

CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DES EAUX DE LA LAGUNE EBRIE (COTE D'IVOIRE)

PARTIE I : VARIABILITE SAISONNIERE DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES

¹A. M. KOUASSI, ²A. S. TIDOU, et ²A. KAMENAN

¹Centre de Recherches Océanologiques BP V18 Abidjan, Côte d'Ivoire

²Université d'Abobo Adjamé 02 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire

RESUME

Cent quarante quatre campagnes de mesures bimensuelles ont été réalisées au cours d'un cycle annuel afin de mieux comprendre, à partir des données physico-chimiques (température, salinité, sels nutritifs, pH) et environnementales (débits de fleuves et pluviométrie), la nouvelle structure hydrochimique de la région estuarienne de la lagune Ebrié. L'hydrologie de cette lagune avait été «bouleversée» consécutivement à l'ouverture du grau de Bassam. La zone estuarienne de la lagune Ebrié présente une forte variabilité temporelle, étant soumise à des variations de basses fréquences (variabilité annuelle liée au cycle hydroclimatique : précipitations, crue, grande saison sèche), mais aussi, de plus hautes fréquences liées au cycle des marées (variabilité bi-mensuelle : alternance morte eau et vive eau, variabilité bi-quotidienne : alternance basse mer, haute mer). Une corrélation appliquée aux différents paramètres physiques, chimiques et météorologiques a montré que le facteur salinité est corrélé avec les facteurs pluies, débits et nutriments (azote total). Les fortes précipitations et l'avènement des crues sont responsables de «l'effet de chasse» des eaux lagunaires en direction de l'océan ; le courant de sortie, au niveau du canal de Vridi augmente d'intensité (corrélation positive), provoquant une diminution de la salinité (corrélation négative) et une augmentation des teneurs en sels nutritifs (corrélation négative).

Mots clés : Hydrologie, lagune côtière, variation saisonnière, tropical, Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE WATERS OF AN EUTROPHIC TROPICAL LAGOON
(THE EBRIE LAGOON, COTE D'IVOIRE). PART I : SEASONAL VARIATION OF THE HYDROCHEMICAL PARAMETERS

One-hundred forty four bimonthly surveys were undertaken during an annual cycle in order to better apprehend the new hydrochemical structure of the estuarine area of the Ebrié lagoon from physical, chemical (temperature, salinity, nutrients, pH) and environmental (rainfall, flood) data point of view. The hydrology of this lagoon have been modified by the opening of the Bassam Inlet. The estuarine zone is characterized by a high temporal variability caused by the alternating rainfall, flood and great dry seasons (low frequency variations), but also, by tidal cycles (high frequency variations) governed by the bi-monthly and daily of high and low waters. Correlation analysis between the different physical and chemical parameters showed that salinity was correlated well with factors such as rainfall, flood and nutrients. Heavy rains and flood were the carriers of lagoonal waters into the ocean. Current generated by these waters increases in intensity (positive correlation) induced a decrease in salinity (negative correlation) and an increase in nutrient concentrations (negative correlation).

Key words : Hydrology, coastal lagoons, seasonal variation, tropical, West Africa.

INTRODUCTION

Les milieux lagunaires, zones tampon entre les domaines continentaux et marins, sont le siège des phénomènes complexes liés aux échanges entre eaux douces (d'origine météorologique et fluvial) et eaux marines. Il en résulte une importante variabilité de leurs caractères hydrologiques, hydrobiologiques et hydrochimiques (Durand et Chantraine, 1982) entraînant des fluctuations importantes des communautés floristiques et faunistiques (Wilke, 1999 ; Guiral, 1992). De plus, ces lagunes connaissent de fortes perturbations hydrodynamiques dues aux travaux d'aménagements (remblaiements, dragages, constructions de digues et de canaux, etc.) réalisés tant, sur le plan d'eau lui-même, que sur le bassin versant (Dufour *et al.*, 1994 ; Wilke, 1998 ; Wilke et Boutière, 2000). Les modifications ainsi apportées remettent en cause le fonctionnement naturel du milieu.

La lagune Ebrié, la plus importante des lagunes de Côte d'Ivoire, a fait l'objet d'un grand nombre d'études biologiques qui ont porté sur l'ichthyofaune (Albaret, 1994), et sur l'hydrochimie et sur la pollution (Duchassin *et al.*, 1973 ; Pagès, 1975 ; Dufour et Slepoukha, 1975 ; Pagès *et al.*, 1980 ; Pagès et Lemason, 1981 ; Arfi *et al.*, 1981 ; Dufour, 1982 ; Zabi, 1982 ; Broche et Perschet, 1983 ; Carmouze et Caumette, 1985 ; Marchand et Martin, 1985 ; Dufour *et al.*, 1994a). Les conditions hydrologiques et sédimentologiques dans la lagune ont été également étudiées (Tastet, 1974 ; Gallardo, 1978 ; Tastet et Guiral, 1994 ; Dufour *et al.*, 1994a).

Malgré ce nombre impressionnant de travaux scientifiques, de nouvelles études visant à connaître le fonctionnement hydrochimique des eaux de la lagune Ebrié se sont avérées nécessaires, surtout après la modification spectaculaire de la circulation de ses eaux consécutive à l'ouverture du Grau de Bassam en 1987.

L'objectif de ce travail est de mieux approcher, à partir des données physico-chimiques (température, salinité, sels nutritifs, pH, chlorophylle a, matière en suspension) et environnementales (débits de fleuve et pluviométrie), la nouvelle structure hydrologique et hydrochimique de la région estuarienne de la lagune Ebrié.

MATERIEL ET METHODES

CAMPAGNES DE MESURES ET D'ECHANTILLONNAGE

Entre janvier 1993 et décembre 1998, cent quarante quatre campagnes de mesures bimensuelles ont été réalisées en 11 stations réparties le long de l'estuaire Ebrié. (Figures 1a et 1b). Afin de mieux estimer la variabilité saisonnière des paramètres physico-chimiques et microbiologiques, des prélèvements ont été réalisés deux fois par mois à l'occasion de la marée de plus grande amplitude au cours de la période de vive-eau, et de plus faible amplitude lors des séquences de morte-eau. En outre, deux sorties journalières en chaque site furent réalisées respectivement deux heures après les étales de basse mer et de haute mer.

Les échantillons d'eau sont prélevés à 20 cm sous la surface et à l'interface eau/sédiments à l'aide d'une bouteille Niskin. Les prélèvements, conservés à basse température et à l'obscurité, ont été analysés dans un intervalle de deux heures.

ANALYSES DES NUTRIMENTS

Immédiatement après leurs prélèvements réalisés à la bouteille Niskin, les échantillons ont été filtrés sur une soie de 60 μm , puis sur un filtre GF/C (Whatman), sauf pour NH_4^+ . L'eau a été recueillie dans des piluliers en verre rincés avec l'échantillon filtré puis congelé à -30°C avant l'analyse des nutriments.

ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

La température et la salinité ont été mesurées *in situ* par immersion d'une sonde STC (YSI). Les ions orthophosphates (PO_4^{3-}) et les composés azotés minéraux (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+) ont été dosés à l'aide d'un autoanalyseur Technicon AA2 selon les modalités préconisées par (Strickland et Parsons (1972)).

ANALYSES BACTERIOLOGIQUES

Le dénombrement des coliformes a été effectué après une incubation à 44°C durant 24 h sur milieu gélosé M-ENDO (Dufour *et al.*, 1981).

Les streptocoques se développant sous forme de petites colonies translucides, entourées d'un

halo noir, ont été dénombrées après 24 h d'incubation à 44° C sur milieu gélosé D-COCCOSEL ou KF Streptococcus Agar.

La recherche de *Clostridium perfringens* a été effectuée en milieu Trypcase, Sulfite, Néomycine (milieu TSN) par ensemencement en gélose profonde. Le dénombrement des colonies sulfito-réductrices (présentant un halo noir lié à la précipitation, par des sels de fer, du sulfure produit lors de la sulfite-réduction) a été réalisé après incubation à 46° C pendant 24 h.

Les densités de bactéries ont été estimées dans 100 ml de solution selon les recommandations établies par (l'OMS/PNUE (1977)) après

normalisation des données par transformation logarithmique :

$$x \rightarrow \log (x+1).$$

COLLECTE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les données pluviométriques et les caractéristiques hydrologiques du fleuve Comoé ont été fournies respectivement par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement ex-ORSTOM) et la Direction de l'Eau du Ministère des Infrastructures Economiques de Côte d'Ivoire.

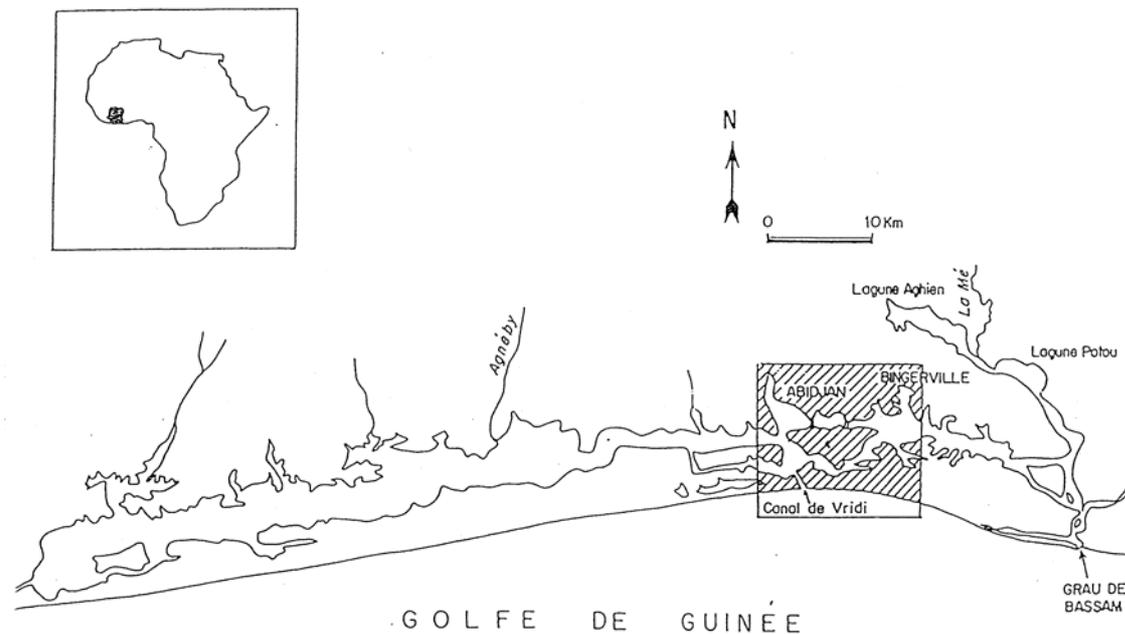


Figure 1a : Le système lagunaire Ebrié.

The Ebrié lagoon system

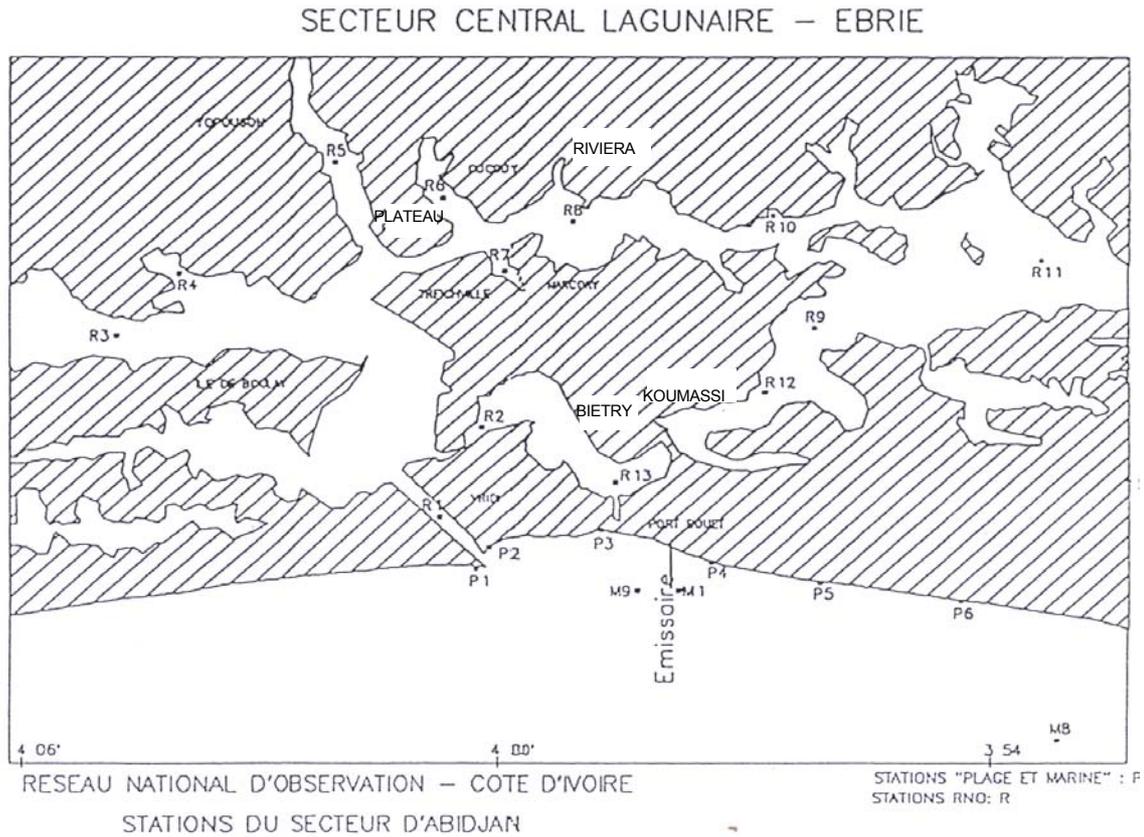


Figure 1b : Stations de surveillance du RNO-Côte d'Ivoire.

The National Observation Network monitoring stations in Côte d'Ivoire.

- R1 : Vridi R4 : Yopougon R7 : Marcory 10 : Mbadon
- R2 : Bietry R5 : Banco R8 : Chenal Est R11 : Anna
- R3 : Azito R6 : Cocody R9 : Koumassi

RESULTATS ET DISCUSSION

PLUVIOMETRIE ET DEBITS DU FLEUVE

Les variations saisonnières de la pluviométrie et des débits du fleuve Comoé sont présentés par la figure 2. Les périodes sèches peuvent être

observées entre les mois de décembre et avril (Grande saison sèche) et les mois de août et septembre (petite saison sèche). Les saisons pluvieuses se situent de mai à juillet (Grande saison de pluies) et d'octobre à novembre (petite saison de pluies). Le fleuve Comoé qui alimente principalement la lagune Ebrié atteint son débit maximum entre les mois de septembre et octobre.

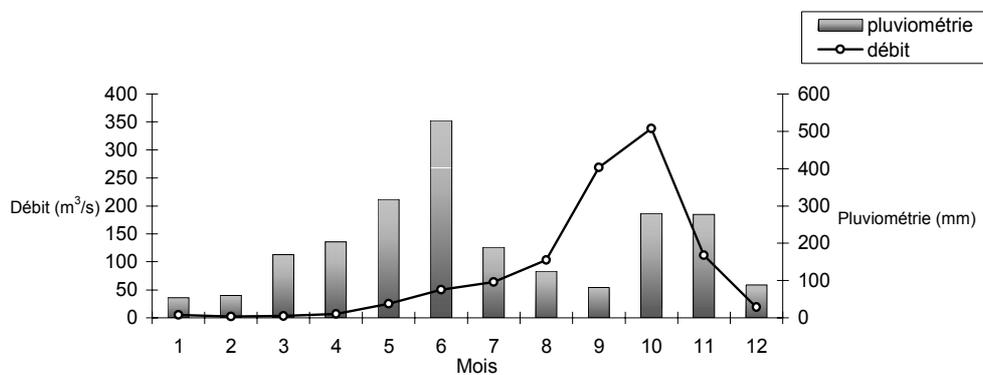


Figure 2 : Moyennes mensuelles des débits du fleuve Comoé et de la pluviométrie entre 1993 et 1998.

Monthly means flow rates of the Comoé river and rainfall data between 1993 and 1998.

TEMPERATURE DES EAUX

Les températures moyennes des eaux sont de 29° C en surface et de 28° C en profondeur. La température maximale a été observé en avril pendant la saison sèche (29° C en surface et 28° C en profondeur) et les températures minimales ont été observé pendant les périodes de crue et de pluies (26 - 27° C) et surtout

pendant le mois d'août, en raison de l'upwelling côtier. Les stations étudiées présentent des courbes de variation de température de même allure mais, d'amplitudes différentes (Figure 3). Les coefficients de variation sont très faibles (CV < 7 %) en général traduisant l'absence de variations thermiques importantes au sein du système lagunaire.

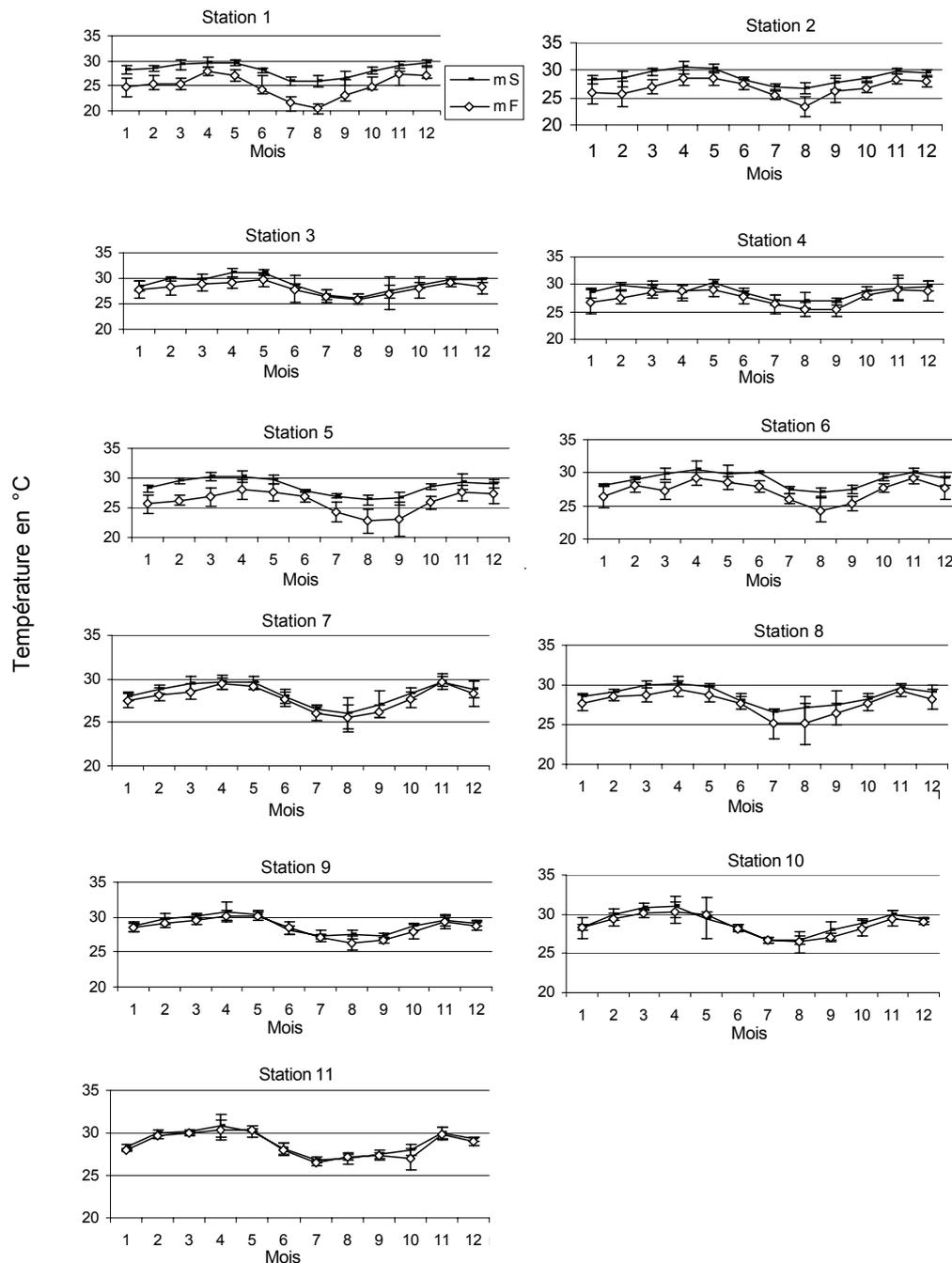


Figure 3 : Evolution saisonnière de la température en surface et à l'interface eau-sédiments des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of temperature at the surface and at the interface water-sediments between 1993 and 1998.

La variabilité spatiale des températures moyennes de surface a été inférieure à 1° C sur la zone étudiée. Cette variabilité a été relativement plus importante en profondeur. La station Vridi a présenté, les températures moyennes au fond les plus basses et le coefficient de variation le plus élevé (Tableaux 1 et 2). La température moyenne de l'eau au fond est passée de 31° C en avril à 22° C en août. Ces caractéristiques ont été liées à la forte influence océanique sur la station Vridi.

Selon Dufour (1984), Varlet, (1978) et Pagès *et al.*, (1979), les variations spatiales de la température des eaux ont pour origines les milieux «frontières». La température des eaux océaniques étant constamment plus froides que celle des eaux lagunaires, on observe un faible gradient horizontal positif du canal de Vridi vers l'amont. Pour la même raison, il existe un gradient vertical dans la région d'estuaire qui peut exceptionnellement dépasser 6° C en saison des crues du fleuve Comoé, avec la coexistence en surface d'eaux chaudes et dessalées, et en profondeur d'eaux froides

marines d'upwelling. En d'autres saisons et partout ailleurs, le gradient vertical de température est resté faible.

SALINITE ET PH

Les salinités moyennes des eaux de surface décroissent des stations proches d'Abidjan et du canal de Vridi (Vridi, Biétri, Azito, Yopougon, Banco, Cocody, Marcory) vers les stations (Mbadon et Anna) les plus éloignées de la communication avec l'océan (Tableaux 1 et 2). Les variations saisonnières des eaux superficielles ont été très accentuées (51 % < CV < 95 %) et identiques pour l'ensemble de la zone estuarienne, passant de moins de 1‰ en saison de crues (septembre et octobre) et de précipitations, à plus de 30 ‰ en saison sèche et d'étiage du Comoé (janvier, février) (Figure 4). La circulation étant de type estuarienne dans le secteur d'étude, l'eau de mer s'écoule en profondeur vers l'amont formant un «coin d'eau salée» qui subit des pulsations biquotidiennes fonction de l'amplitude des marées et du régime des fleuves. Son extension

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques (Moyenne, minimum (min) et maximum (max)) des eaux en surface de la lagune Ebrié.

Physical and chemical parameters (Mean, minimum (min) and maximum (max)) of surface waters from the Ebrié lagoon .

Localité	Température (T°C)	Salinité (‰)	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ³⁻
	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)
Vridi	28.2 (21.1-31)	18.92 (2.1-32.5)	0.031 (0-0.291)	0.061 (0-0.263)	0.08 (0-0.507)	0.048 (0-0.2)
Bietri	28.8 (25-32)	18.18 (1.1-32.1)	0.038 (0-0.291)	0.047 (0-0.18)	0.091 (0-0.916)	0.098 (0-0.998)
Azito	29 (23.8-32.8)	14.39 (2-28.4)	0.031 (0-0.196)	0.078 (0-1.161)	0.067 (0-0.419)	0.495 (0-17.2)
Yopougon	29 (24.2-32.9)	16.24 (0.8-33.4)	0.039 (0-0.278)	0.062 (0-0.309)	0.094 (0-0.869)	0.089 (0-0.744)
Banco	28.6 (25-31.8)	15.87 (0.8-30.5)	0.052 (0-0.382)	0.065 (0-0.269)	0.08 (0-1.538)	0.11 (0-1.658)
Cocody	28.8 (25.1-32.2)	13.86 (0-28)	0.035 (0-0.173)	0.084 (0-0.265)	0.283 (0-6.489)	0.137 (0-0.97)
Marcory	28.4 (24.3-31.1)	15.63	0.035 (0-0.172)	0.085 (0-0.289)	0.137 (0-1.326)	0.106 (0-0.639)
Chenal	28.8	12.06	0.027	0.090	0.096	0.091
Est	(25.6-31.3)	(0-26)	(0-0.114)	(0-0.375)	(0-1.417)	(0-0.73)
Koumassi	29 (26.4-32)	9.53 (0-24)	0.023 (0-0.252)	0.077 (0-0.273)	0.057 (0-0.32)	0.101 (0-0.788)
Mbadon	29.2 (26-32.5)	9.40 (0.3-25)	0.055 (0-0.258)	0.099 (0.019-0.324)	0.232 (0-0.635)	0.159 (0.015-0.65)
Anna	29.3 (26-32)	8.4 (0-24.5)	0.032 (0-0.291)	0.061 (0-0.263)	0.08 (0-0.507)	0.149 (0.012-0.767)

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques (Moyenne, minimum (min) et maximum (max)) des eaux de fond de la lagune Ebrié.

Physical and chemical parameters (Mean, minimum (min) and maximum (max)) of bottom waters from the Ebrié lagoon.

Localités	Température (T°C)	Salinité (‰)	NO ₂	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)
Vridi	25 (19-29)	32 (9-38)	0.019 (0-0.291)	0.057 (0-0.232)	0.080 (0-0.507)	0.048 (0-0.2)
Bietri	26.8 (21-30)	24.5 (0.5-35.6)	0.034 (0-0.278)	0.055 (0-0.298)	0.161 (0-1.119)	0.098 (0-0.998)
Azito	28.1 (24-31)	19 (2.4-32.6)	0.034 (0-0.234)	0.065 (0-0.44)	0.079 (0-0.481)	0.75 (0-26.2)
Yopougon	27.7 (23-30)	20 (1.7-35)	0.047 (0-0.276)	0.065 (0-0.212)	0.089 (0-1.538)	0.096 (0-0.797)
Banco	26 (19-31)	26 (3-	0.051 (0-0.373)	0.071 (0-0.21)	0.108 (0-1.538)	0.100 (0-1.658)
Cocody	27.4 (22-30)	20 (0-34.8)	0.031 (0-0.151)	0.11 (0-1.76)	0.164 (0-1.621)	0.101 (0-0.917)
Marcory	27.9 (24-31)	18	0.034 (0-0.161)	0.081 (0-0.203)	0.114 (0-1.711)	0.105 (0-0.66)
Chenal est	27.8 (21-30)	17 (0-30)	0.033 (0-0.14)	0.086 (0-0.24)	0.084 (0-1.621)	0.090 (0-0.666)
Koumassi	28.5 (25-31)	13 (0-26)	0.025 (0-0.113)	0.084 (0-0.254)	0.078 (0-0.94)	0.097 (0-0.8877)
Mbadon	28.7 (25-32)	11 (0.5-25.5)	0.064 (0-0.193)	0.084 (0.021-0.273)	0.078 (0-0.94)	0.15 (0.015-0.65)
Anna	29 (27-32)	11 (0-24.5)	0.043 (0-0.13)	0.086 (0-0.24)	0.84 (0-0.917)	0.19 (0.013-0.842)

est maximale en grande saison sèche à marée haute (Dufour et Slepoukha, 1975 ; Varlet, 1978).

En surface, il existe un courant inverse d'eau moins salée devenant important en période de pluies et de crue de la Comoé, limitant ainsi l'extension des eaux salées à quelques mètres d'épaisseur dans la baie d'Abidjan. Entre ces deux couches subsiste une halocline, particulièrement accentuée en période de forte dessalure superficielle en juin-juillet-septembre et octobre ((Guiral *et al.*, 1989 ; Dufour, 1982). Plus vers l'amont, dans les chenaux centraux, la progression des eaux salées est entravée par l'élévation du niveau du fond tandis que les eaux superficielles se diluent peu à peu aux eaux plus douces d'origine continentales. Les mouvements alternatifs de marée fournissent l'énergie nécessaire à ce mélange. Les isohalines se rapprochent alors de la verticale. On observe un véritable front halin qui se déplace

quotidiennement et saisonnièrement avec le régime des marées et des rivières (Dufour, 1982).

A l'opposé, l'évolution saisonnière des eaux de l'interface eau-sédiment est différente selon la profondeur des stations. Les stations de profondeur, inférieures à 5 m (stations Azito, Yopougon, Cocody, Marcory, Koumassi, Mbadon et Anna), présentent un cycle saisonnier identique à celui des eaux de surface mais, de plus faible amplitude (30 % < CV < 95 %). La station la plus profonde (station Vridi) est caractérisée par une forte stabilité hydrochimique (CV < 16 %). Cette situation résulte d'une stratification permanente des eaux dans ces 2 dépressions, dissociant un épilimnion à salinité variable selon les saisons hydroclimatiques d'un hypolimnion en permanence plus salé d'origine océanique (Guiral *et al.*, 1989).

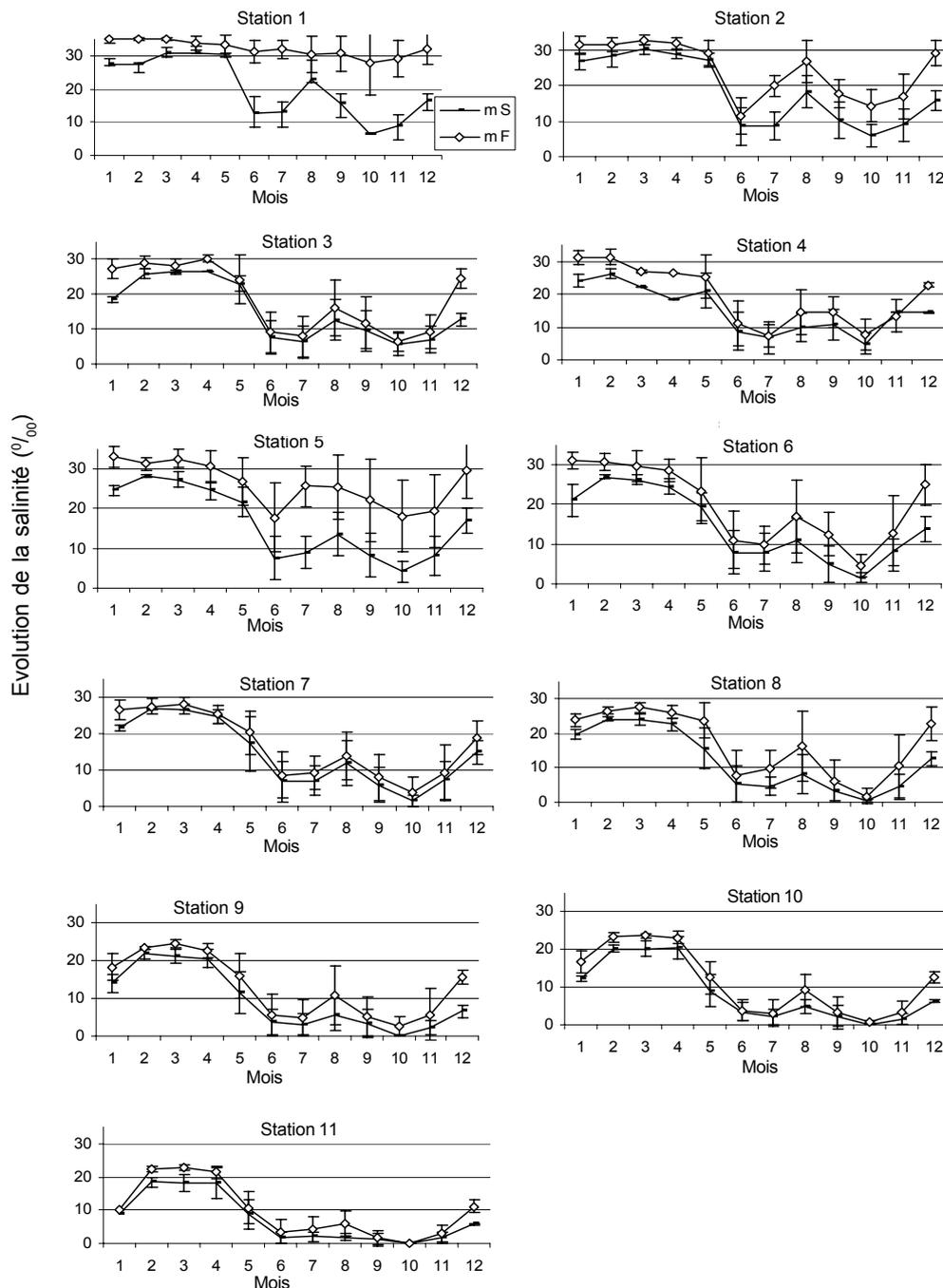


Figure 4 : Evolution saisonnière de la salinité de l'eau en surface et à l'interface eau-sédiment de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of water salinity near the surface and in the bottom between 1993 and 1998.

LES NUTRIMENTS

Les valeurs moyennes en NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ et en PO_4^{3-} en surface et à l'interface eau-sédiments sont présentées dans les tableaux 1 et 2. Globalement, pour l'ensemble des stations suivies, les charges en composés azotés et en PO_4^{3-} ont été très élevées et traduisent une très forte eutrophisation des eaux estuariennes de la lagune Ebrié. En outre, les coefficients de variation ont également été très élevés ($\text{CV} > 95\%$). Ceci montre que la très forte variabilité

des éléments nutritifs est liée aux différentes masses d'eau de la lagune. Pour l'analyse des variations saisonnières des formes azotées, les teneurs en NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ ont été additionnées. Seule une analyse globale permet de dégager les tendances saisonnières de l'azote inorganique (ensemble des trois formes azotées) ; chaque forme présentant une forte variabilité. La figure 5 montre qu'en surface, la teneur en azote inorganique est élevée pendant la saison des pluies, en particulier, lors de la petite saison des pluies qui ont coïncidé avec le

passage de la crue du fleuve Comoé (septembre à novembre). En revanche, les concentrations

minimales ont été élevées lors de la saison sèche.

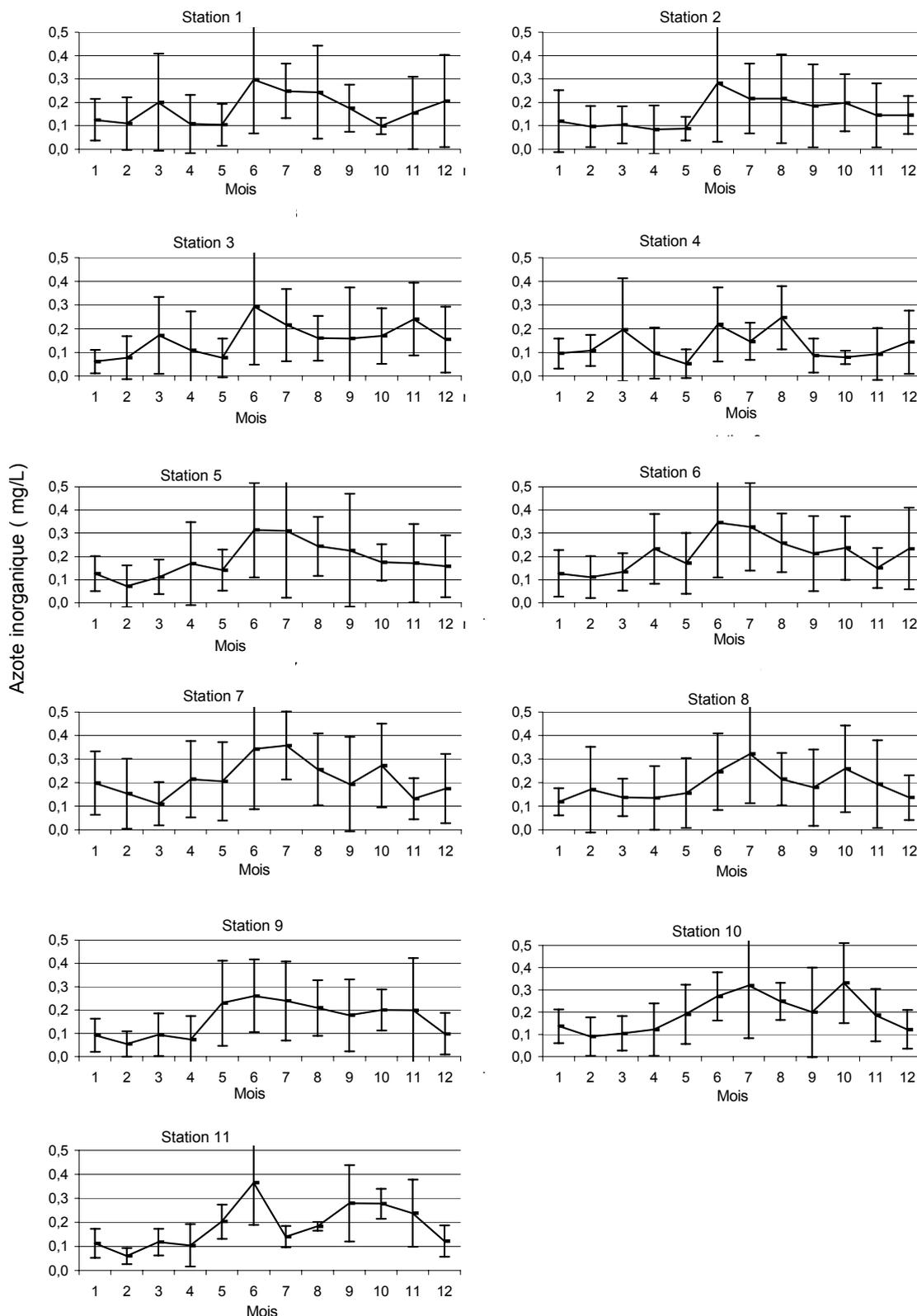


Figure 5 : Evolution saisonnière de la teneur en azote inorganique des eaux en surface de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of inorganic amonium concentration of the water near surface between 1993 and 1998.

A l'interface eau-sédiment (Figure 6), on observe pour l'ensemble des stations, une augmentation de la teneur en azote inorganique pendant la saison des pluies. Les concentrations moyennes pendant cette période ont varié entre 0,3 et 0,4 mg/L. La concentration moyenne minimum de PO_4^{3-} , comprise entre 0 et 2 mg/L, est observée en saison sèche (Figures 7 et 8).

La zone estuarienne de la lagune Ebrié présente une forte variabilité temporelle, étant soumise à des variations de basses fréquences (variabilité annuelle liée au cycle hydroclimatique : précipitations, crue, grande saison sèche) mais aussi, de plus hautes fréquences liées au cycle des marées (variabilité bi-mensuelle : alternance basse mer, haute mer). Les pluies apportent des sels nutritifs qui enrichissent les eaux superficielles. Elles apportent de l'eau douce en surface et participent à l'établissement d'une stratification. De plus, elles provoquent, un lessivage important de la zone urbaine, ce qui constitue une source importante de minéraux et de particules solides en suspension.

D'autre part, les crues, ont une influence variable sur les différents secteurs de la zone d'étude. Les crues des rivières du domaine guinéen amènent en lagune des eaux ayant traversé les terres du sud de la Côte d'Ivoire, majoritairement occupées par des forêts, mais également par de vastes zones de cultures et de sols nus. Les apports terrigènes et les nutriments provenant des fertilisants sont importants. La crue du fleuve Comoé affecte la partie Est de la lagune. Elle balaye toute la zone comprise entre Grand-Bassam et le canal de Vridi, puisque cette partie de la lagune constitue, à cette occasion, le prolongement du fleuve. Les eaux de la Comoé qui ont drainé 78000 km², dont une grande partie constituée de savane, sont riches en particules solides, en suspension et en sels minéraux. Toutes les stations étudiées ont été affectées par ces crues ; même celles proches de l'estuaire, les pluies et les crues provoquent une diminution brusque de la salinité.

Les entrées d'eau océanique, salée et riche en sels nutritifs liées aux résurgences côtières bouleversent également les caractéristiques de la lagune. L'upwelling de la petite saison froide, en janvier-février, permet la déstratification profonde de la lagune dans les zones. Ce phénomène a lieu au cours d'une période d'apports continentaux très faibles. Vers la fin du mois d'octobre, le débit des eaux de la

Comoé diminue brutalement, et l'étiage débute à la fin de la zone littorale durant la petite saison des pluies. L'arrêt de tout apport important d'eau douce dans la lagune se traduit par une augmentation progressive de la salinité de l'eau superficielle, induisant un affaiblissement du gradient halin. Aussi, la diminution de quelques degrés de la température océanique de surface durant l'upwelling se répercute dans le système lagunaire par le jeu des marées et induit l'augmentation de densité des eaux de surface dans la zone estuarienne de la lagune Ebrié et les baies situées à proximité. L'instabilité dans le plan vertical est alors maximale et l'affaiblissement de la barrière de densité permet des échanges vers la couche profonde. Les concentrations en azote inorganique de la couche anoxique diminuent brutalement avec l'atténuation du gradient de densité et l'établissement d'échanges turbulents au sein de la colonne qui tendent à homogénéiser les concentrations de sels nutritifs en surface et en profondeur. L'absence de gradient vertical marqué perdure pendant 10 à 12 semaines. A partir d'avril-mai, l'influence marine n'est plus importante et, à la grande saison des pluies, la colonne d'eau est à nouveau stratifiée. Avec le renforcement de la stratification, on assiste à une nouvelle phase d'accumulation des sels nutritifs.

L'upwelling de la grande saison froide qui a lieu de juillet à octobre est le plus important, mais il n'a pas une influence directe sur les eaux lagunaires. En effet, à cette période la stratification est importante. L'upwelling ne conduit pas à un affaiblissement du gradient de densité significatif pour entraîner l'oxygénation des eaux profondes anoxiques piégées au sein des dépressions des baies estuariennes. Par contre, l'apparition et la disparition de cet upwelling conditionnent la fin de la grande saison et le début de la petite saison des pluies. Il semble en effet que l'apparition de l'upwelling met en jeu deux facteurs d'inhibition des pluies. D'une part, il peut provoquer la diminution des températures océaniques au-dessous de 26° C, seuil thermique de convection profonde correspondant aux fortes pluies. D'autre part, il peut être à l'origine d'un brusque fléchissement du gradient d'humidité à la côte, suivi d'une baisse des pluies (Gallardo, 1993). La durée, l'intensité et l'importance de la zone d'influence de l'upwelling de la grande saison froide sont des facteurs qui déterminent les conditions climatiques sur la lagune.

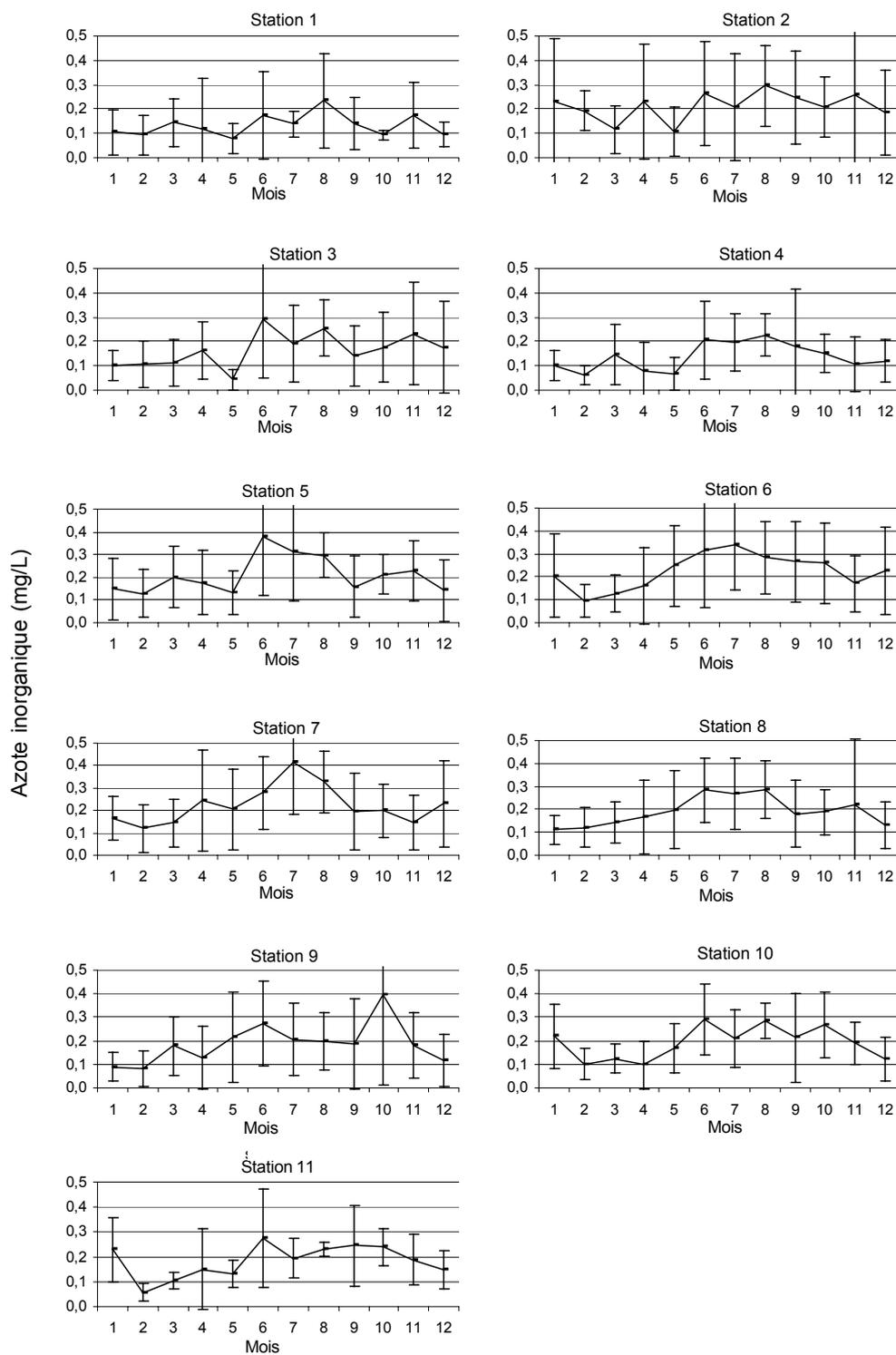


Figure 6 : Evolution saisonnière de la teneur en azote inorganique de l'eau de la lagune Ebré à l'interface eau-sédiments entre 1993 et 1998.

Seasonal variations in inorganic ammonium concentration at the interface water-sediment of the Ebré lagoon between 1993 and 1998.

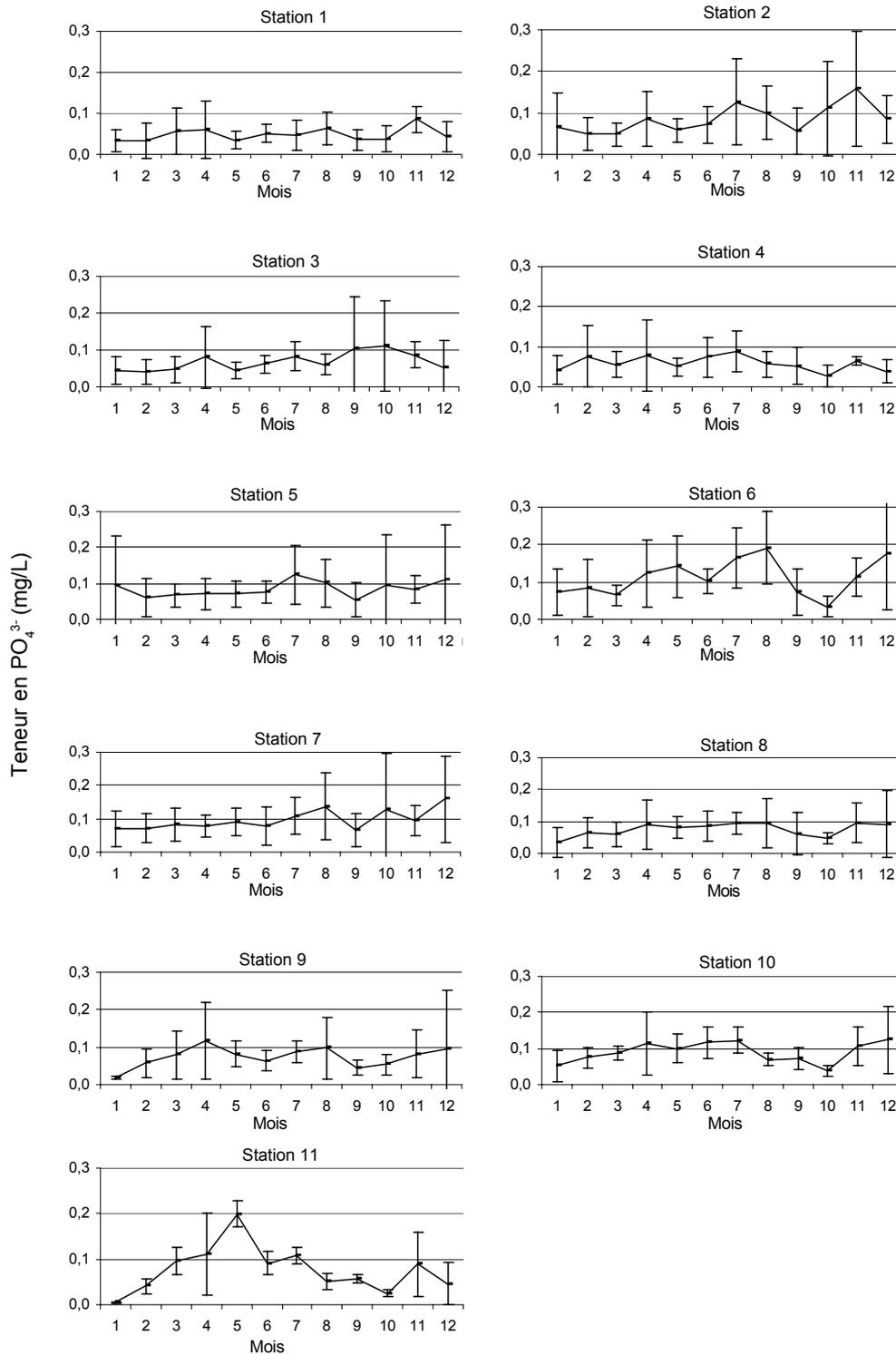


Figure 7 : Evolution saisonnière de la teneur en PO_4^{3-} en surface des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of PO_4^{3-} concentration in surface of waters of the Ebrié lagoon between 1993 and 1998.

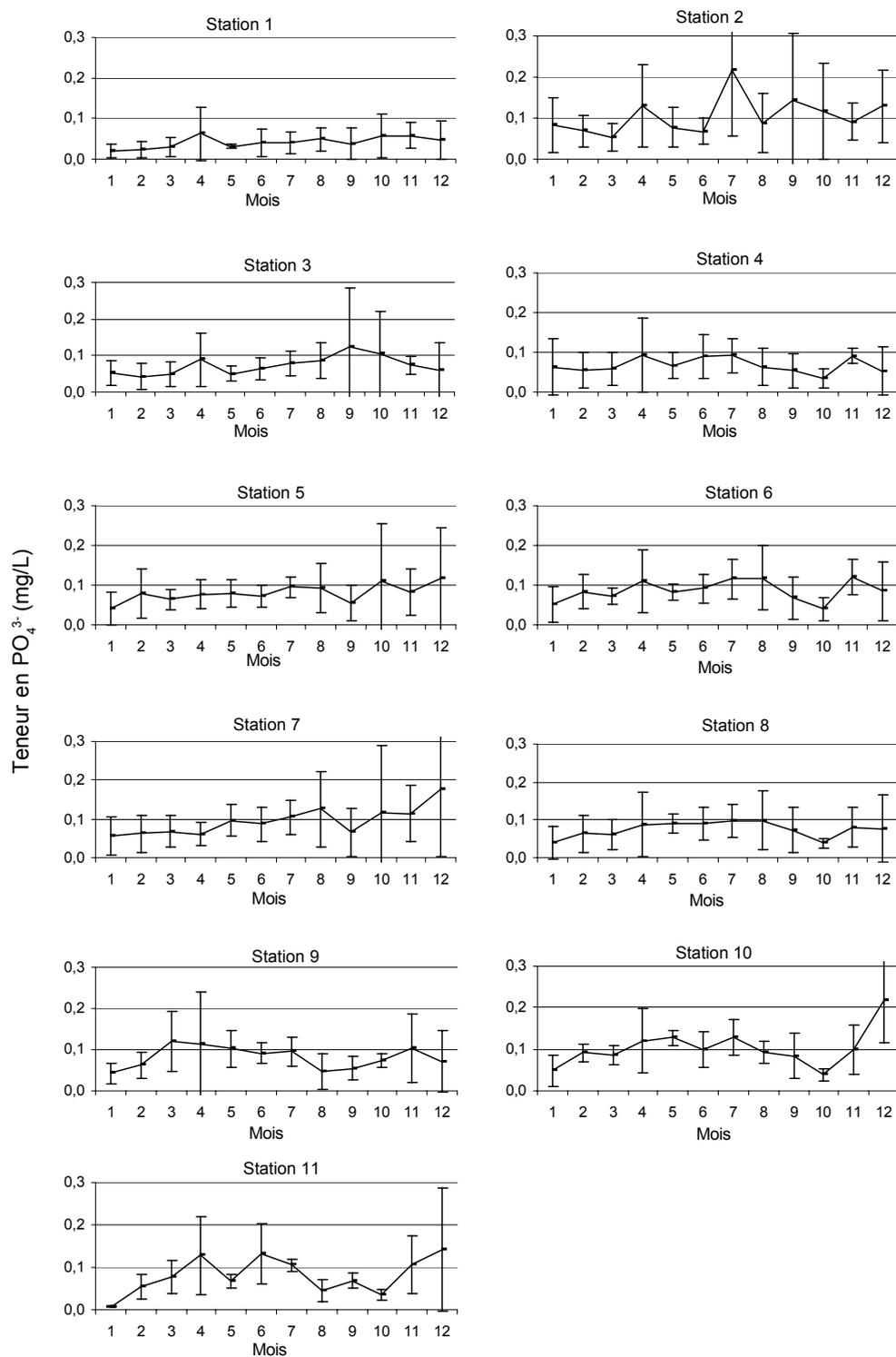


Figure 8 : Evolution saisonnière de la teneur en PO_4^{3-} à l'interface eau-sédiment des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of PO_4^{3-} concentration in surface and bottom waters of the Ebrié lagoon between 1993 and 1998.

CONTAMINATION BACTERIENNE

Les baies de la zone urbaine de Abidjan, directement soumises aux apports polluants domestiques, présentent en surface des densités de bactéries très élevées. Les stations d'Anna, de M'Badon et de Koumassi sont les moins contaminées et se caractérisent par une très grande variabilité (Tableau 3). En considérant que les valeurs observées à ces stations définissent les caractéristiques bactériologiques moyennes des eaux estuariennes de la lagune Ebrié, les déversements d'effluents contribuent à un très important surcroît de la contamination fécale des eaux de surface dans la zone urbaine d'Abidjan. La contamination par les coliformes thermotolérants s'avère la plus forte, avec des moyennes annuelles de l'ordre de 2.000 cellules/100 mL et des concentrations maximales dépassant 1.106 cellules/100 mL, en particulier durant la saison sèche. Pour *C. perfringens*, les stations 8, 9, 10 et 11 ont été significativement moins polluées que les autres stations qui ont présenté des moyennes comparables.

Si l'on se réfère à la norme de l'OMS-PNUE, l'ensemble des eaux de la zone urbaine de Abidjan montre un état sanitaire préoccupant, surtout dans les baies où le taux de renouvellement des eaux est faible. Yopougon, Cocody et Marcory sont trois baies particulièrement exposées à une contamination d'origine fécale. La zone lagunaire de Yopougon (comme Azito) reçoit tous les effluents urbains et industriels de la commune de Yopougon. Au fond de la baie de Cocody, débouche un émissaire du réseau d'eaux pluviales qui transporte une eau fortement contaminée. Comme cela a été dit précédemment, cette baie reçoit également les eaux usées de plusieurs quartiers alentour. La baie de Marcory, enclavée, reçoit les eaux usées de la commune en raison des fréquentes pannes des stations de relevage.

La station Anna, située en dehors de la zone urbaine n'est pas sujette à une contamination fécale. La station M'Badon, polluée par les matières organiques en raison du lessivage de la décharge d'Akouédo, ne reçoit pas d'effluents domestiques et donc ne subit pas de pollution bactérienne. La station de Koumassi se trouve à l'entrée de la baie, dans une zone à fort hydrodynamisme. Pour cette raison, la contamination y est faible, mais ce résultat ne peut être généralisé à l'ensemble de la baie. La distribution (Figure 9) des coliformes thermotolérants présente deux périodes de

contamination maximale coïncidant aux fortes précipitations locales (octobre et juin-juillet). Les valeurs minimales ont été relevées pendant la saison sèche (décembre à avril). Les densités des Streptocoques fécaux (Figure 10) montrent une évolution similaire aux coliformes thermotolérants, mais avec une plus faible amplitude annuelle. Pour *C. perfringens*, dont les concentrations correspondent à la somme des formes végétative et sporulée, il n'existe pas d'évolution saisonnière nette et les variations de faible amplitude n'apparaissent pas simultanément dans les diverses stations. Outre Anna, les coefficients de variation pour cette bactérie anaérobie capable de survivre à l'état sporulé sont très faibles (Figure 11).

L'accroissement de la concentration des eaux en coliformes thermotolérants en saison de pluies peut être interprété comme résultant d'une augmentation des apports par lessivage et débordement des puits perdus lors de la remontée de la nappe phréatique. Elle peut également résulter de la diminution du rayonnement solaire et de son effet bactéricide. Ce phénomène est renforcé par la forte turbidité des eaux lagunaires à cette époque (Kouassi *et al.*, 1990). La faible concentration des coliformes pendant la période d'étiage (forte influence marine), résulte d'un ensemble de facteurs environnementaux physiques, chimiques et biologiques, notamment les effets de la pression osmotique, de l'action du rayonnement solaire, de la toxicité des métaux, de la compétition interspécifique et de la pression de prédation.

Des recherches récentes ont montré que la disparition des entérobactéries en milieu marin était en réalité due à une inaptitude des cellules bactériennes à se développer sur les milieux de culture spécifiques utilisés pour leur numération sélective : leur incapacité à croître sur ces milieux résulterait de leur mise en dormance, consécutive à leur transit en milieu hostile. Ainsi, le rythme saisonnier observé dans la zone urbaine de la lagune Ebrié induit par les apports provenant des précipitations peut se trouver artificiellement renforcé (Dufour *et al.*, 1994 ; Durand et Guiral, 1994).

Le tableau 3 montre une augmentation significative du taux de coliformes thermotolérants entre la saison sèche et la saison des pluies. Ces résultats montrent que la baisse de la teneur en bactéries consécutive à la crue n'a pas été aussi importante que celle observée en saison sèche.

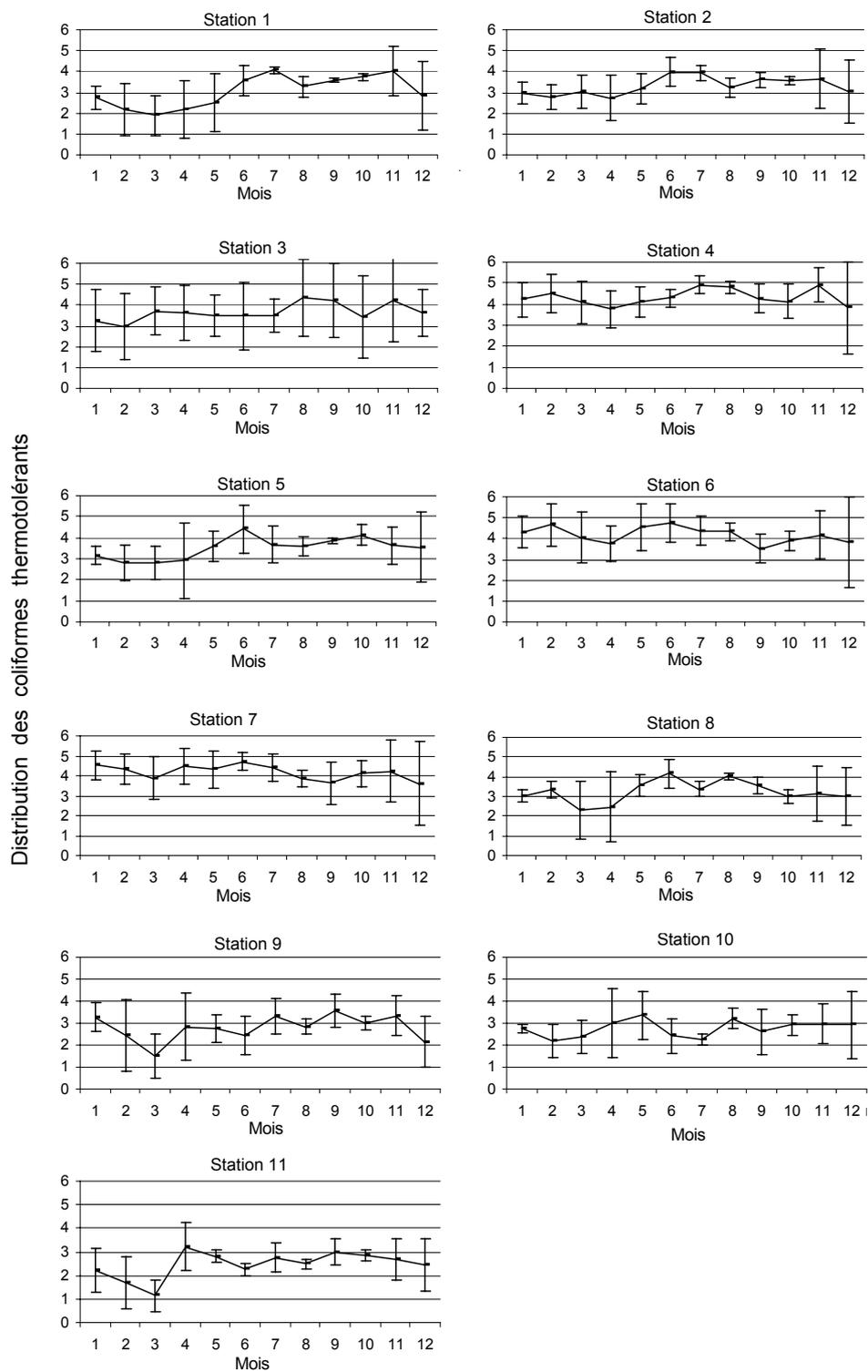


Figure 9 : Evolution saisonnière de la teneur en *Enterococcus coli* en surface des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of Enterococcus coli counts near the surface waters of the Ebrié lagoon between 1993 and 1998.

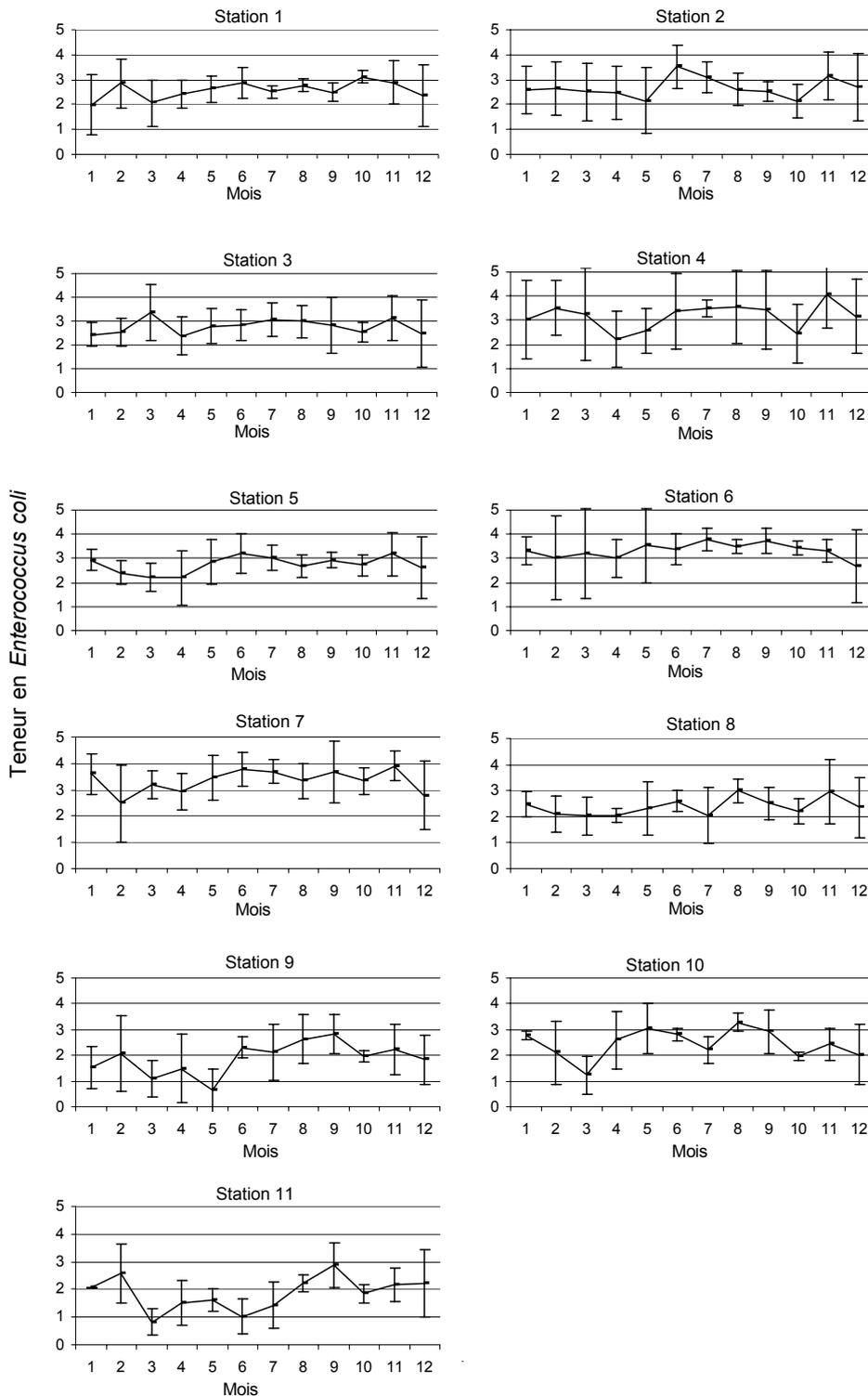


Figure 10 : Evolution saisonnière de la teneur en *Enterococcus* en surface des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of Enterococcus counts near the surface of waters of the Ebrié lagoon between 1993 and 1998.

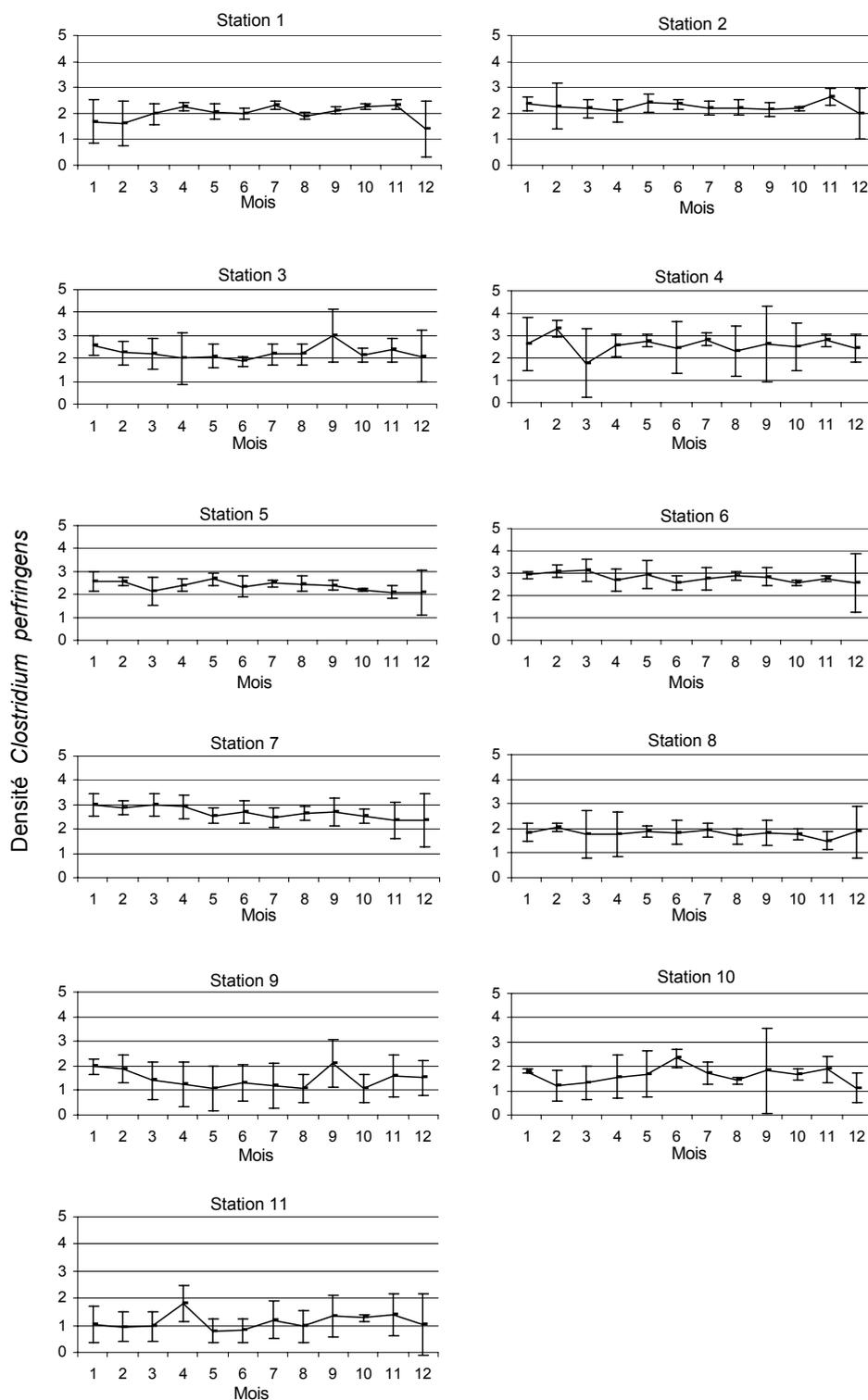


Figure 11 : Evolution saisonnière de la teneur en *Clostridium perfringens* en surface des eaux de la lagune Ebrié entre 1993 et 1998.

Seasonal variation of Clostridium perfringens counts near the surface of waters of the Ebrié lagoon between 1993 and 1998.

Tableau 3 : Distributions des Coliformes, *Enterococcus* et *C. perfringens* en fonction de trois saisons hydroclimatiques.*Coliforms, Enterococcus and C. perfringens counts during the three hydroclimatic seasons.*

Paramètres statistiques	Population d'organismes		
	Saison sèche	Saison des pluies	Saison des crues
	janvier-mai	juin-juillet	sept-novembre
Coliformes thermotolérants			
Moyenne	3,09	3,68	3,55
écart type	0,22	0,01	0,04
Streptocoques fécaux			
Moyenne	2,43	2,82	2,74
écart type	0,18	0,07	0,32
<i>Clostridium perfringens</i>			
Moyenne	2,12	2,08	2,14
écart type	0,10	0,04	0,18

CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES

Une analyse de corrélation (Pearson et Lee 1903) effectuée entre les différents paramètres physiques, chimiques, météorologiques et bactériologiques (Tableau 4), montre que les facteurs « pluies et débits » sont corrélés avec les facteurs salinité et sels nutritifs. Les fortes précipitations et l'arrivée des crues sont responsables de l'« effet de chasse » des eaux lagunaires en direction de l'océan; le courant de sortie, au niveau du canal de Vridi augmente

d'intensité (corrélation positive), provoque une diminution de la salinité (corrélation négative) et une augmentation des teneurs en sels nutritifs (corrélation négative). Une corrélation négative a également été observé entre salinité et teneur en NO_3 (-0,437). En effet, la teneur des eaux douces en NO_3 est généralement plus forte que celle des eaux d'origine océanique. Enfin, il existe une forte corrélation positive entre les trois formes bactériennes (0,468 ; 0,538 ; 0,562). Ceci traduit le fait que la détection d'une bactérie indique une forte probabilité de présence des deux autres.

Tableau 4 : Matrice de corrélation des paramètres étudiés (coefficients multipliés par 1000).*Matrix correlations of evaluated parameters (X 1000)*

	Débit	Pluviométrie	T°C	salinité	C.F.	S.F.	C.p.	NH ₄	NO ₃	NO ₂
Pluviométrie	125	1000								
T°C	-300*	120	1000							
Salinité	-584**	-284*	323*	1000						
C.F.	65	54	-204	-66	1000					
S.F.	46	-20	-207	-41	562**	1000				
C.p.	-18	-65	-88	221	538**	468**	1000			
NH ₄	-30	-13	35	-41	-4	94	4	1000		
NO ₃	316*	165	-301*	-437**	56	67	-69	51	1000	
NO ₂	64	235	-246	-222	164	100	67	37	276*	1000
PO ₄	2	42	74	-129	46	82	35	181	9	40

* P < 0.05 ; CF : Coliformes

** P < 0.01

CONCLUSION

Ce travail nous a permis de dégager quelques caractéristiques hydrochimiques de la lagune Ebrié. Abidjan avec sa lagune Ebrié, en communication directe avec l'océan par le canal de Vridi et soumise aux apports continentaux (pluie et crue) est une région hydrologiquement ouverte. Les conditions physico-chimiques y sont très variables. La salinité peut y approcher celle de l'océan en saison d'étiage lors des courants de flot et descendre à 0 ‰ en saison des plus fortes crues du fleuve Comoé.

Les concentrations en nutriments caractérisent un environnement eutrophe où, aux contributions naturelles (apports d'eau continentale, remise en suspension des sédiments, dégradation des détritiques organiques), viennent s'ajouter des contributions artificielles (effluents domestiques et industriels).

L'ampleur des phénomènes d'eutrophisation et de pollution est fonction de l'hydrodynamisme et de la morphologie des différents secteurs de la zone urbaine de la lagune. Les secteurs d'Abidjan, occupant les zones lagunaires correspondant au lieu de passage obligatoire de tous les apports, sont soumis à un fort hydrodynamisme que ce soit quotidiennement grâce à la marée ou saisonnièrement grâce au passage des crues fluviales. Les polluants de ces secteurs sont en permanence évacués vers la mer par des courants fluviaux et de marée. Les phénomènes de pollution sont relativement moins importants. En revanche, la pollution s'accumule dans les secteurs plus ou moins à l'abri des courants de marée et d'eau douce. En conséquence, ces secteurs deviennent hypereutrophes.

REFERENCES

- Albaret, (J. J.). 1994. *Les poissons, biologie et peuplement*. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. Tome II - Les milieux lagunaires, Durand J.R., Dufour Ph., Guiral D. et Zabi S. éditeurs. Editions de l'ORSTOM : 239-280.
- Arfi (R.) ; Dufour (P. H.) 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.
- Broche (J.) et Peschet (J. L.). 1983. *Enquête sur les pollutions actuelles et potentielles en Côte d'Ivoire*. In : Réseau national d'observation de la qualité des eaux marines et lagunaires en Côte d'Ivoire, Dufour Ph. et Chantraine J.M. éditeurs. Paris, ORSTOM et Ministère de l'Environnement, 451p.
- 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 : 183-211.
- Duchassin (M.) ; Clerc (C.) ; Bourgeade (A.) et Hosotte (M. T.). 1973. Survie du vibron cholérique El Tor dans les eaux de lagune d'Abidjan. *Bull. Soc. Path. Exot.* 66 : 679-684.
- Dufour (A.) ; Strickland (E.) et Caabelli (V.). 1981. Membrane filter method for enumerating *E. coli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 41 : 1152-1158.
- Dufour (P. H.) et Slepoukha (M.). 1975. L'oxygène dissous en lagune Ebrié : Influence de l'hydroclimat et des pollutions. *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanograph. Abidjan*, 6, 75 - 118.
- Dufour (P. H.). 1982. Les frontières naturelles et humaines du système lagunaire Ebrié. Incidences sur l'hydroclimat. *Hydrobiologia* 94 : 105-120.
- Dufour (P. H.). 1984. L'assainissement d'Abidjan et la sauvegarde de sa lagune : quelles alternatives ? *La Sirène*, 25 : 15-23.
- Dufour (P. H.) ; Kouassi (A. M.) et Lanusse (A.). 1994 a. *Les pollutions*. In Environnement et ressources aquatiques de Côtes d'Ivoire. Tome 2 : les milieux lagunaires, Durand J. R., Dufour P., Guiral D. et Zabi S. G. F. éditeurs. Editions de l'ORSTOM, Paris, 309-333.
- Dufour (P.) ; Albaret (J. J.) ; Durand (J. R.) et Guiral (D.). 1994b. *Fonctionnement de l'écosystème Ebrié*. In Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. Tome 2 : les milieux lagunaires, Durand J. R., Dufour P., Guiral et Zabi S. G. F. éditeurs. Editions de l'ORSTOM, Paris, 509-528.
- Durand (J. R.) et Guiral (D.). 1994. *Hydroclimat et hydrochimie*. In : Environnement et ressources aquatiques de Côtes d'Ivoire. Tome 2 : les milieux lagunaires, Durand J. R., Dufour P., Guiral D. et Zabi S. G. F. éditeurs. Editions de l'ORSTOM, Paris, 59-90.

- Durand (J. R.) et Chantraine (J. M.). 1982. L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Rev. Hydrobiol. Trop.* 15 : 85-113.
- Gallardo (Y.). 1978. Asymmetry and anomalies of circulation and vertical mixing in the branching of a lagoon estuary. *In : Hydrodynamics of Estuaries and Fjords.* 197-206.
- Gallardo (Y.). 1993. Conditions océaniques et pluies littorales en juin. *In : Environnement et ressources aquatiques de Côtes d'Ivoire. Tome 1 : le milieu marin, Leloeuff P., Marchal E., Amon Kothias J.B. Editeurs. Editions de l'ORSTOM, Paris, 63-73.*
- 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.
- Guiral (D.). 1992. L'instabilité physique, facteurs d'organisation et de structuration d'un écosystème tropical saumâtre peu profond, la lagune Ebrié. *Vie et Milieu* 42 (2) : 73 - 92
- Kouassi (A. M.) ; Guiral (D.) et Dosso (M.). 1990. Variations saisonnières de la contamination microbienne de la zone urbaine d'une lagune tropicale estuarienne. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 23 (3) : 181-194.
- Marchand (M.) et Martin (J. L.). 1985. Détermination de la pollution chimique (hydrocarbures, organochlorés, métaux) dans la lagune d'Abidjan (Côte d'Ivoire) par l'étude des sédiments. *Océanogr. Trop.* 20 : 25-39.
- OMS/PNUE, 1977. Directives applicables à la surveillance sanitaire de la qualité des eaux littorales. Rays. Bureau Régional de l'Europe, Copenhague, 177pp.
- Pages (J.). 1975. Etude de la pollution bactérienne en lagune Ebrié. *Doc. Sci. CRO Abidjan*, VI (1) : 97-101.
- Pages (J.) ; Lemasson (L.) et Dufour (P. H.). 1979. Elements nutritifs et production primaire dans les lagunes de Côte d'Ivoire. *Doc. Sci. CRO. Abidjan*, 3, 1 - 30.
- Pages (J.) ; Lemasson (L.) et Dufour (P. H.). 1980. La pollution bactérienne de la lagune et de la mer autour d'Abidjan. *Doc. Sci. CRO Abidjan*, 9 : 43-50.
- Pages (J.) et Lemasson (L.). 1981. Production et utilisation du carbone organique dissous dans une lagune tropicale. *Rev. Hydrobiol. Trop.* 14 (2) : 83 - 101.
- Pearson (K.) et Lee (A.). 1903. *Biometrika In Snedecor G.W. and Cochran W.G (eds). Méthode statistiques : 649 pp*
- Strickland (J.) et Parson (T.). 1972. A practical handbook of sea water analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* 167, 310pp
- Tastet (J. P.). 1974. L'environnement physique du système lagunaire Ebrié. Univ. Abidjan. *Sc. de la terre, Sér. Doc* : 28 pp.
- Tastet (J. P.) et Guiral (D.). 1994. Géologie et sédimentologie. *In : Environnement et ressources aquatiques de Côtes d'Ivoire. Tome 2 : les milieux lagunaires, Durand J. R., Dufour P., Guiral D. et Zabi S. G. F. éditeurs. Editions de l'ORSTOM, Paris, 35-58.*
- Varlet (F.). 1978. Le régime de la lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. *Paris, Trav. Doc. ORSTOM* 83, 164p.
- Wilke (M.) et Boutière (H.). 1998. Cent ans de recherche, de travaux et de projets sur l'étang de la Palme, ses rives et son bassin versant. Report Centre d'Etudes Hydrobiologiques, Perpignan, 109 p.
- Wilke (M.). 1998. Variabilité des facteurs abiotiques dans les eaux d'une lagune méditerranéenne, l'Etang de Canet. *Vie et Milieu* (3) : 157-169.
- Wilke (M.). 1999. Spatio-temporal dynamics of physico-chemical factors *In the water of a heavily transformed Mediterranean coastal lagoon, the Etang de Salses-Leucates. Vie et Milieu* 49 (2/3) : 177 - 191.
- Wilke (M.) et Boutière (H.). 2000. Hydrobiological, physical and chemical characteristics and spatio-temporal dynamics of an oligotrophic Mediterranean lagoon: the etang de la Palme (France). *Vie et Milieu* 50 (2) : 101-115
- Zabi (S. G.). 1982. Les peuplements benthiques lagunaires liés à la pollution en zone urbaine d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Oceanol. Acta n° Spécial. Proceedings International Symposium on Coastal Lagoons. SCOR/IABOI UNESCOI, Bordeaux, France. 8-14 sept. 1981 : 441-455.*