui les alimentent. Le renouvellement des eaux est ici suffisamment rapide pour que les phénomènes d'eutrophisation soient moins marqués que dans le cas précédent.

Cette structure d'ensemble du système lagunaire d'Ébrié correspond à la période d'étiage des principaux tributaires de la lagune. Il est probable que cette image se modifie, du moins sur certains aspects, en période de hautes eaux des fleuves.

*Oceanol. Acta*, 1989, 12, 1, 47-55.

## ABSTRACT

### Geochemical and isotopic study of the Ébrié lagoon (Côte d'Ivoire)

The Ébrié Lagoon (Côte d'Ivoire), situated on an oceanic-continental margin, constitutes an original aquatic system characterized by special geochemical and ecological conditions closely related to the dynamics of its waters. The predominating influence of marine or continental water results in a great variety of media.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° :

26442

Cote :

B M

12 JUN 1989

Analyses performed during this study refer to fifty sampling points. Measurements consist in the determination of major elements ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) and oxygen-18 content of water.

The interpretation of results leads to the identification of five major entities:

- the Ono lagoon, distinguished from the rest of the system by a special hydrodynamic functioning, mainly fed by the underground water table but not really operating like a lagoon. This is evidenced by the chemical composition and oxygen-18 content of its water, which differ notably from values recorded in other parts of the system;
- the area close to the Vridi Channel, working as an estuarine system strongly influenced by seawater specially during the low-water period of the Comoé river, the main tributary of the lagoon;
- surrounding this unit, a para-estuarine system stretching from the eastern end of the lagoon to the Jacquville dyke, and characterized by a mixture of fresh and salt water;
- a western zone, stretching from the Jacquville dyke to the west end of the lagoon and essentially fed with freshwater from rain and local streams. The water in this basin is chemically and isotopically more concentrated in comparison with the stream water, however, because of evaporation and its relative stagnation; this results in an intense eutrophication of the medium;
- the Potou and Aghien lagoon at the mouth of the Comoé and Mé rivers, characterized by a water similar in quality to the river water, with a relatively rapid circulation which prevents the development of eutrophication.

The overall structure of the Ébrié Lagoon system presented here, based on the chemical and isotopic composition of its waters, corresponds to the low-water period of the main streams flowing into the lagoon. This picture probably differs, at least in certain aspects, during the high-water period of the Comoé and Mé rivers.

*Oceanol. Acta*, 1989, 12, 1, 47-55.

## INTRODUCTION

Les milieux lagunaires, à la lisière des domaines marins et continentaux, sont le siège de phénomènes complexes liés aux échanges entre eaux douces et eaux marines. Il en résulte en général des gradients de salinité variables avec les saisons, et décroissants depuis la communication avec la mer jusqu'aux zones directement influencées par les apports fluviaux.

D'une manière générale, la morphologie de ces milieux, la localisation et l'importance des communications avec la mer et des apports continentaux, créent de très importantes variations spatio-temporelles du taux de renouvellement des eaux. Cette donnée permet d'interpréter les phénomènes de zonation écologique et de structuration des écosystèmes lagunaires, comme l'attestent de nombreux travaux rassemblés dans la synthèse de Guelorget et Perthuisot (1983) relative au domaine paralytique.

Dans la mesure où les conditions climatiques d'évaporation peuvent être considérées comme identiques pour l'ensemble d'un système lagunaire, l'effet de cette évaporation sur le milieu aquatique serait directement conditionné par les paramètres hydrologiques, et en particulier par le temps de résidence des masses d'eau.

La salinité (ou la chlorinité) est généralement considérée comme le paramètre le plus synthétique pour caractériser l'origine des masses d'eaux lagunaires; cependant elle ne permet pas (sauf dans le cas particulier des milieux de type évaporitique) de mettre en évidence des modifications des concentrations ioniques par évapora-

tion. En effet, par leur importance, les apports ioniques du milieu marin constituent un macrophénomène qui tend à masquer toutes les autres sources de variations.

L'utilisation simultanée de la composition ionique des eaux de surface et d'un traceur isotopique naturel de la molécule d'eau, l'oxygène-18, constitue l'un des moyens les plus appropriés pour estimer ce temps de résidence par l'intermédiaire des phénomènes d'évaporation.

Ce type d'approche largement vulgarisé en hydrologie isotopique (Craig, Gordon, 1965; Fontes, 1976; Blavoux, 1978; Yurtsever, Payne, 1978) semble dans certains cas fournir des résultats similaires à ceux des études hydrodynamiques et courantologiques en milieu lagunaire, sans toutefois impliquer un investissement en temps et en matériel aussi lourd.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

La lagune Ébrié, avec une superficie de 566 km<sup>2</sup> et un volume moyen estimé à 2,7. 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, constitue le milieu lagunaire le plus vaste de Côte d'Ivoire (fig. 1). Elle s'étend sur 130 km le long de la façade littorale, sa largeur n'excède pas 7 km et sa profondeur moyenne est de 4,8 m avec quelques fosses profondes dépassant 20 m, dans la zone urbaine d'Abidjan (Varlet, 1978).

Elle est en communication permanente avec l'océan depuis l'ouverture en 1951 du canal de Vridi. Elle est le lieu de passage obligatoire des apports continentaux des trois fleuves: le Comoé, l'Agneby et la Mé. Le

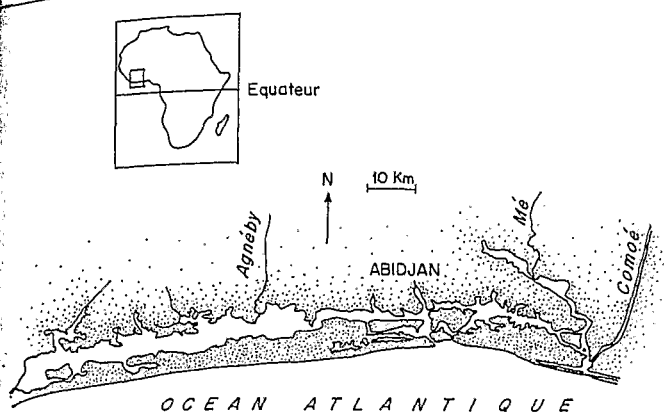


Figure 1  
Plan de situation de la lagune Ébrié en Côte d'Ivoire.  
Situation plan of the Ébrié Lagoon, Côte d'Ivoire.

Comoé est caractérisé par une crue annuelle (août à octobre), et contribue en moyenne pour 80% aux apports fluviaux totaux. La Mé et l'Agnèby sont deux fleuves côtiers avec deux crues annuelles d'inégale importance (juin-juillet et septembre-octobre), qui coïncident avec la période des précipitations du climat équatorial de transition.

Un bilan hydrologique de cette lagune a été tenté par Varlet (1978) et synthétisé par Durand et Skubich (1982), à partir de l'estimation des apports d'eau douce (précipitations et apports fluviaux) et de l'évaporation sur l'ensemble du plan d'eau lagunaire. Ces observations ont été complétées par l'enregistrement sur le canal de Vridi, des échanges océan-lagune au cours de cycles de marées correspondant à diverses situations hydroclimatiques. Globalement, les apports annuels d'eau douce représentent 4,7 fois le volume de la lagune alors que les apports océaniques sont estimés à  $38 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , soit quatorze fois le volume de la lagune.

Cinquante stations réparties sur l'ensemble du système lagunaire Ebrié ont été échantillonnées au cours du mois de mai 1986 (fig. 2). Cette période est celle de l'influence océanique maximale et correspond, d'un point de vue climatologique, à la fin de la grande saison sèche (janvier, février, mars, avril), et d'un point de vue hydrologique à l'étiage du fleuve Comoé.

Dans la zone proche du canal de Vridi, la lagune Ébrié est caractérisée par l'existence d'excavations naturelles (station: 30) ou consécutives aux aménagements du

port d'Abidjan (station: 17). Les eaux profondes localisées dans ces dépressions sont très souvent océaniques car isolées par une pycnocline des eaux de surface moins denses, et ne semblent pas ainsi affectées par les variations hydroclimatiques annuelles. L'homogénéisation entre les eaux de surface et les eaux profondes dans ces dépressions n'apparaît que temporairement, lorsque le secteur estuarien de la lagune est envahi par les eaux océaniques (Arfi *et al.*, sous presse). Pour déterminer l'extension respective des eaux océaniques et continentales dans l'ensemble de la lagune, il est ainsi apparu plus approprié de ne considérer que les eaux de surface.

Les échantillons d'eau (0,2m) ont été prélevés à la bouteille Niskin, et conservés à l'abri de la lumière dans des flacons en polyéthylène étanches jusqu'au retour au laboratoire.

Les salinités ont ensuite été déterminées par mesure de la conductivité à l'aide d'un salinomètre-conductivimètre YSI 33. Les concentrations en ions  $\text{Cl}^-$  ont été dosées colorimétriquement par un autoanalyseur Technicon. Les concentrations en ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  ont été déterminées par photométrie d'absorption, et les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  par spectrophotométrie de flamme.

Les données chimiques ainsi obtenues ont été traitées au moyen d'une analyse des correspondances et d'une classification hiérarchique ascendante, dont le critère d'agrégation est celui du moment centré d'ordre 2 qui minimise à chaque pas de calcul la variance intra-classe de la partition construite.

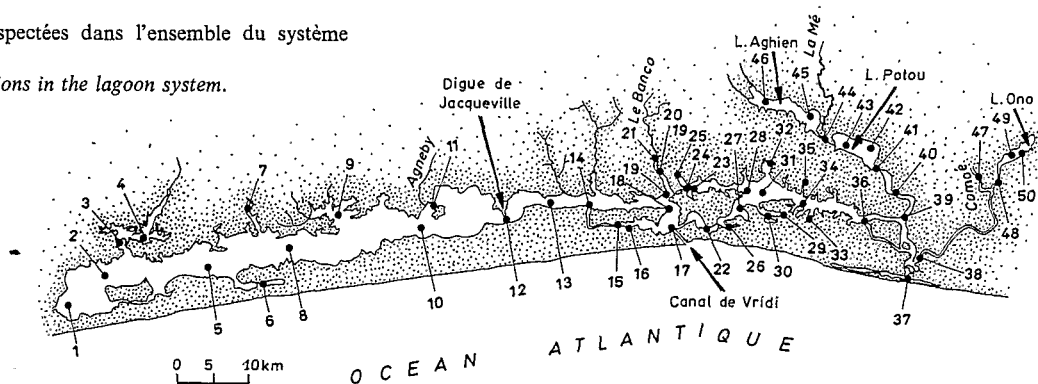
Les teneurs en oxygène-18 des échantillons d'eau ont été déterminées par spectrométrie de masse à partir du  $\text{CO}_2$  obtenu par la méthode classique d'équilibration isotopique à 25°C (Epstein, Mayeda, 1953).

Les résultats sont exprimés en unité  $\delta$  définie par la relation:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_e - R_s}{R_s} 10^3.$$

$R_e$  et  $R_s$  représentent respectivement les rapports d'abondance isotopique [ $^{18}\text{O}$ ]/[ $^{16}\text{O}$ ] de l'échantillon et de l'étalon qui est ici le «SMOW» (Standard Mean Ocean Water).

Figure 2  
Localisation des stations prospectées dans l'ensemble du système lagunaire.  
Location of the prospected stations in the lagoon system.



## RÉSULTATS

## Concentrations ioniques des eaux de surface

En fin de saison sèche, les valeurs de salinité sur l'ensemble de la lagune Ébrié présentent une très grande variabilité spatiale, recouvrant une gamme allant de 0 à 30,5 (tab. 3). Les valeurs minimales sont observées dans les eaux des lagunes d'Ono (stations 48, 49, 50) et d'Aghien (stations 45 et 46) et pour les fleuves Comoé et Mé (stations 47 et 44). Le Banco (station 21) et l'Agneby (station 11) présentent des salinités plus élevées, qui traduisent une pénétration des eaux lagunaires dans le cours inférieur de ces fleuves côtiers lors de l'étiage. A l'opposé, les salinités les plus élevées sont observées pour la zone d'Abidjan proche de la communication avec l'océan par l'intermédiaire du canal de Vridi. Le secteur est de la lagune Ébrié, du Comoé à l'océan, est caractérisé par des salinités croissantes, alors que pour le secteur ouest, à partir de la digue de Jacquville (station 12), les salinités sont relativement constantes et comprises entre 3,5 et 7,5.

Les concentrations en ions  $\text{Cl}^-$  sur l'ensemble de la lagune sont très significativement corrélées avec la salinité déterminée par conductimétrie ( $r=0,998$ ;  $n=50$ ). La pente de la droite d'ajustement ( $a=0,067$ ) est proche de celle fournie par la littérature pour les eaux marines ( $a=0,056$ ), et confirme ainsi l'importance des apports ioniques d'origine marine dans la définition de la composition chimique moyenne des eaux de cette lagune (fig. 3). De ce fait, pour la suite de ce travail, les concentrations en ions  $\text{Cl}^-$  serviront de référence pour les autres ions, et permettront d'estimer le pourcentage d'eau océanique dans les eaux lagunaires considérées ainsi comme résultant d'un simple mélange en proportion variable d'eau continentale (à concentration en  $\text{Cl}^-$  inférieure à  $6 \text{ meq.l}^{-1}$ ) et d'eau océanique (à teneur supérieure à  $460 \text{ meq.l}^{-1}$ ). Cette dernière valeur représente la concentration moyenne des échantillons d'eau océanique prélevés en subsurface au large d'Abidjan au cours de la période de saison sèche de l'année 1986.

Sur l'ensemble des cinquante stations lagunaires, les concentrations en ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  peu-

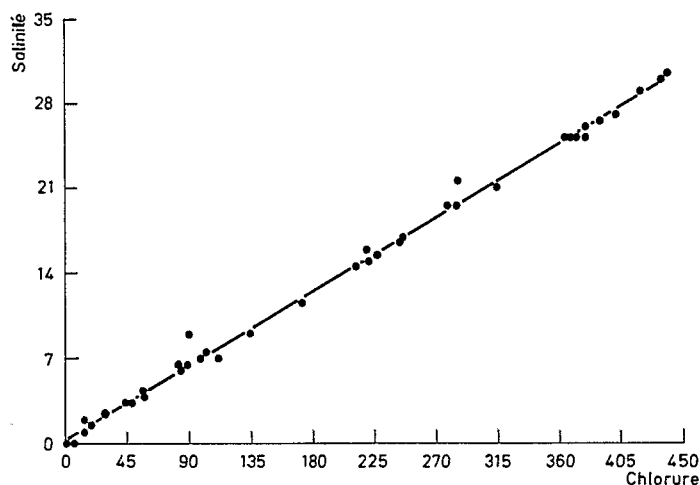


Figure 3  
Relation entre la salinité et les concentrations en chlorure des eaux de surface de la lagune Ébrié (mai 1986).  
*Relationship between salinity and chloride concentrations in surface water of the Ébrié lagoon (May, 1986).*

Tableau 1

Relations concentrations en  $\text{Cl}^-$ /concentrations des cations majeurs (en  $\text{meq.l}^{-1}$ ) dans les eaux de surface de la lagune Ébrié en période sèche (mai 1986).

*Relationship between  $\text{Cl}^-$  concentrations and major cation concentrations (expressed in  $\text{meq.l}^{-1}$ ) in the surface water of the Ébrié lagoon during the dry season (May 1986).*

	Na	Ca	Mg	K
Coefficient de corrélation	0,994	0,999	0,997	0,997
Pente	0,864	0,0393	0,2008	0,0343
Abscisse à l'origine	3,292	0,0270	-0,5538	0,0343

vent être, en première approximation, considérées comme relativement bien corrélées aux chlorures (tab. 1). Pondéralement, chacun de ces cations représente en moyenne respectivement 77,4; 17,7; 4,3 et 0,6% de la charge cationique totale.

Soulignons cependant que les très fortes concentrations des eaux d'origine océanique pèsent d'un poids considérable dans ce type de traitement statistique, et tendent à masquer les variations de faibles amplitudes pouvant exister entre les différents types de stations, notamment en ce qui concerne les stations les plus exposées aux apports continentaux.

Afin de comparer la composition ionique des eaux lagunaires et celle de l'eau de mer prélevée au large d'Abidjan, nous avons calculé le rapport entre la teneur d'un ion mesurée en lagune ramenée à la chlorinité et la valeur de ce même cation dans l'eau de mer ramenée également à la chlorinité de l'eau de mer. Si ce rapport est supérieur à 1 dans la lagune ce cation se trouve enrichi comparativement au chlorure; à l'inverse, un rapport inférieur à 1 correspond à un déficit dans la lagune.

Tableau 2

Rapports ioniques des eaux de la lagune Ébrié comparativement aux rapports ioniques de l'eau océanique prélevée au large d'Abidjan (mai 1986).  $X_L$ : concentration en  $\text{meq.l}^{-1}$  en milieu lagunaire;  $X_M$ : concentration en  $\text{meq.l}^{-1}$  en milieu océanique.

*Ionic ratios of Ébrié lagoon water compared to those of ocean water sampled offshore in the vicinity of Abidjan (May 1986).  $X_L$ : concentration (expressed in  $\text{meq.l}^{-1}$ ) in the lagoon medium;  $X_M$ : concentration (expressed in  $\text{meq.l}^{-1}$ ) in the ocean medium.*

	$\frac{\text{Ca}_L}{\text{Cl}_L} \cdot \frac{\text{Cl}_M}{\text{Ca}_M}$	$\frac{\text{Mg}_L}{\text{Cl}_L} \cdot \frac{\text{Cl}_M}{\text{Mg}_M}$	$\frac{\text{K}_L}{\text{Cl}_L} \cdot \frac{\text{Cl}_M}{\text{K}_M}$
$\bar{X}$	0,97	0,97	1,46
s	0,06	0,07	0,13

Les rapports ainsi calculés montrent globalement que les ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$  exprimés en fonction des chlorures sont dans une proportion équivalente pour les eaux lagunaires et pour l'eau océanique (tab. 2). A l'opposé, les ions  $\text{K}^+$  montrent un enrichissement relatif important, particulièrement au niveau des fleuves Comoé et Mé, avec des rapports de 2,89 et 1,87. Ce rôle de  $\text{K}^+$  comme traceur de l'influence continentale dans les milieux lagunaires a déjà été mentionné pour d'autres milieux tropicaux, en particulier pour le lac Togo (Millet, 1986).

Une classification hiérarchique ascendante des stations à partir de la composition de leur eau de surface en ions majeurs (fig. 4) individualise très nettement deux ensembles, eux-mêmes subdivisés en deux sous-

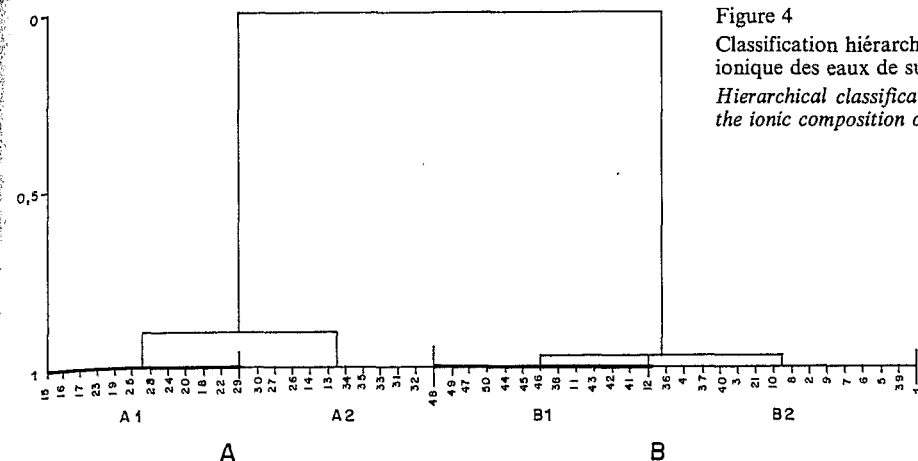


Figure 4  
Classification hiérarchique des 50 stations à partir de la composition ionique des eaux de surface.  
*Hierarchical classification of the 50 stations sampled on the basis of the ionic composition of the surface water.*

ensembles. Les groupements de stations ainsi constitués correspondent chacun à un domaine précis de salinité. Le premier ensemble (A) correspond à des eaux de salinité comprise entre 14,5 et 30. Il peut être subdivisé en deux sous-ensembles assez fortement individualisés qui peuvent être définis :

– pour le premier, (A1), comme l'ensemble des eaux de salinité comprise entre 25 et 30 et qui se répartissent de part et d'autre du canal de Vridi, avec comme borne Ouest la station 16 et comme limite Est la station 28, ces stations se situant respectivement à 5 et 9,5 km de l'entrée Sud du canal;

– pour le second, (A2), comme l'ensemble des eaux regroupant les stations de salinité comprise entre 14,5 et 21,5. Cet ensemble prolonge le sous-groupe précédent vers l'Ouest jusqu'à la station 13 et vers l'Est jusqu'aux stations 33, 34 et 35, distantes toutes les quatre de 12 km de l'océan *via* le canal de Vridi.

A ce premier groupe statistique, (A), s'oppose un second groupe, (B), correspondant aux zones de salinité relativement plus faible. Comme précédemment, il est possible de distinguer deux sous-ensembles qui, cependant, sont moins bien individualisés que dans le cas précédent.

Le premier, (B1), correspond à des stations typiquement continentales de salinité inférieure à 2, voire nulle, et comprend les lagunes d'Ono (stations 48 à 50), d'Aghien (stations 45 et 46) et Potou (stations 41 à 43) et le débouché en lagune des fleuves Mé, Agneby et Comoé.

Le second, (B2), regroupe les stations de salinité comprise entre 3,5 et 11,5 et définit ainsi une zone oligomésohaline selon la classification du symposium de Venise (1958). Cette zone correspond aux stations situées à l'Ouest de la digue de Jacqueville (à partir de la station 12), et à celles comprises entre les stations 36 et 37.

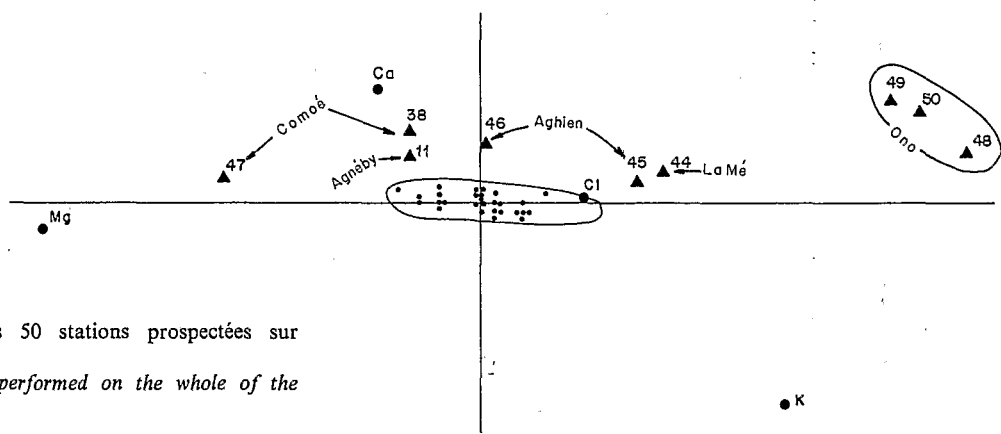
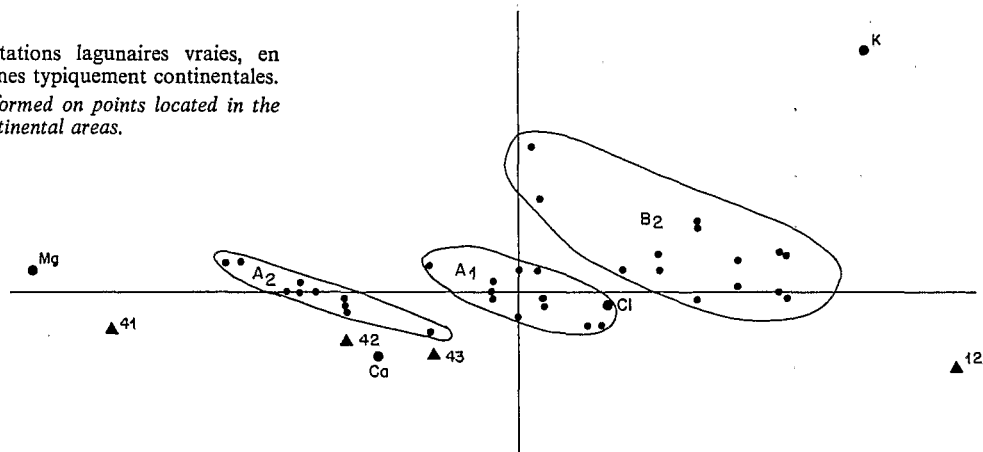


Figure 5  
Analyse des correspondances des 50 stations prospectées sur l'ensemble de la lagune Ébrié.  
*Result of correspondence analysis performed on the whole of the sampled points (50 stations).*

Figure 6  
Analyse des correspondances des stations lagunaires vraies, en excluant les points représentant les zones typiquement continentales.  
*Result of correspondence analysis performed on points located in the true lagoon area, excluding typical continental areas.*



Cette partition se retrouve aussi dans les résultats d'une analyse des correspondances qui, pratiquée sur les 50 stations, isole très nettement l'ensemble des stations continentales (B1) des stations «lagunaires vraies» (fig. 5). Dans cette structure, les deux premiers axes qui représentent 65 et 19 % de la variance totale peuvent être expliqués respectivement par les gradients des teneurs en  $Mg^{++}$  (axe 1) et en  $K^+$  (axe 2). Ainsi les eaux de la lagune d'Ono (stations 48, 49, 50), caractérisées par des concentrations nulles en ions  $Mg^{++}$ , apparaissent très différentes de celles géographiquement proches du Comoé (station 47).

L'Agnéby présente une composition ionique voisine de celle du Comoé à son débouché en lagune (station 38), alors que la lagune Aghien montre de grandes similitudes avec les eaux de la Mé. Les autres stations correspondant aux eaux plus «lagunaires» se projettent sans différenciation apparente au centre du plan 1. 2.

Une nouvelle analyse excluant les stations continentales fournit alors une meilleure discrimination des diverses stations lagunaires (fig. 6).

Les deux premiers axes expliquent respectivement 75 et 12 % de la variance totale et, comme pour l'analyse globale, les gradients en  $Mg^{++}$  et  $K^+$  contribuent essentiellement à définir la structure de ce plan factoriel. Par cette nouvelle représentation, nous retrouvons les quatre sous-ensembles précédemment décrits, au sein desquels il ne semble pas possible de discerner de réelle continuité.

La station 12, qui se situe géographiquement à la limite des trois sous-ensembles B1, B2 et A2, se trouve, par cette analyse, très bien individualisée et permet de considérer la digue de Jacquville comme un élément déterminant dans le fonctionnement hydrodynamique du secteur ouest de la lagune Ébrié.

### Relations entre les teneurs en oxygène-18 et la chlorinité des eaux de surface

Les teneurs en oxygène-18 des échantillons varient de  $-3\text{‰}$  à  $+1,5\text{‰}$  (tab. 3). Les plus fortes valeurs négatives ont été relevées au niveau de la lagune d'Ono

Tableau 3

Données géochimiques et isotopiques obtenues sur les eaux des 50 stations de prélèvement.

*Geochemical and isotopic data obtained concerning water from the 50 sampled points.*

N°	Profondeur (m)	Salinité	Conductivité ( $\mu$ S)	pH	$^{18}\text{O}$ ( $\text{‰}$ )	$\text{Cl}^-$ meq/l	$\text{Ca}^{++}$ meq/l	$\text{Mg}^{++}$ meq/l	$\text{K}^+$ meq/l	$\text{Na}^+$ meq/l
1	1.5	6.0		7.30	0.54	84.39	3.78	14.52	3.29	76.20
2	4.0	6.5		6.90		81.76	3.02	16.13	3.29	73.93
3	3.5	4.5		7.60	0.67	57.12	2.10	11.29	2.60	52.64
4	3.0	3.5		7.50	0.31	43.68	1.68	8.87	1.91	41.03
5	4.5	6.5		6.65	1.31	88.48	3.36	16.13	3.55	79.73
6	2.5	6.5		7.75	0.85	89.60	2.94	16.13	3.38	80.70
7	3.5	6.5		8.35	1.20	86.24	3.19	16.13	3.38	77.80
8	10.0	7.0		8.70	1.05	98.56	3.53	17.20	3.90	88.44
9	3.5	6.5		8.50	0.22	82.88	3.19	15.05	3.38	74.89
10	3.0	7.5		6.95	0.38	103.04	3.78	18.01	4.16	92.31
11	1.0	1.5		6.30	-2.19	19.04	0.84	4.03	0.16	19.74
12	5.0	11.5		7.30	0.58	172.48	6.05	26.88	5.63	152.30
13	5.5	16.0		8.00	0.14	220.64	8.90	48.79	7.54	193.91
14	3.5	21.5		8.10	0.11	286.72	12.10	63.57	9.88	251.00
15	4.0	30.0		8.10	0.32	436.80	17.14	87.36	15.60	380.66
16	7.0	30.5		8.10	0.40	441.28	17.14	87.36	15.08	384.53
17	17.5	29.0		8.25	0.41	421.12	16.80	86.02	15.08	367.11
18	11.0	26.0		8.40	0.53	380.80	14.70	75.26	13.86	332.28
19	10.5	26.0		8.10	0.73	380.80	15.12	71.23	13.00	332.28
20	4.5	26.5		8.50	0.34	392.00	15.12	77.95	13.86	341.95
21	3.0	7.0		7.00	-1.49	112.00	4.20	19.35	4.16	100.05
22	10.5	27.0		8.55	0.43	403.20	15.96	80.64	14.22	351.63
23	2.0	25.0		8.05	0.49	380.80	15.46	72.58	13.00	332.28
24	6.0	25.0		8.05	0.45	369.60	14.28	71.23	12.66	322.60
25	3.5	25.0		8.20	0.19	374.08	15.12	72.58	12.48	326.47
26	1.5	21.0		8.00	0.15	315.84	12.10	64.51	10.23	276.16
27	3.0	19.5		8.20	-0.43	286.72	11.76	57.79	9.27	251.00
28	9.0	25.0		8.05	0.43	365.12	14.70	71.23	13.52	318.73
29	7.0	19.5		7.95	0.62	280.00	10.92	59.14	9.36	245.19
30	22.5	19.5		8.25	-0.03	282.24	11.09	57.79	9.00	247.13
31	6.0	17.0		7.95	-0.01	246.40	10.08	52.42	8.23	216.16
32	4.0	16.5		7.95	0.21	244.16	9.41	48.38	8.23	214.23
33	2.0	14.5		7.65	-0.18	212.80	8.06	44.35	7.11	187.14
34	4.5	15.5		7.70	-0.37	228.48	8.90	47.04	7.45	200.68
35	2.5	15.0		7.70	-0.09	221.76	8.57	47.04	7.45	194.88
36	2.0	9.0		7.25	-0.58	134.40	5.21	24.19	4.77	119.40
37	1.0	3.5		6.95	-1.45	49.28	2.24	9.41	1.91	45.87
38	2.5	2.0		6.65	-2.22	14.56	0.84	2.96	0.01	15.87
39	2.5	9.0		7.20	-0.76	90.72	3.67	16.13	3.47	81.67
40	0.5	4.0		6.65	-0.20	58.24	2.18	10.75	2.17	53.61
41	2.5	2.5		7.25	-0.53	29.12	1.68	6.72	0.97	28.45
42	2.0	1.5		7.55	-0.81	16.80	1.01	3.49	0.60	17.81
43	0.5	1.0		6.60	-0.88	13.44	0.84	2.69	0.48	14.90
44	6.0	0.0	800	6.55	-1.54	4.76	0.34	0.54	0.22	7.40
45	3.5	0.0	1100	7.30	-0.66	6.44	0.34	0.81	0.25	8.86
46	10.0	0.0	980	8.35	-0.36	5.88	0.50	1.08	0.23	8.37
47	6.0	0.0	120	5.90	-1.72	0.84	0.14	0.30	0.06	4.02
48	3.0	0.0	35	5.30	-2.82	0.39	0.00	0.00	0.01	3.63
49	2.5	0.0	45	5.10	-2.95	0.62	0.06	0.00	0.02	3.83
50	2.5	0.0	70	5.20	-2.96	4.12	0.08	0.03	0.02	6.85

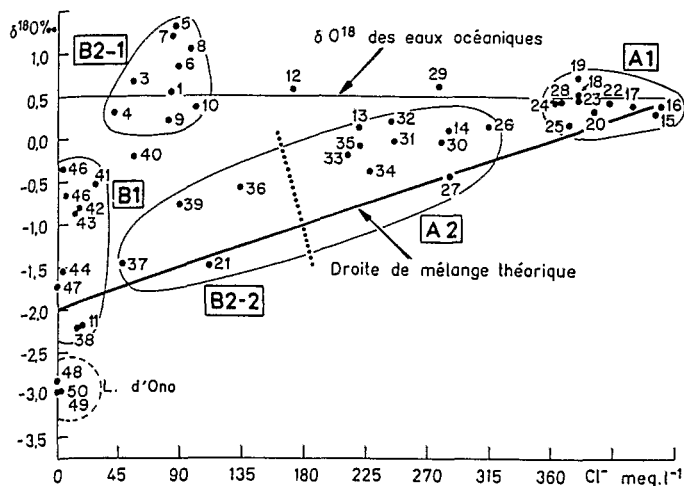


Figure 7

Distribution des différents points de prélèvement en fonction des teneurs en oxygène-18 et des teneurs en chlorures des eaux de surface (mai 1986).

*Distribution of the studied points in as a function of oxygen-18 content and the chloride concentration of the surface water.*

(stations 48, 49, 50) tandis que les plus fortes valeurs positives se situent dans le secteur ouest de la lagune Ébrié (stations 7 et 5).

La composition isotopique de l'eau d'origine marine est de +0,5, alors que celle du pool continental mesurée au niveau des principaux fleuves, s'élève à  $-2\text{‰}$  en fin de la grande saison sèche (Comoé:  $-1,72\text{‰}$  à la station 47 et  $-2,2\text{‰}$  à la station 38; Mé:  $-1,54\text{‰}$  et Agneby  $-2,19\text{‰}$ ). Ceci constitue donc un bon marquage des deux types d'eau, et devrait se traduire par une répartition des compositions isotopiques, à l'intérieur de la lagune, dépendant du mélange entre ces deux sources d'alimentation. Étant donné que les chlorures constituent aussi un marqueur de ces deux types d'eaux, il devrait théoriquement exister une relation entre teneurs en  $^{18}\text{O}$  et chlorinité si, en première approximation, on ne tient pas compte du fractionnement isotopique lié au phénomène d'évaporation.

La figure 7, sur laquelle est portée la droite de mélange théorique entre les eaux continentales et marines, montre la répartition des différents points de mesure en fonction des teneurs en chlorure et en oxygène-18. On peut distinguer sur cette figure quatre ensembles relativement bien individualisés.

Le premier regroupe les stations proches du milieu océanique et sont caractérisées par des teneurs en chlorure élevées et des compositions isotopiques voisines de  $+0,5\text{‰}$  (valeur du pool marin). A l'opposé, s'individualise un autre groupe caractérisé par des teneurs en chlorure très faibles et des rapports isotopiques proches de ceux des principaux cours d'eau alimentant la lagune. A l'intérieur de cet ensemble, la lagune d'Ono constitue un cas particulier caractérisé par des concentrations en  $^{18}\text{O}$  inférieures à celles des principaux cours d'eau et une composition chimique très originale pour un milieu lagunaire (pH < 5,5, concentration ionique très faible pour tous les éléments et même absence totale de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ ).

Entre ces deux situations extrêmes (stations à dominante marine ou continentale exclusive), les stations intermédiaires se répartissent en deux groupes distincts.

Le premier constitue un ensemble sensiblement parallèle à la droite de mélange théorique, et traduit ainsi une évolution concomitante des teneurs en chlorures et en  $^{18}\text{O}$ . Le second est caractérisé par des concentrations en chlorures relativement faibles et des concentrations en  $^{18}\text{O}$  supérieures à celles de l'eau de mer.

Globalement, cette organisation est en accord avec celle préalablement définie à partir de considérations exclusivement chimiques, notamment en ce qui concerne les deux groupes extrêmes marin et continental (A 1 et B 1). Cependant, pour les eaux plus spécifiquement lagunaires, la zonation révélée par les données isotopiques ne recouvre pas de façon systématique les subdivisions définies à partir des seules analyses chimiques. On constate, en effet, deux différences essentielles:

- d'une part le groupe (A 2) et une partie du groupe (B 2) se retrouvent dans un seul groupe constitué de l'ensemble des stations formant la zone de transition progressive du pool continental vers le pool marin;
- et, d'autre part, les stations les plus à l'ouest de la lagune, regroupées initialement dans (B 2), forment d'après les analyses isotopiques, un groupe spécifique qui s'individualise nettement des autres.

## DISCUSSION

Cette étude montre, comme on pouvait le prévoir, l'existence d'une grande diversité de milieux à l'intérieur du système lagunaire Ébrié. On constate que les regroupements déterminés à partir de critères chimiques et isotopiques recouvrent une réalité géographique. En effet, le système lagunaire Ébrié s'organise en fonction des caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques qui sont elles-mêmes le résultat de l'équilibre entre les deux sources:

- eau douce provenant principalement du Comoé,
- eau très fortement minéralisée provenant de l'océan via le canal de Vridi.

On peut ainsi distinguer quatre zones géographiques, correspondant aux différents ensembles de stations définis précédemment à partir des données chimiques et isotopiques.

La zone proche du canal de Vridi vers la lagune est caractérisée par une forte influence marine, se traduisant par des teneurs en chlorures élevées (supérieures à  $350\text{ meq.l}^{-1}$ ), et des teneurs en  $^{18}\text{O}$  peu différentes de celles de l'eau de mer. Cette zone s'apparente ainsi, par son fonctionnement et par ses caractéristiques chimiques, à un système estuarien.

Les zones situées au débouché des principaux cours d'eau dans la lagune sont constituées pratiquement d'eau douce très peu chargée en sel. Les teneurs en  $\text{Cl}^{-}$  restent inférieures à  $40\text{ meq.l}^{-1}$ . Du point de vue isotopique, les valeurs sont toujours négatives, mais varient en fonction de la vitesse de renouvellement des eaux: les eaux à renouvellement rapide présentent des  $\delta^{18}\text{O}$  proches de ceux des grands cours d'eau ( $-2\text{‰}$ ); par contre les eaux à renouvellement relativement plus lent voient leur  $\delta^{18}\text{O}$  augmenter sensiblement en raison



des phénomènes d'évaporation qui les affectent (lagunes de Potou et Aghien).

La lagune d'Ono apparaît dans ce système comme un cas tout à fait particulier. Du point de vue chimique, les eaux sont acides ( $\text{pH} < 5,5$ ), et à la fois extrêmement peu minéralisées et de composition chimique très différente de celle des cours d'eau voisins (fig. 5). Du point de vue isotopique, les valeurs sont plus négatives ( $-3\text{‰}$ ) qu'au niveau des fleuves Comoé et Mé. Il est vraisemblable que cette lagune constitue une sorte de regard naturel sur la nappe phréatique locale. Ceci expliquerait l'originalité de ces eaux, qui tranchent nettement par rapport à l'environnement lagunaire Ébrié. En effet la valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-3\text{‰}$  correspond probablement à la valeur qui caractérise la nappe locale. Les valeurs plus élevées des eaux du Comoé et de la Mé résultent de leur origine plus septentrionale et, sans doute, aussi, des phénomènes d'évaporation au cours de leur transit le long du fleuve. Par ailleurs, du point de vue chimique, la faible minéralisation des eaux de cette lagune serait liée, également, à une caractéristique des eaux de la nappe qui, en raison de la nature de la roche encaissante (arène granitique) dans cette région, sont probablement acides.

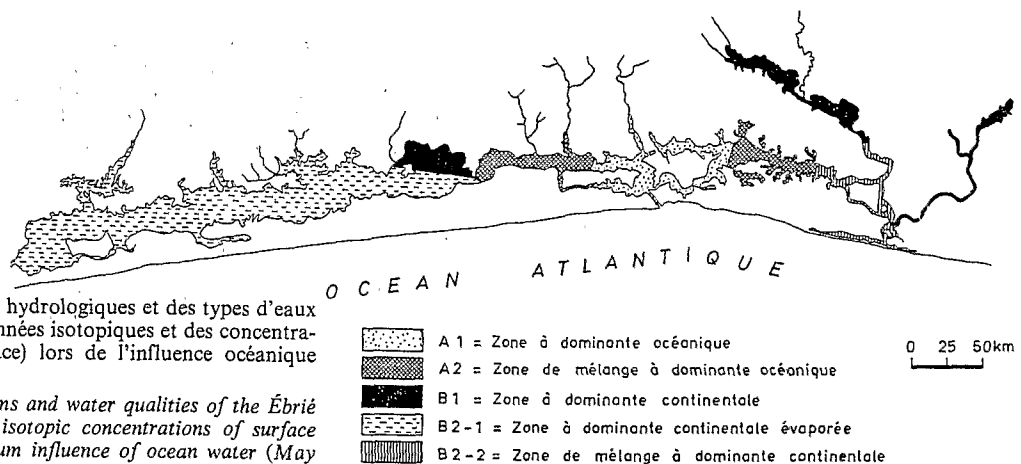
eaux douces et les eaux marines. On constate que les points de mesure appartenant à cette zone se répartissent parallèlement à la droite de mélange théorique, tout en restant au-dessus de celle-ci. Ce décalage traduit un effet d'évaporation qui affecte l'ensemble des eaux de cette lagune. Cependant, lorsque le renouvellement des eaux, soit par la mer soit par le continent, est rapide, l'effet isotopique de cette évaporation est peu sensible. Il devient au contraire d'autant plus apparent que le renouvellement des eaux est plus lent. Ainsi, dans le groupe des eaux douces, on peut distinguer tout un ensemble de stations appartenant aux lagunes Potou et Aghien, montrant des compositions isotopiques plus ou moins enrichies par rapport aux eaux des fleuves qui les alimentent. En ce qui concerne la zone située à l'extrême ouest de la lagune Ébrié, les teneurs en chlorures montrent qu'un dixième seulement, au plus, du volume total des eaux provient d'apports marins (en supposant que tous les chlorures soient d'origine marine). Dans ces conditions, la composition isotopique de ces eaux serait théoriquement de  $-1,95\text{‰}$ . Par conséquent, les valeurs réelles mesurées, et qui atteignent parfois  $+2\text{‰}$ , ne peuvent s'expliquer que par un phénomène d'évaporation intense

Figure 8

Organisation spatiale des systèmes hydrologiques et des types d'eaux de la lagune Ébrié (déduite des données isotopiques et des concentrations ioniques des eaux de surface) lors de l'influence océanique maximale de mai 1986.

Organization of hydrological systems and water qualities of the Ébrié lagoon as deduced from ion and isotopic concentrations of surface water during the period of maximum influence of ocean water (May 1986).

En dehors de ces deux zones extrêmes et parfaitement bien caractérisées géochimiquement et isotopiquement, il existe plusieurs zones intermédiaires plus ou moins influencées par les deux types d'apports. L'analyse statistique effectuée sur les données chimiques (classification hiérarchique, analyse des correspondances) permet de distinguer deux secteurs, l'un sous influence marine et l'autre sous influence continentale (fig. 8). Si l'on considère les subdivisions obtenues à partir des teneurs en  $^{18}\text{O}$  et en  $\text{Cl}^-$ , on observe une discrimination supplémentaire mettant en relief une zone à dominante continentale affectée par une forte évaporation, comme en témoignent les teneurs en oxygène-18, qui restent dans ce secteur supérieures ou égales à celles de l'eau marine. Ainsi, le groupe de stations (B2) de la classification géochimique éclate en deux sous-groupes. Le premier (B2-1) correspond au secteur situé à l'extrémité ouest de la lagune, au-delà de la digue de Jacquville, et constitue ainsi une zone à dominante continentale caractérisée par une faible circulation des eaux, ce qui explique leur enrichissement isotopique par évaporation. Le second (B2-2) se rattache au groupe (A2) et constitue une zone de transition progressive entre les



dans un milieu à très faible circulation des eaux. Dans ces conditions, on peut considérer que l'enrichissement en chlorures de cette zone résulte aussi, au moins en partie, de ce phénomène d'évaporation, ce qui réduit encore la part des apports marins pour ce bassin.

## CONCLUSION

Du point de vue hydrodynamique, cette étude de la lagune Ébrié montre l'existence de deux systèmes essentiels :

— un premier système hydrodynamiquement actif, avec un renouvellement des eaux très fréquent, soit d'origine marine (par le canal de Vridi), soit d'origine continentale (principalement par les apports fluviaux du Comoé). Ce système correspond à une zone de mélange plus ou moins étendue et influencée par l'une ou l'autre des sources; il se situe entre le débouché du Comoé dans la lagune à l'est, et la digue de Jacquville à l'ouest. Ce premier type fonctionne comme un milieu estuarien;



— un deuxième ensemble, constitué lui-même de plusieurs sous-unités indépendantes entre elles, se distingue du précédent par la présence d'eaux douces. Cet ensemble se caractérise par sa marginalité par rapport au système estuarien, par son alimentation unique (apports fluviaux) et par un temps de résidence des eaux relativement long.

Cependant, à l'intérieur de cet ensemble, les différentes sous-unités présentent des caractères géochimiques très spécifiques. Ainsi la lagune d'Ono se distingue par des eaux acides très peu minéralisées (concentration ionique inférieure à celle des pluies) et une teneur en  $^{18}\text{O}$  inférieure à celle des eaux fluviales. A l'inverse, les lagunes Potou et Aghien montrent des concentrations ioniques sensiblement supérieures à celles des fleuves qui les alimentent, ce qui peut s'expliquer par des phénomènes de concentration par évaporation. Ceci est mis en évidence par l'enrichissement isotopique des

eaux. La zone située à l'ouest de la digue de Jacquville, la plus importante en superficie et la plus proche de l'océan, se caractérise par des eaux oligohalines résultant probablement à la fois de quelques apports marins (embruns, infiltration à travers le cordon dunaire, communication avec la zone estuarienne) et d'un phénomène de concentration par évaporation intense, comme en témoignent les fortes teneurs en oxygène-18 de ces eaux.

Ces distinctions sur des critères isotopiques et géochimiques recouvrent aussi une réalité écologique. Les milieux les plus productifs correspondent aux zones les plus stables d'un point de vue hydrodynamique.

Il est évident que l'organisation de la Lagune Ébrié décrite dans cette étude n'en constitue qu'une image à un moment donné de l'année. Il serait intéressant d'étudier l'évolution éventuelle de cette organisation de la lagune au cours d'un cycle hydro-climatique annuel.

#### RÉFÉRENCES

- Arfi R., Guiral D., Torretton J. P., 1989. Étude d'une baie monomictique eutrophe: la baie de Biétri (lagune Ébrié, Côte d'Ivoire). I: Cycle hydrologique annuel, *Rev. Hydrobiol. Trop.* (sous presse).
- Blavoux B., 1978. Étude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée, *Thèse Doct. État. Univ. Pierre-et-Marie-Curie, Paris*, 333 p.
- Craig H., Gordon L. I., 1965. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere, in: *Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures*, edited by E. Tongiorgi, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome.
- Durand J. R., Skubich M., 1982. Les lagunes ivoiriennes, *Aquaculture*, 27, 211-250.
- Epstein S., Mayeda T., 1953. Variations of  $^{18}\text{O}$  content of waters from natural sources, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 213-224.
- Fontes J. C., 1976. Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects, *Thèse Doct. État. Univ. Pierre-et-Marie-Curie, Paris*, 208 p.
- Guelorget O., Perthuisot J.-P., 1983. *Le domaine paralique: expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement*, Presses de l'É.N.S., Paris, 16, 1-137.
- Millet B., 1986. Hydrologie et hydrochimie d'un milieu lagunaire tropical: le lac Togo, *Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Paris*, 228 p.
- Symposium de Venise, 1958. Symp. Sulla classificazione delle acque salmastre (Venezia, Aprile 1958), *Arch. Oceanogr. Limnol., Venezia, Suppl.*, Vol. 11, 248 p.
- Varlet F., 1978. Le régime de la lagune Ébrié, Côte d'Ivoire: Traits physiques essentiels, *Trav. Doc. ORSTOM*, 83, 162 p.
- Yurtsever Y., Payne B. R., 1978. Application of environmental isotopes to groundwater investigations, in: *Water, I.A.E.A. (International Atomic Energy Agency), Vienne, Autriche*, 228/24, 465-490.