



Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrie (Côte d'Ivoire)

Gbombélé SORO ^{1*}, Bernard Soro METONGO ², Nagnin SORO ¹,
Ernest Kouassi AHOUSSE ¹, Fernand Koffi KOUAMÉ ^{1,3},
Sompohi Guy Pacôme ZADE ¹ et Tanina SORO ¹

¹ Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

² Centre de Recherches Océanologiques (CRO), 29 rue des Pêcheurs, BP V 18 Abidjan, Côte d'Ivoire.

³ Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

* Auteur correspondant, E-mail: marc_soro@yahoo.fr, Tel : (225) 06 079 662

RESUME

Les sédiments de la lagune Ebrie (Côte d'Ivoire) ont été étudiés en vue de déterminer leur degré de pollution par les métaux lourds. L'étude a consisté à déterminer les métaux lourds (Cr, Cu, Mn et Zn) au niveau des sédiments superficiels par spectrophotomètre d'absorption atomique VARIAN 1275 AA. Les données ont été analysées par les méthodes d'Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Index de géo-accumulation afin de connaître l'origine, les zones sensibles et les variables responsables de cette pollution. Les concentrations en métaux varient en fonction de la granulométrie du sédiment pour le cuivre, le zinc et le chrome à l'exception du manganèse. La zone d'étude est divisée en deux secteurs en fonction des valeurs de l'index de géo-accumulation du cuivre et du zinc qui varie de 0 à 1. Les parties Est et Ouest ont un index nul alors que la partie centrale qui regroupe les baies a un index compris entre 0 et 1. Ces différentes baies (Banco, Biétry, Cocody et Marcory) sont les réceptacles des effluents urbains, industriels et des eaux de ruissellement de la ville d'Abidjan. Les teneurs élevées en Cu, Cr et Zn dans les sédiments de ces baies sont dues à une pollution d'origine anthropique.

© 2009 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Pollution, Lagune Ebrie, Métaux lourds, Sédiments, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

Les pollutions d'origine métallique constituent un des risques majeurs dans le monde actuel. C'est un problème d'actualité qui préoccupe toutes les régions soucieuses de maintenir leur patrimoine côtier à un haut degré de qualité (Ben Bouih et al., 2005). En effet, plusieurs métaux lourds peuvent être très dangereux pour la santé de l'Homme et pour les autres êtres vivants lorsqu'ils sont présents dans l'environnement à des concentrations élevées (Fakayode, 2005). En Afrique, notamment dans le golfe de Guinée,

plusieurs études ont révélé une pollution des sédiments de surface dans l'environnement côtier marin ou dans les lacs et rivières par les métaux lourds sous forte pression industrielle et urbaine (Okoye et al., 1991; Biney et al., 1994a; Biney et al., 1994b; Gnandi et Tobschall, 1999a; Gnandi et Tobschall, 1999b; Horsfall et Spiff, 2001; Fakayode, 2005).

Dans le cycle hydrologique gouvernant le devenir des métaux traces, les sédiments jouent un rôle important dans la mesure où ils constituent des vecteurs et des réservoirs d'un

© 2009 International Formulae Group. All rights reserved.

grand nombre de métaux toxiques (Jouanneau, 1990). En effet, la plupart des polluants déversés dans les eaux marines se retrouvent pour une grande part dans les fonds meubles. Chaque déversement, même fugace, laisse une trace dans les sédiments. Ainsi, l'on a pu dire que les sédiments se comportent comme des indicateurs à mémoire. Ils constituent un biotope privilégié pour rechercher l'état de pollution d'un système aquatique. Les sédiments sont, en outre, le lieu privilégié où se transforme la matière organique et où s'accumulent les éléments traces. Selon Förstner et Wittman (1981) une fraction importante des métaux lourds présents dans les environnements aquatiques est associée d'une manière réversible aux sédiments superficiels. Les modifications des conditions physico-chimiques du milieu peuvent conduire à des remobilisations des métaux associés aux sédiments et présenter par conséquent des risques très élevés pour les organismes vivant dans les écosystèmes lagunaires et pour le prédateur final qu'est l'Homme (Amiard-Triquet, 1989).

La lagune Ebrié n'échappe pas à ce triste constat. En effet, elle joue un rôle socio-économique important dans le développement de la Côte d'Ivoire. Les activités vont de la pêche traditionnelle qui emploie entre 3000 et 4000 pêcheurs à des activités de fabrication des équipements de pêche, au conditionnement du poisson, au transport et au commerce (Scheren et al., 2004). A ces activités, il faut ajouter aussi l'extraction de sable, l'aquaculture et les loisirs. Avec l'ouverture du canal de Vridi et la construction du port, la ville d'Abidjan est devenue le cœur de l'économie ivoirienne. Toute cette dynamique a pour conséquence immédiate un développement imprévu suivi d'une urbanisation anarchique et d'une industrialisation sans considération pour l'environnement (Marchand et Martin, 1985). Malgré la création d'installations et de systèmes de traitement des effluents urbains (Adingra et Arfi, 1998), les déchets domestiques et les effluents industriels polluent les eaux de la lagune avec d'énormes quantités de rejets. La lagune joue donc le rôle d'un réceptacle de tous les rejets souvent sans aucun traitement primaire. Ces effluents sont très souvent d'origine organique et chimique (Scheren et al., 2004). Parmi les substances

chimiques et diffuses rejetées figurent les métaux lourds (Kone et Aka, 1996).

Différentes études ont révélé une détérioration dramatique de la qualité des eaux de la lagune (Métongo et al., 1993; Kouassi et al., 1995; Adingra et Arfi, 1998; Scheren et al., 2004). L'effet de cette pollution sur les sédiments a montré que ceux-ci étaient contaminés par les métaux lourds (Tastet et al., 1984; Marchand et Martin, 1985; Kouadio et Trefry, 1987; Coulibaly et al., 2008). En effet, les travaux de Tastet et al. (1984); Marchand et Martin (1985); Kouadio et Trefry (1987) et Coulibaly et al. (2008) ont révélé une contamination importante des sédiments en métaux (cuivre, zinc, chrome, manganèse). Cependant, ils se sont tous concentrés sur la zone à forte influence urbaine, industrielle et portuaire c'est-à-dire la zone lagunaire d'Abidjan. En dehors des travaux de Coulibaly et al. (2008), les études antérieures ont consisté à une simple évaluation des teneurs en métaux lourds dans les sédiments sans aucun traitement statistique. L'origine de cette pollution métallique reste peu connue et difficile à mettre en évidence à cause du bruit de fond de ces éléments.

Le présent travail vise à évaluer le degré de contamination des sédiments de la lagune Ebrié qui borde le littoral ivoirien sur près de 125 km par la détermination des métaux tels que le chrome, le cuivre, le manganèse et le zinc. Cette étude nous permettra, en outre, de connaître l'origine de la pollution, les zones sensibles et les variables responsables de cette pollution en utilisant l'Index de géo-accumulation de Muller (1979) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Enfin, elle intègre l'évolution de la pollution métallique du système lagunaire Ebrié de 2000 à 2005.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

Le système lagunaire Ebrié

La lagune Ebrié, avec une superficie de 566 km² et un volume moyen estimé à 2,7 10⁹m³, constitue le milieu lagunaire le plus vaste de la Côte d'Ivoire et le plus grand écosystème côtier de l'Afrique de l'Ouest (Guiral et Ferhi, 1989; Scheren et al., 2004). Elle s'étend sur 130 km le long de la façade littorale entre 3°40' et 4°50' longitude Ouest

et de 5°20' et 5°10' latitude Nord, sa largeur n'excède pas 7 km et sa profondeur moyenne est de 4,8m avec quelques fosses profondes dépassant 20 m, dans la zone urbaine d'Abidjan (Varlet, 1978). Elle communique avec l'océan de façon permanente depuis l'ouverture en 1951 du canal de Vridi. Le système lagunaire Ebrié est influencé par les eaux continentales de trois fleuves : à l'Ouest par l'Agnéby et à l'Est par le fleuve Comoé et la Mé.

Zonation

La lagune Ebrié a été divisée en six secteurs sur la seule base des critères morphologiques et hydrobiologiques (Durand et Guiral, 1994) (Figure 1).

La zone I a un caractère fluvial relativement stable. C'est une zone peu profonde, sensible à la marée.

Les secteurs II, III et IV sont sous l'influence marine. Ils sont compris entre l'Agnéby et la Comoé. Ce sont des estuaires, avec une région d'estuaire proprement dite qui est celle d'Abidjan secteur III.

Les zones V et VI, sont stables, peu influencées par les eaux marines et par les apports d'eaux douces.

Hydroclimatologie du système lagunaire

La zone lagunaire appartient à un climat équatorial, influencé par l'air équatorial provenant de l'anticyclone de Sainte-Hélène appelée mousson du Sud-Ouest. Le climat est caractérisé par une saison sèche qui va de janvier à avril et une saison des pluies de mai à août. Selon Durand et Guiral (1994), ce cycle climatique a une incidence directe ou indirecte sur l'écosystème lagunaire. Il influence considérablement la composition chimique de la lagune.

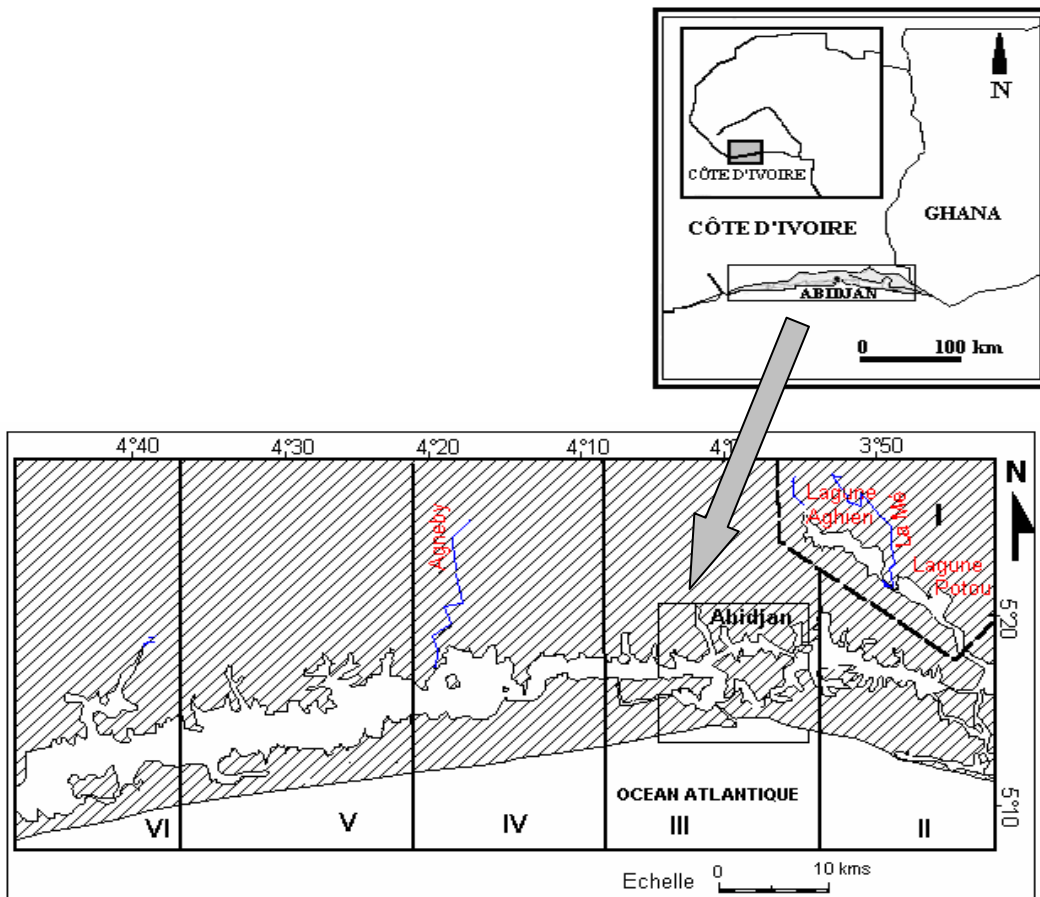


Figure 1: Carte de présentation de la lagune Ebrié.

Le bilan des échanges d'eau entre la lagune et son environnement se chiffre approximativement à 10 milliards de m³ par an en moyenne (Durand et Chantraine, 1982).

Selon Varlet (1978), le volume total des sorties est de l'ordre de 50. 10⁹ m³ environ et celui des entrées transitant par le canal de Vridi de 38. 10⁹ m³. C'est donc un milieu très bien renouvelé depuis l'ouverture du canal de Vridi (Durand et Chantraine, 1982).

Géologie

Le système lagunaire Ebrié correspond à une dépression littorale d'origine fluviale creusée lors des dernières glaciations (Tastet et Guiral, 1994). Il est séparé de l'océan Atlantique par un cordon sableux de 1 à 8 km d'épaisseur.

Le système lagunaire Ebrié est alimenté en sédiments par les fleuves et rivières qui s'y

jetent et par les eaux de ruissellement sur les rives.

C'est environ 0,40.10⁶ tonnes de sédiments qui s'accumulent chaque année dans la lagune, soit une sédimentation moyenne de 0,5 m/an. Ces sédiments sont constitués d'une fraction organique et d'une fraction minérale à granulométrie variable (Tastet, 1979).

Localisation des stations de prélèvements

L'échantillonnage des sédiments de la lagune Ebrié a concerné l'ensemble du système lagunaire avec un maillage plus serré au niveau de la zone urbaine d'Abidjan. Ainsi 32 échantillons ont été prélevés dans la lagune Ebrié en août 2000 dont 5 dans la partie Est, 6 dans la partie Ouest et 21 au niveau de l'agglomération abidjanaise (Figure 2).

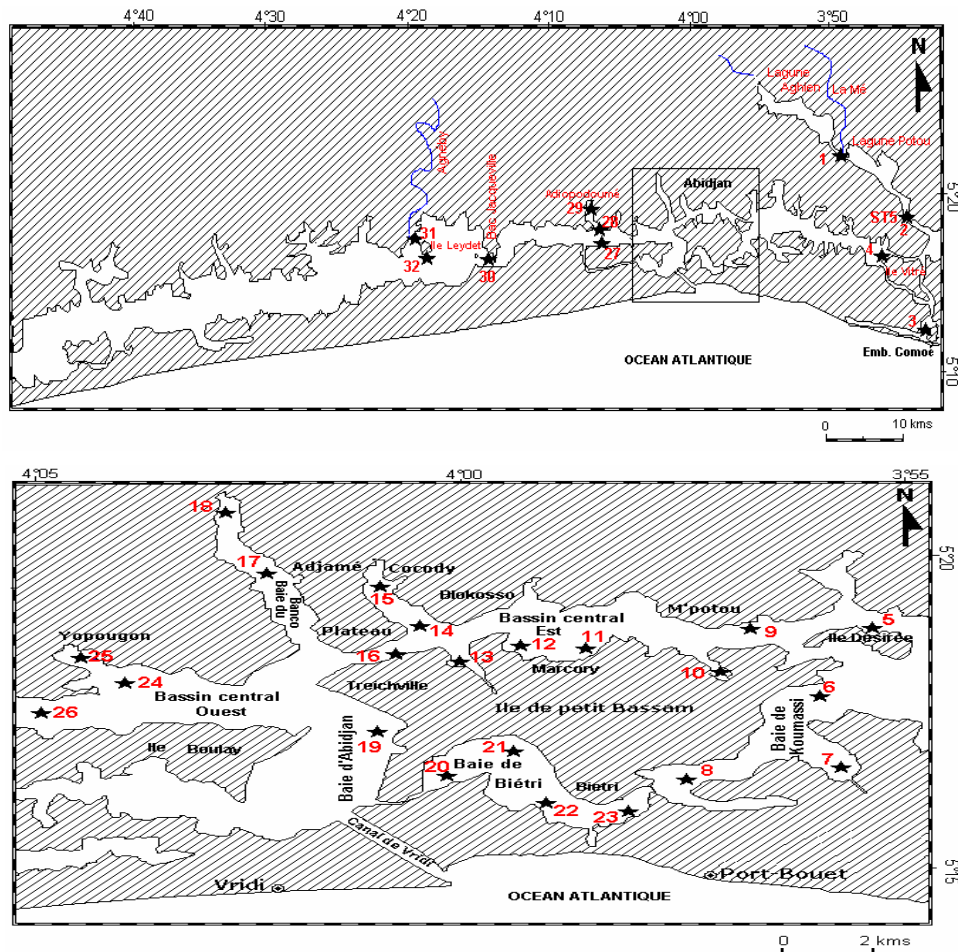


Figure 2 : Carte des sites d'échantillonnage des sédiments de surface de lagune Ebrié.

Echantillonnage des sédiments et des paramètres physico-chimiques

Les échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne Shipeck. Seules les parties de sédiments qui ne sont pas en contact avec la benne sont sélectionnées. Les sédiments collectés sont conditionnés dans des sachets en plastique numérotés identifiant le site de prélèvement. Les échantillons sont conservés dans une glacière pour le transport au laboratoire où ils sont placés à 4 °C au congélateur.

Parallèlement à l'échantillonnage des sédiments, le pH, la température, la salinité, l'oxygène dissous, la transparence et la conductivité de l'eau de lagune ont été mesurées *in situ*. La salinité et la température ont été mesurées avec un Salinomètre de type YSI 33. L'oxygène dissous a été mesuré avec un Oxymètre YSI 58. La mesure du pH est faite avec un pH-mètre de type WTW pH 192. La transparence a été obtenue à l'aide d'un disque de Secchi.

Au laboratoire, après avoir extrait les matériaux grossiers de diamètre supérieur à 2 mm, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 90 °C ou au lyophilisateur jusqu'à poids constant. Ils ont été ensuite broyés à l'aide d'un mortier en agate et tamisés au moyen d'un tamis de maille inférieure à 63 µm. Ces sous-échantillons ont été homogénéisés et conservés dans des flacons en plastique pour une analyse ultérieure.

Méthodes d'analyse

Une partie aliquote de 250 à 500 mg de sédiment a été pesée, transvasée dans des godets en téflon de 35 ml et décomposée à chaud en présence d'un mélange d'acide fluorhydrique (HF 48%) et d'eau régale (HNO₃/HCl concentrés, 1:3 v/v) dans une « bombe » en téflon, sous pression pendant six heures afin d'obtenir une décomposition complète des sédiments (UNEP, 1995). Un matériau certifié de référence (CRM) a été traité de la même manière que les échantillons pour évaluer l'exactitude des résultats. Une fois digérés, les échantillons contenus dans les godets ont été transférés dans des fioles de 100 mL contenant 5,6 g d'acide borique (H₃BO₃) et au moins 20 ml d'eau distillée. Après avoir ajusté au trait de jauge avec l'eau distillée, les solutions ainsi obtenues ont été laissées au repos pendant une nuit avant de

procéder à l'analyse. Les solutions ont été analysées en triplicata à la flamme air-acétylène et aux longueurs d'onde requises pour chaque élément métallique selon les méthodes décrites par UNEP (1995) au moyen d'un spectrophotomètre d'absorption atomique VARIAN 1275 AA.

Méthodes statistiques

Pour l'analyse et l'interprétation de ces résultats, deux méthodes ont été appliquées à savoir l'Index de géo-accumulation de Muller, (1979) qui permet d'estimer la teneur en métaux lourds dans les sédiments.

Une étude des relations d'interdépendance a été réalisée en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (A.C.P) dans le but de connaître les mécanismes d'enrichissement des sédiments de la lagune Ebrié. L'ACP est une technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélation en un nombre réduit de dimension. Ces composantes principales doivent être non corrélées entre elles et de variances décroissantes, de manière à permettre de mieux expliquer les différences entre les individus. C'est un outil de choix en hydrochimie, puisque les paramètres chimiques sont généralement soumis à des variations remarquables aussi bien dans le temps que dans l'espace et que ces variables sont nombreuses pour un échantillon donné. C'est donc une technique d'analyse qui permet de synthétiser et de classer les données. Elle révèle en outre les facteurs qui sont à l'origine de l'évolution des variables et de leurs relations. L'analyse a été effectuée sur une matrice de 32 échantillons (stations) et neuf variables (pH, T (°C), OD, CE, salinité, Cu, Cr, Mn et Zn) avec le logiciel NCSS 6.0.

RESULTATS

Paramètres physico-chimiques

Les statistiques élémentaires des paramètres physiques sont résumées dans le Tableau 1. Ces valeurs bien que ponctuelles, donnent une idée de l'état du milieu lors des prélèvements. La Figure 3 présente les variations spatiales des valeurs moyennes de la salinité, de la conductivité et de l'oxygène dissous mesurés *in situ* au moment des prélèvements des échantillons de sédiments par secteur ou par baie, de la lagune Potou (secteur I) au secteur IV (zone de Jacqueline).

Les valeurs de pH varient en fonction de l'importance des eaux marines et continentales. Les secteurs sous influence marine ont des pH supérieurs à 7 particulièrement dans la zone lagunaire d'Abidjan. Par contre, les secteurs très éloignés du canal de Vridi et donc sous influence continentale ont des valeurs de pH inférieures à 7 (secteurs I et II de la lagune Ebrié). Les valeurs de la salinité sont faibles

en surface sur l'ensemble de la lagune du fait de la pénétration d'eau douce des pluies et de la crue des fleuves côtiers et du Comoé. Les eaux sont oligohalines dans les secteurs I et II. Les baies de Biétry, du Banco, Yopougon et d'Abidjan (Port) plus soumises aux influences marines ont des valeurs de salinité relativement plus élevées. La conductivité suit la même variation que la salinité. Les eaux en surface sont relativement bien oxygénées

Tableau 1: Résumé des statistiques élémentaires des paramètres physiques de la lagune Ebrié en août 2000.

Paramètres	*N	Mini.	Max.	Moyenne	*ESM
pH	32	6,35	8,58	7,37	0,08
T (°C)	32	26	28,6	27,14	0,09
Salinité (‰)	32	0	7	2,93	0,42
OD (mL/L)	32	1,36	10,35	5,71	0,31
CE (µS/cm)	32	70	13 000	4793,75	748,66
Transparence (m)	32	0,2	1,3	0,63	0,06

*ESM (±) : erreur Standard sur la Moyenne ; *N= nombre de données.

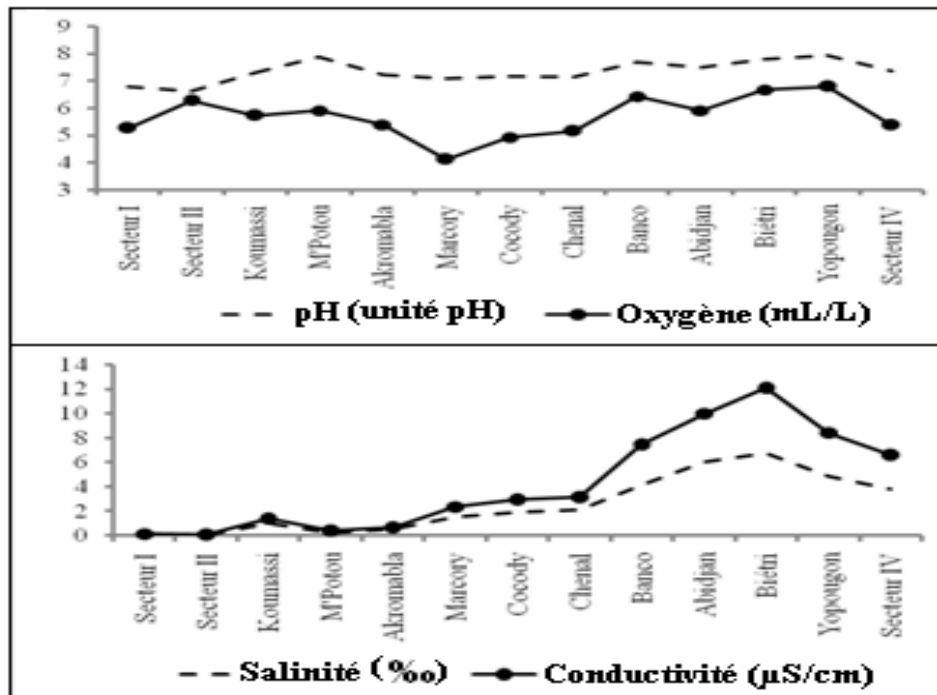


Figure 3: Variations des valeurs du pH (unité pH), de l'oxygène dissous (ml/l), de la salinité (‰) et de la conductivité (µS/cm) dans les baies et secteurs de la lagune Ebrié en août 2000.

au regard de la valeur moyenne (5,71 ml/l). La transparence est très faible dans l'ensemble avec une moyenne de 0,6 m. Cette faible transparence des eaux lagunaires est due à une forte turbidité des eaux au moment des mesures causée par les apports d'eaux de ruissellement et des différents cours d'eau. La température des eaux lagunaires est relativement faible avec une moyenne de 27,4 °C.

Analyse des concentrations des métaux dans les sédiments de la lagune Ebrié

Les concentrations en métaux dans les sédiments de fraction <63 µm sont reportées dans le Tableau 2.

Les Figures 4 à 7 présentent les cartes de répartition spatiale des concentrations en métaux lourds dans les sédiments prélevés dans les différentes. Les concentrations en cuivre sont comprises entre 4,8 et 217,4 mg/kg avec une moyenne de 43,2 ±7,8 mg/kg.

Tableau 2: Concentration (mg/kg) des métaux lourds (sédiments <63µm).

N°	Stations	Cu	Mn	Zn	Cr
1	La ME	18,5	211,1	73,8	48,7
2	ST5	25,0	269,9	86,3	48,6
3	Emb-Comoe	40,2	164,6	93,7	112,4
4	Ile Vitré	5,5	175,2	29,0	15,1
5	Ile Desiré	21,6	313,6	54,9	52,2
6	Koumassi-Djahui	29,0	196,1	90,0	112,6
7	Koumassi-Digue	15,3	154,8	72,0	72,8
8	Baie de Koumassi	41,9	231,5	123,6	90,5
9	Baie de M'Potou	42,9	170,6	106,5	109,9
10	Akromabla	50,9	198,7	210,1	88,9
11	Canal INJS	100,8	213,4	717,3	88,8
12	Baie de Marcory-1	37,9	174,9	170,6	92,0
13	Baie de Marcory-2	217,4	266,4	1052,2	158,8
14	Baie de Cocody-1	46,6	200,6	148,3	143,4
15	Baie de Cocody-2	44,8	198,9	251,0	100,0
16	Palais de la Culture	10,7	159,7	56,5	60,8
17	Baie du Banco-Gbolibana	74,6	162,7	565,4	82,8
18	Baie Banco-Fleuve	20,4	180,1	210,4	106,9
19	Baie d'Abidjan-port	7,5	88,0	21,6	8,2
20	Baie Bietri-SIR	16,6	143,8	95,9	13,2
21	Baie Bietri Abattoir	54,8	132,7	383,9	1618,6
22	Baie Biétri-Blohorn	159,3	171,0	1081,7	181,5
23	Baie Bietri route	67,1	415,0	433,0	82,5
24	Baie de Yopougon-1	53,8	170,6	194,1	157,7
25	Baie de Yopougon-2	9,8	42,3	45,0	46,0
26	Azito	37,7	314,1	140,1	99,3
27	Ile aux serpents	17,9	204,0	81,1	96,7
28	Adiopo-1	36,6	166,4	116,6	145,0
29	Adiopo-2	42,1	164,4	115,4	129,1
30	N'Djem	4,8	148,4	26,5	35,7
31	Emb-Agnéby	9,0	99,2	22,3	35,4
32	Ile Leydet	22,2	211,5	113,1	119,6
	Min	4,8	42,3	21,6	8,2
	Max	217,4	415,0	1081,7	1618,6
	Moyenne	43,2	191,1	218,2	136,0
	* ESM	7,8	12,3	48,3	48,4

*ESM (±)=Erreur Standard sur la Moyenne

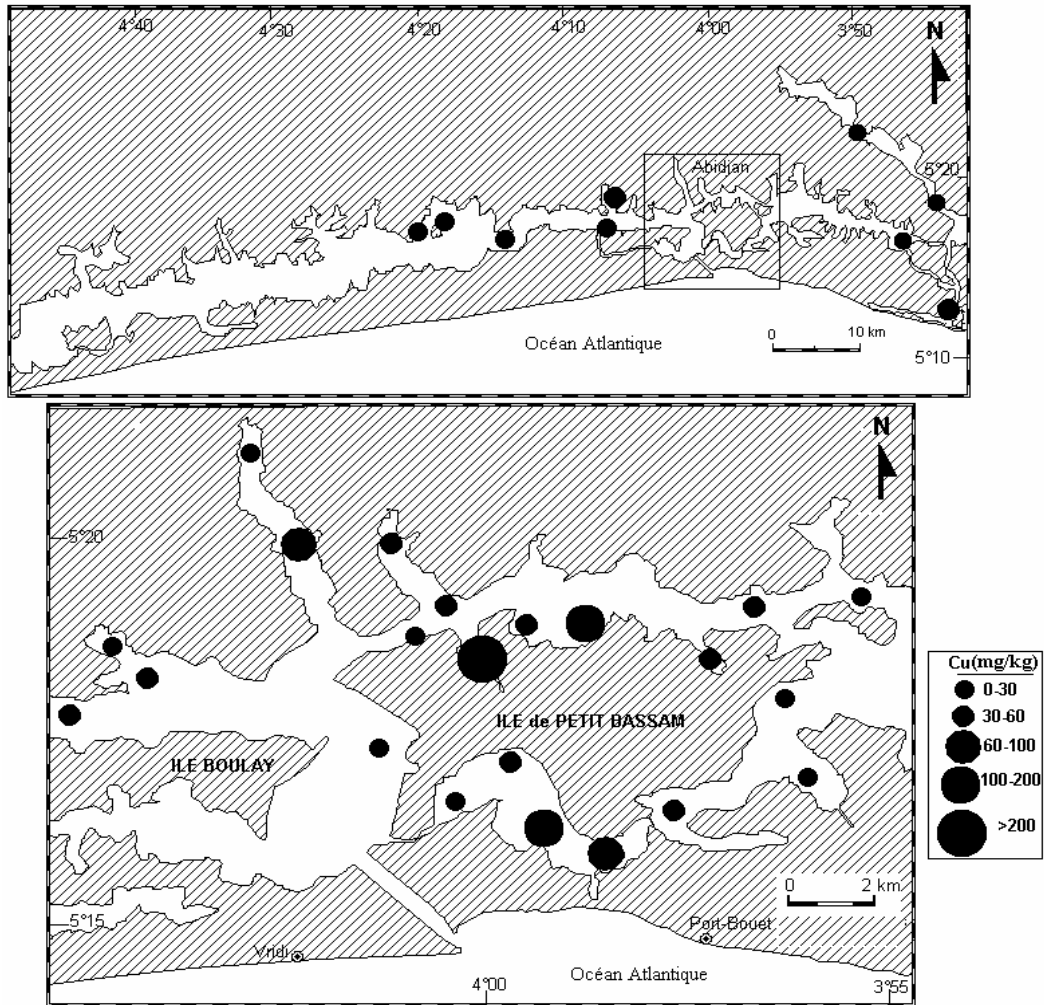


Figure 4: Carte de répartition spatiale du cuivre dans les sédiments des différentes stations (fraction inférieure à 63 µm), en mg/kg.

Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées respectivement à la station 13 (217,4 mg/kg), à la station 22 (159,3 mg/kg) et la station 11 (100,8 mg/kg) (Figure 4). Comme pour le cuivre, les teneurs maximales en zinc ont été enregistrées aux stations 22, 13, 11, 17 et 23 (Figure 7). Il ressort des résultats d'analyse que les concentrations en zinc et cuivre des sédiments sont plus élevées dans la zone lagunaire d'Abidjan que dans les secteurs ruraux de la lagune (zones Est et Ouest de la lagune). Les concentrations en cuivre et en zinc les plus élevées sont observées dans le canal de l'INJS, dans les baies de Marcory, Banco et de Biétry. Quant aux concentrations de manganèse et de

chrome, la distribution spatiale est pratiquement homogène sur toute la lagune (Figures 5 et 6). Toutefois, des valeurs extrêmes ont été relevées dans la baie de Biétry avec 415 mg Mn/kg et avec 1000 mg Cr/kg de sédiment sec au niveau de l'abattoir.

Index de géo-accumulation

Le degré de pollution des sédiments a été estimé par rapport aux normes du RNO français en utilisant l'Index de géo-accumulation de Muller (1979). Le cuivre et le zinc ont été retenus compte tenu de leur toxicité relative dans les écosystèmes lagunaires (Pena et Picot, 1991). Le Tableau 3

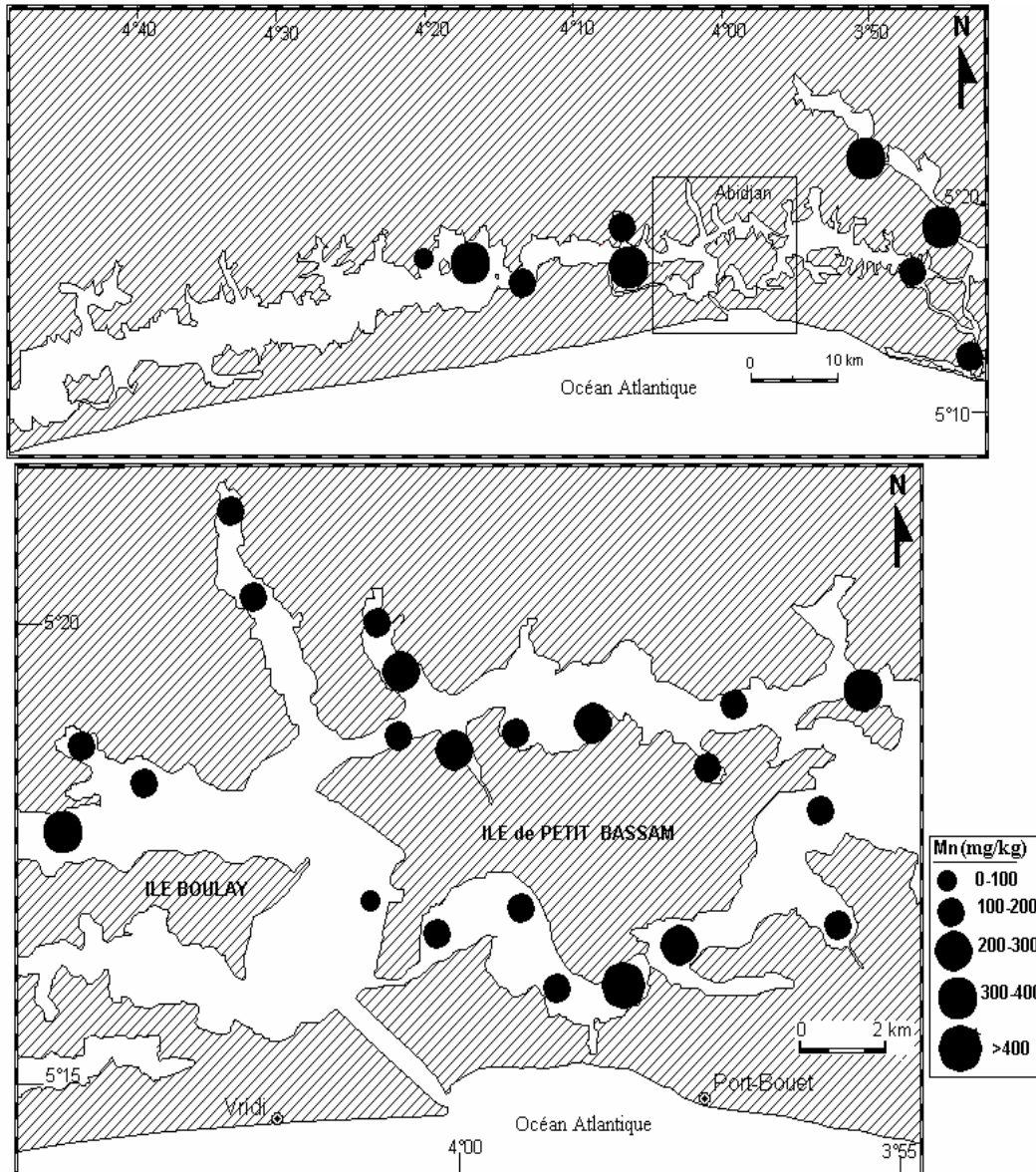


Figure 5: Carte de répartition spatiale du manganèse dans les sédiments des différentes stations (fraction inférieure à 63 µm), en mg/kg.

donne les résultats de l'index de géo-accumulation (I_{geo}) du zinc et du cuivre pour les trente deux (32) stations retenues de même que la nature du sédiment associé. Ces résultats mettent en évidence deux zones principales :

- une zone où $I_{geo} = 0$ correspondant à la classe 0 (pollution pratiquement nulle). Les stations concernées sont pour la plupart concentrées dans les secteurs Est et Ouest de la lagune Ebrié avec quelques stations du

secteur central. Dans cette zone, les sédiments sont de type vaseux, argileux et sableux grossiers ;

- une zone où I_{geo} est compris entre 0 et 1 correspondant à la classe 1 (de zone non polluée à modérément polluée). Les stations concernées sont toutes localisées dans la partie centrale de la lagune, notamment dans les baies de Biétry, de Banco et de Marcory. Dans ces différentes baies, les sédiments sont de nature vaseuse.

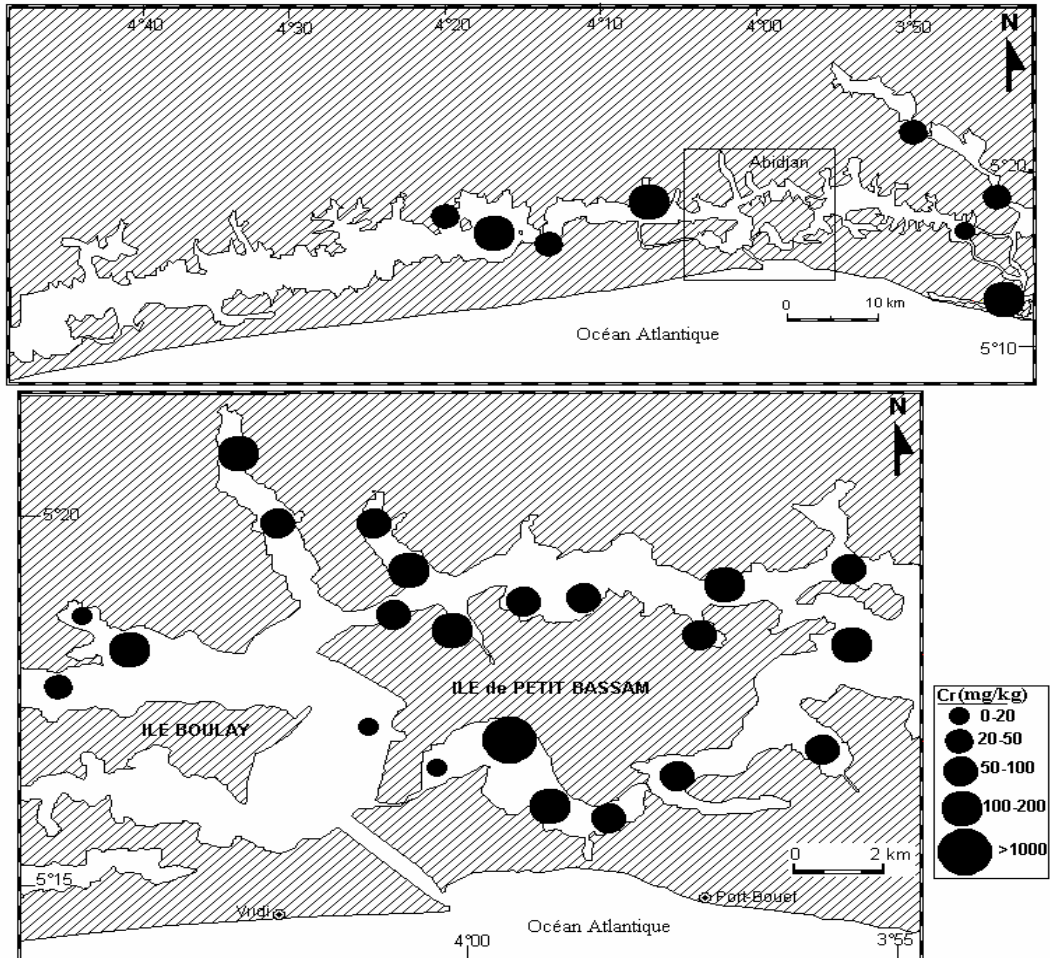


Figure 6: Carte de répartition spatiale du chrome dans les sédiments des différentes stations (fraction inférieure à 63 µm), mg/kg.

Dans tous les sédiments analysés, les concentrations des métaux ont une grande dépendance vis-à-vis de la granulométrie du sédiment. Les teneurs en cuivre et en zinc augmentent lorsque la taille des grains évolue vers la fraction fine (vases), alors que celles du chrome et du manganèse augmentent lorsqu'on évolue vers la fraction grossière.

Analyse en Composantes Principales (A.C.P.)

La matrice de corrélation est donnée par le Tableau 4. A l'analyse de cette matrice de corrélation, on relève notamment une très bonne corrélation entre le cuivre et le zinc ($r=0,950$), entre la conductivité et la salinité ($r=0,919$). Ces corrélations sont très significatives et témoignent de l'affinité entre

ces deux éléments. Par contre, la corrélation entre la conductivité et le pH ($r = 0,578$) n'est pas très nette. Ce constat est également valable entre le pH et la salinité ($r = 0,578$).

Le pourcentage de variance exprimée par chaque facteur est donné par le Tableau 5. Ces valeurs donnent la contribution de chaque facteur au nuage de points. Les 4 premiers facteurs expriment 86,6% de la variance exprimée dont 34,32% pour F1, 27,49% pour F2, 13,6% pour F3 et 11,2% pour F4. Le facteur I est très important par rapport aux autres facteurs et le plan factoriel (F1-F2) exprime 61,81% de la variance totale du nuage de points. La représentation des données dans le plan (1-2) rend compte de manière assez satisfaisante de la proximité des éléments.

Tableau 3: Valeurs de l'Index de géo-accumulation du cuivre et du zinc et type de sédiment de la lagune Ebrié en 2000.

N°	Station	Indice géo-accumulation		Type de sédiment
		Cuivre	Zinc	
1	La ME	0	0	argileux
2	ST5	0	0	sable grossier
3	Embouchure-Comoe	0	0	vaseux
4	Ile Vitré	0	0	sable grossier
5	Ile Désiré	0	0	vaseux
6	Koumassi-Djahui	0	0	vaseux
7	Koumassi-Digue	0	0	vaseux
8	Baie de Koumassi-8	0	0	vaseux
9	Baie de M'Potou	0	0	vaseux
10	Akromabla	0,1	0	vaseux
11	Canal INJS	0,4	0,5	vaseux
12	Baie de Marcory-1	0	0	vaseux
13	Baie de Marcory-2	0,7	0,6	vaseux
14	Baie de Cocody-1	0	0	vaseux
15	Baie de Cocody-2	0	0	vaseux
16	Palais de la Culture	0	0	vaseux
17	Baie du Banco-Boribana	0,2	0,4	vaseux
18	Baie Banco-Fleuve	0	0	vaseux
19	Baie d'Abidjan-port	0	0	sable grossier
20	Baie Bietri-SIR	0	0	vaseux
21	Baie Bietri Abattoir	0,1	0,2	vaseux
22	Baie Biétri-Blohorn	0,5	0,7	vaseux
23	Baie Bietri route	0,2	0,3	vaseux
24	Yopougon-1	0,1	0	vaseux
25	Yopougon-2	0	0	vaseux
26	Azito	0	0	vaseux
27	Ile aux serpents	0	0	sable grossier
28	Adiopodoumé-1	0	0	vaseux
29	Adiopodoumé-2	0	0	vaseux
30	N'Djem	0	0	sable grossier
31	Embouchure-Agnéby	0	0	sable grossier
32	Ile Leydet	0	0	vaseux

Tableau 4 : Matrice de corrélation des paramètres physiques et chimiques.

	Cu	Mn	Zn	Cr	T (°C)	Salinité	O.D.	CE	pH
Cu	1,000								
Mn	0,286	1,000							
Zn	0,950	0,232	1,000						
Cr	0,148	-0,118	0,194	1,000					
T (°C)	0,043	0,143	0,172	0,442	1,000				
Salinité	0,114	-0,108	0,233	0,249	0,267	1,000			
O.D.	-0,496	0,104	-0,449	0,253	0,282	0,203	1,000		
CE	0,164	0,005	0,283	0,301	0,350	0,919	0,230	1,000	
pH	-0,180	-0,312	-0,093	0,458	0,382	0,578	0,473	0,578	1,000

Tableau 5: Valeurs propres et pourcentage des variances exprimées par les facteurs.

	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	3,09	2,47	1,22	1,01
% Variance exprimée	34,32	27,49	13,6	11,2
% Variance exprimée cumulée	34,32	61,81	75,4	86,6

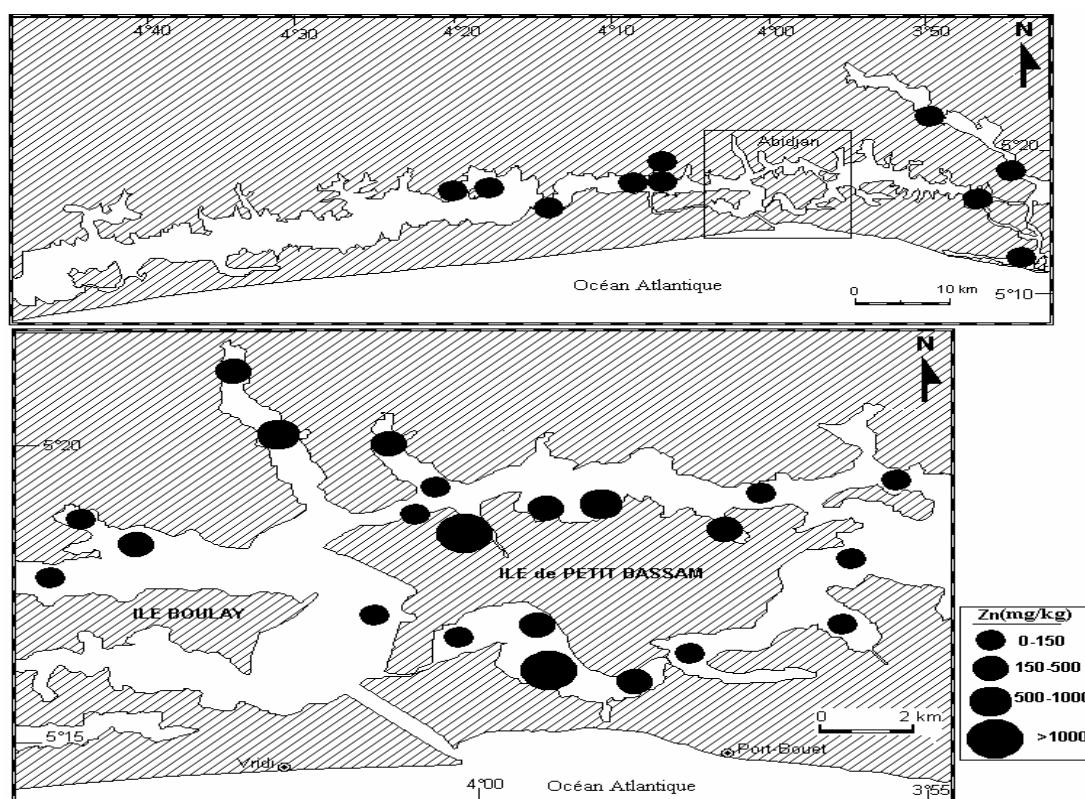


Figure 7: Carte de répartition spatiale du zinc dans les sédiments des différentes stations (fraction inférieure à 63 µm) mg/kg.

Espace des variables

Le facteur I est déterminé par la conductivité électrique (CE), la salinité, Température, le chrome (Cr) et le pH, les coefficients de corrélation entre ces différentes variables suggérant donc une évolution commune (Figure 8). La présence du chrome dans les sédiments est étroitement liée au pH, à la conductivité, à la salinité et à la température. La prédominance de la salinité et de la conductivité sur les autres éléments

est à relever. La bonne corrélation qui existe entre la salinité et la conductivité en témoigne ($r = 0,919$) (Tableau 4). Le facteur F1 explique de ce fait un phénomène de forte minéralisation des eaux lagunaires dû à une intrusion des eaux marines dans celles-ci.

Quant au facteur II, il est déterminé par le zinc et le cuivre très proches de la périphérie du cercle de communauté rendant ainsi compte de la bonne corrélation qui existe entre ces deux éléments métalliques. Ces deux

éléments sont des indicateurs d'un apport anthropique de métaux lourds issus des activités humaines. En effet, selon Forstner et Wittman (1981), ces deux éléments sont de bons indicateurs de pollution anthropogène liés aux activités industrielles et urbaines. Or la lagune Ebrié reçoit d'énormes quantités d'eaux usées de la ville d'Abidjan notamment le lessivage des ordures ménagères incontrôlées au bord de la lagune. De ce fait, le facteur F2 est donc appelé facteur origine anthropique des métaux dans les sédiments.

L'oxygène dissous (O.D.) est influencé par les facteurs F1 et F2 dans une moindre mesure. Les autres variables sont concentrés

au voisinage de l'origine, ils ne sont donc pas corrélés avec ces facteurs. Cela veut dire que l'information contenue dans ces deux points n'est pas accessible à ces deux facteurs.

Le facteur III est déterminé par le manganèse (Figure 9). La corrélation négative existant entre le facteur F3 et le manganèse rend compte d'un processus inverse à l'origine de la présence de cet élément dans les sédiments. Le manganèse est généralement lié à la nature géochimique des sédiments. En outre, le fait que de fortes teneurs de cet élément soient trouvées dans les sédiments de sites géographiquement éloignés de l'influence industrielle et urbaine permet

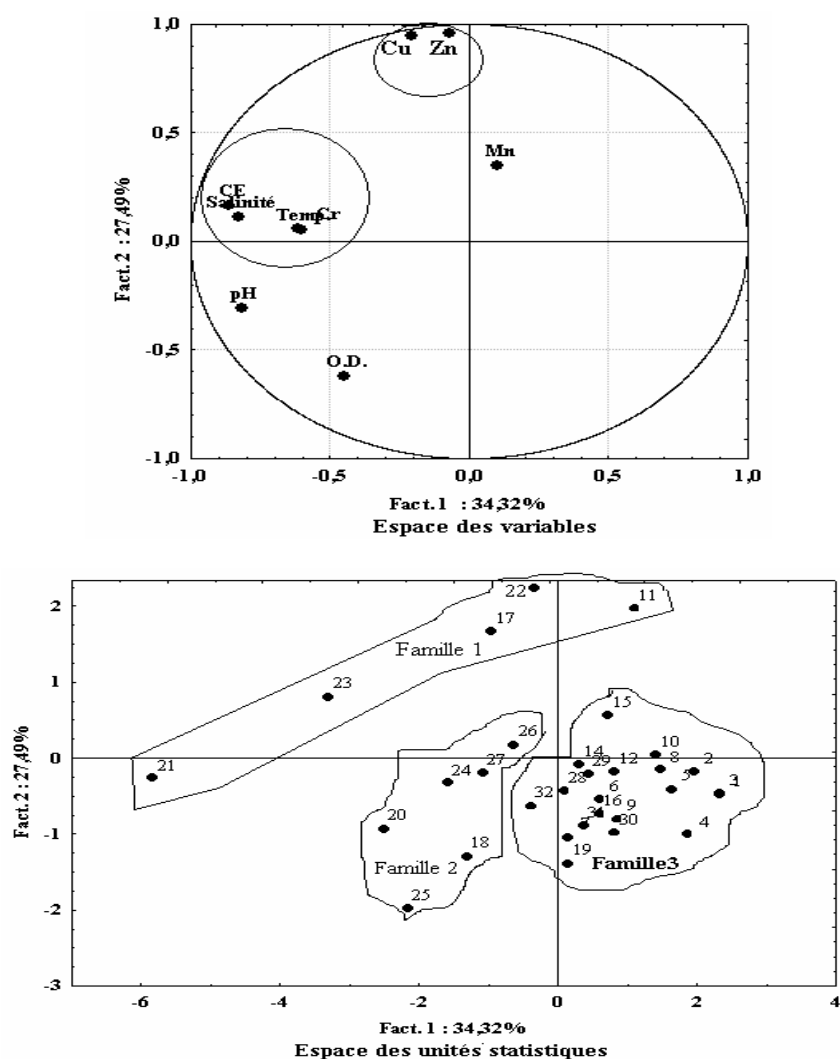


Figure 8 : Analyse en Composantes principales dans le plan factoriel F1-F2 (espace des variables et des unités statistiques).

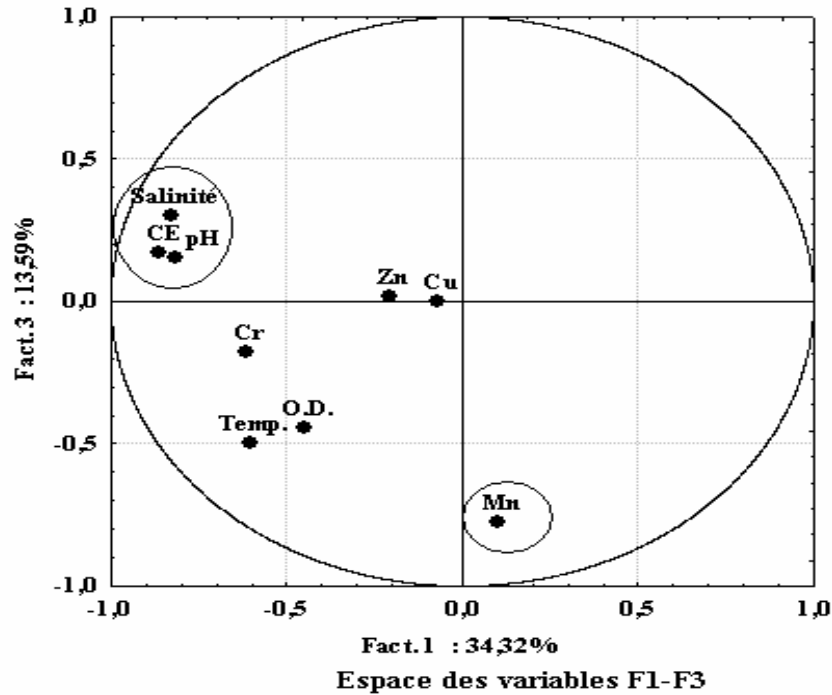


Figure 9 : Analyse en composantes principales dans le plan factoriel F1-F3 de l'espace des variables.

d'affirmer que cet élément ne semble pas lié seulement aux rejets anthropiques et industriels. Ces fortes concentrations seraient probablement dues au lessivage et au ruissellement des sols, avoisinant la lagune, riches en manganèse. Dans ce cas, le facteur F3 est le facteur d'origine naturelle des métaux dans les sédiments.

Espace des unités statistiques

Dans le plan factoriel I-II, trois familles d'unités statistiques se distinguent (Figure 8). La première Famille est représentée par les unités statistiques 11,17, 21, 22 et 23 des baies de Marcory, de Biétry, du Banco et du canal INJS. Toutes ces stations sont caractérisées par de très fortes teneurs en zinc (>600 mg/kg de sédiment sec) et en cuivre (>100 mg/kg de sédiment sec). La seconde Famille, quant à elle, regroupe les unités statistiques 18, 20 ; 24, 25, 26 et 27 de la zone lagunaire d'Abidjan et particulièrement de la baie de Biétry, qui sont caractérisées par une forte minéralisation, avec des valeurs de salinité et de conductivité élevées. La troisième famille regroupe toutes les unités statistiques qui n'interviennent pas dans la définition des deux

axes principaux et ayant des teneurs en métaux faibles.

Evolution des métaux lourds dans les sédiments de 2000 à 2005

Les résultats de cette étude ont pu être actualisés avec ceux obtenus par Coulibaly et al. (2008) en 2005 (Tableau 6). Les résultats de ces auteurs portent uniquement sur la zone urbanisée de la lagune Ebrié, c'est-à-dire celle qui est concentrée au niveau de la ville d'Abidjan. Cependant, nous pouvons faire les constats suivants :

- au niveau des concentrations en cuivre et en zinc, en 2005, celles-ci ont subi une diminution mais ces différentes diminutions ne sont pas très significatives puisque les valeurs moyennes sont toujours dans le même ordre de grandeur que celles de 2000 ;
- au niveau des teneurs en manganèse, on remarque une évolution graduelle des teneurs dans le temps. En effet, la valeur moyenne du manganèse est passée de $390,32 \pm 48,3$ mg/kg en 2000 à $540 \pm 187,1$ mg/kg en 2005 avec une valeur maximale de 6452 mg/kg contre

540 mg/kg ; il en est de même pour la valeur minimale ;

- au niveau du chrome, on constate une diminution de la moyenne qui est passée de 224,87±48,4 mg/kg à 190,9±28 mg/kg. Le seul constat à faire ici est l'augmentation de la valeur minimale.

En somme, on constate qu'en dehors du manganèse qui a subi une forte évolution dans le temps, les autres métaux ont une tendance à la diminution. Le niveau de la pollution de la lagune Ebrié a évalué en comparant les teneurs moyennes des métaux avec celles de certains écosystèmes aquatiques africains du golfe de Guinée (Tableau 7).

DISCUSSION

Les paramètres physico-chimiques de la lagune Ebrié, et partout ailleurs, sont conditionnés par la prédominance des entrées et des sorties des eaux d'origine continentale et marine et donc fonction des variations saisonnières. Les secteurs de la lagune

fortement soumis aux influences des apports marines ont de fortes valeurs de salinité, de pH et de conductivité par rapport à ceux qui sont soumis aux apports d'eaux continentales lors des crues des fleuves et rivières côtiers. Le pH varie en fonction de l'importance des eaux marines et continentales. Il est de ce fait lié à la salinité ($r=0,578$). Le caractère basique du pH à certaines stations (baie de Biétri et de Yopougon) pourrait être dû à l'influence des eaux marines basiques qui entrent dans les deux baies par le biais du canal de Vridi. En effet, on note que les stations éloignées de l'influence marine et qui reçoivent des eaux continentales ont des pH avoisinant la neutralité. La salinité et le pH sont donc contrôlés par l'influence relative des eaux continentales et des précipitations d'une part et des eaux océaniques d'autre part. Selon Durand et Guiral (1994), ceci est dû à un renouvellement constant des eaux dans cette partie par le canal de Vridi.

Tableau 6: Evolution temporelle des teneurs en cuivre, zinc, manganèse et chrome dans les sédiments de 2000-2005 dans la lagune Ebrié.

	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Années
Min	4,81	21,6	42,26	8,16	2000
Max	217,37	1081,7	540	1618,61	
Moyenne	54,54	278,93	390,32	224,87	N = 32
*ESM	7,8	12,3	48,3	48,4	
Min	31,7	89,99	151,16	65,08	2005
Max	113,2	515	6452	1012	Coulibaly et al. (2008)
Moyenne	62,7	244	540	190,9	N= 33
*ESM	4,3	19,7	187,1	28	

*ESM (\pm) = Erreur Standard sur la Moyenne ; N : nombre total d'échantillons.

Tableau 7 : Concentrations moyennes de métaux dans les sédiments marins et côtiers africains (mg/kg).

GOLFE DE GUINEE	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Références
Lagune Ebrié (2000), Côte d'Ivoire	54,54	278,93	/
Lagune Ebrié (2005), Côte d'Ivoire	62,70	244,00	Coulibaly et al. (2008)
Lagune de Lagos, Nigeria	15,00	147,00	Okoye et al. (1991)
Côte maritime du Togo	22-184	60-632	Gnandi et al. (1999a)

La conductivité rend compte de la minéralisation des eaux. Tout comme la salinité, elle varie en fonction des apports océaniques et continentaux. Les valeurs de conductivité sont élevées dans les secteurs sous influence marine (baie de Biétri, de Yopougon, du Banco, îles aux serpents). Cette augmentation n'est pas seulement d'origine marine. En effet, selon Ben Bouih et al. (2005), les divers rejets domestiques et industriels sont généralement riches en ions monovalents et divalents qui contribuent à élever la conductivité des eaux. Or ces différentes baies sont soumises aux déversements quotidiens des effluents urbains et industriels. De ce fait, les fortes valeurs de conductivités pourraient aussi avoir une origine anthropique.

L'oxygène dissous des eaux de la lagune est dû aux apports des eaux douces, des précipitations, des eaux marines et de la production du phytoplancton *in situ*. La pollution de la lagune par les activités domestiques, industrielles et agricoles dans le bassin versant et les environs tend à asphyxier le milieu lagunaire. En effet, selon Scheren et al. (2004), les polluants industriels et domestiques déversés dans la lagune sont en majorité des effluents d'origine organique, d'où une forte demande biologique en oxygène. Cet état de fait a pour conséquence une asphyxie du milieu due à une insuffisance d'oxygène. Les paramètres physico-chimiques sont donc soumis à une forte variabilité qui est liée aux entrées et sorties des eaux marines et continentales dans le système lagunaire. Cette variation des paramètres physico-chimiques conditionne la précipitation de certains métaux tels que le cuivre et le zinc qui s'incorporent plus tard aux sédiments pour en accroître son niveau de pollution.

L'Analyse en Composantes Principales et l'Index de géo-accumulation ont permis de distinguer deux principaux secteurs de la lagune. Le premier secteur concerne la partie Ouest et Est de la lagune où l'Index de géo-accumulation est nul pour le cuivre et le zinc et où les autres éléments métalliques semblent plutôt liés à la nature géochimique des sédiments qu'à un apport exogène. Le second secteur se réfère à la partie centrale de la lagune où l'Index de géo-accumulation est compris entre 0 et 1 pour le cuivre et le zinc témoignant d'une pollution modérée.

Les concentrations en métaux lourds des sédiments sont, d'une manière générale, hétérogènes et varient selon le métal, le site et le type de sédiment. Nos résultats indiquent que le chrome, le cuivre et le zinc ont des teneurs plus élevées dans les sédiments vaseux et fins que dans les sables grossiers (Canal INJS, Baie de Marcory-2, Baie du Banco-Boribana, Baie de Biétri-Abattoir, Biétri-Blohorn, Biétri-route), à l'exception du manganèse. En général, il a été montré que les métaux sont essentiellement liés à la phase organique et argileuse des sédiments (Bloom et Ayling, 1977; Martin et Meybeck, 1979). Plus le sédiment est fin, plus il est riche en métaux traces (Amstrong et al., 1976; Loring, 1976). Gnandi et Tobschall (1999a) ont montré que les concentrations en Cr, Cu, Ni et Zn augmentent lorsque la taille des grains diminue dans les sédiments marins de la côte togolaise. Ce résultat vient corroborer les études antérieures stipulant que les métaux s'associent de préférence à la fraction la plus fine du sédiment (Solodov et al., 1998; Coulibaly et al., 2008). Le piégeage des métaux lourds au niveau des sédiments fins pourrait poser un problème écotoxicologique à plus ou moins long terme pour la vie aquatique. En effet, le piégeage de ces métaux dans les sédiments n'est pas forcément irréversible. Selon François et al. (2002), il existe des risques de rémobilité et de leur absorption par les organismes vivants lorsque les conditions physico-chimiques le permettent.

Les sédiments des baies de la zone lagunaire d'Abidjan, sujettes à des pressions industrielles et domestiques, présentent des concentrations en cuivre, zinc et en chrome plus élevées que ceux des secteurs Ouest et Est de la lagune Ebrié ; ceci est confirmé par l'Index de géo-accumulation du cuivre et du zinc et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Certaines concentrations en métaux des sédiments dépassent les valeurs considérées comme anormales et les teneurs « naturelles » estimées par Rapin et Fernex (1981) et le RNO français (1981) notamment dans les baies de Biétry, de Marcory, Banco et Cocody. Ces valeurs anormales peuvent être affectées à la charge polluante apportée par les différents rejets issus des activités industrielles, agricoles, portuaires, domestiques et artisanales. Les travaux de Scheren et al.

(2004) et de Yao et al. (2007) ont montré que toutes ces baies sont caractérisées par une pollution à dominante organique et chimique. La surcharge en zinc par rapport au cuivre est le résultat du déversement des eaux usées issues des quartiers qui bordent ces baies notamment le lessivage des ordures ménagères incontrôlées. Selon Rousseaux et al. (1991), le zinc forme 44 à 47% des piles et accumulateurs, 12 à 13% des produits ferreux protégés par le zinc contre la corrosion, 11 à 13% des caoutchoucs, 8 à 9% des papiers cartons, etc. Les sols cultivés dans le bassin versant de la lagune peuvent contribuer dans l'apport en zinc des sédiments. En effet, Mermut et al. (1996) ont montré que les fertilisants à base azotée-phosphatée peuvent contenir jusqu'à 83,3 mg de Zn par kg de fertilisants. Les résidus de fertilisants issus des plantations villageoises et industrielles qui ceignent la ville d'Abidjan pourraient donc enrichir les sédiments en zinc par les phénomènes du pluiolessivage et du ruissellement. Les fortes teneurs en zinc dans les sédiments seraient donc le fait des activités humaines. La bonne corrélation entre le cuivre et le zinc témoigne d'une origine commune de ces deux éléments. Le cuivre et le zinc font partie des principaux micropolluants des écosystèmes lagunaires, provenant essentiellement des activités agricoles, industrielles et portuaires (Henry et al., 1989; Pena et Picot, 1991). Forstner et Wittman (1981) les considèrent à juste titre, comme de bons indicateurs de pollution d'origine anthropogénique.

Nos résultats confirment ceux de Gnandi et Tobschall (1999a) dans les sédiments marins côtiers du Togo, de Rubio et al. (2000) en Espagne, de Liu et al. (2003) dans la rivière estuarienne de Pearl, de Ben Bouih et al. (2005) dans le lac de Fouarat (Maroc).

Pour le manganèse, les concentrations sont pratiquement homogènes aussi bien dans la zone lagunaire urbaine d'Abidjan que dans les secteurs Ouest et Est de la lagune relativement moins soumis aux influences urbaines et industrielles ; ce qui suggère que les concentrations en manganèse sont plutôt liées à la nature géochimique des sédiments et des sols drainés par les eaux de ruissellement qu'aux apports de nature anthropogénique. Ces résultats confirment ceux de Marchand et

Martin (1985), de Kouadio et Trefry (1987) et de Ben Bouih et al. (2005).

Pour le chrome, on observe des valeurs très élevées dans les sédiments collectés aussi bien dans les secteurs en dehors de l'agglomération d'Abidjan que dans ceux des zones sous influence industrielle et urbaine. Toutefois, les valeurs les plus élevées sont relevées dans la zone lagunaire d'Abidjan qui reçoit des effluents urbains, industriels ou artisanaux notamment dans la baie de Biétry. Les activités de l'abattoir, de la SIR, de Unilever et des tanneries artisanales rejettent les eaux usées dans la baie. L'estimation de la charge polluante de ces rejets révèle que les industries agroalimentaires et textiles sont les sources dominantes de pollution industrielle, et par conséquent les plus polluantes (Kouassi et al., 1995). Ces eaux usées sont composées surtout de substances toxiques (soude, acides, huiles minérales, pigments des industries textiles, carburants, peintures, pesticides, glycérine des savonneries), arsenic et métaux lourds (chrome, plomb, zinc...) provenant des ateliers métallurgiques, de raffineries et de tannage de peaux artisanales.

L'étude comparative des résultats de notre étude pour les quatre métaux (Cu, Zn, Cr, Mn) a pu être effectuée avec ceux de Coulibaly et al. (2008). Le fait qu'il n'y ait pas d'augmentation pour le cuivre, le zinc et le chrome peut évoquer deux hypothèses. La méthode d'analyse et la limite de détection des appareils pourraient en être la cause. Cependant, il convient de noter qu'il n'y a pas de grande différence entre les deux résultats. Par contre pour le manganèse, les fortes augmentations observées au niveau de cet élément seraient sans doute dues à une érosion intense des terres qui entraînerait par lessivage et ruissellement les produits issus de l'altération chimique et de la désagrégation physique des matériaux du continent.

L'influence de l'urbanisation, l'industrialisation et de l'évolution démographique est certaine pour les concentrations métalliques observées dans cette étude.

L'évaluation de l'état de la pollution des sédiments de la lagune Ebrié par comparaison avec d'autres écosystèmes subissant la même influence anthropique montre que la lagune de Lagos est la moins polluée et que la côte maritime du Togo semble être l'écosystème le plus contaminé.

Le niveau de pollution de la lagune Ebrié est proche de celui de la côte togolaise. Selon Pena et Picot (1991), la classification des sédiments contaminés ou pas en zone côtière : baies ou lagunes se fait en fonction du niveau d'urbanisation et d'industrialisation du bassin versant.

Conclusion

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis de faire une évaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments de la lagune Ebrié. L'analyse physico-chimique des eaux de la lagune, a montré que celles-ci sont soumises à l'influence marine et continentale. Les variations de ces paramètres agissent sur la précipitation des métaux dans les sédiments. Nous avons, par ailleurs noté, que les sédiments sont en majorité constitués de vase avec quelques échantillons de sable grossier et d'argile. Les concentrations en métaux déterminées dans les sédiments vaseux sont supérieures à celles des autres types de sédiment particulièrement pour le cuivre, le zinc et le chrome. Ces différents éléments métalliques apparaissent comme des traceurs d'une pollution anthropique. En outre, nous pouvons retenir que la pollution des sédiments n'est pas très alarmante étant donné qu'aucun index de géo-accumulation calculé ne dépasse 1. Cependant, les valeurs obtenues au niveau de la partie centrale semblent témoigner d'une contamination des sédiments par le cuivre et le zinc. L'Index de géo-accumulation et l'ACP ont permis de distinguer deux principaux secteurs dans la lagune Ebrié. Le premier secteur concerne la partie Est et Ouest, où l'index de géo-accumulation est nul pour le cuivre et le zinc. Le second secteur correspond à la partie centrale où l'on rencontre de fortes teneurs en métal lourd, avec un index de géo-accumulation compris entre 0 et 1 pour le cuivre et le zinc, témoignant d'une zone modérément polluée. Cette partie centrale constitue la zone la plus exposée aux différents effluents domestiques, industriels et portuaires de la lagune. Il ressort en outre de cette étude que les sédiments prélevés dans les baies (Banco, Biétry, Cocody et Marcory) sont les plus contaminés par ces éléments métalliques.

Les concentrations en zinc, cuivre et chrome trouvés dans les sédiments sont

légèrement supérieures aux concentrations relevées par certains auteurs. L'impact de l'industrialisation, de l'urbanisation et le lessivage des sols environnants est à la base de l'enrichissement des sédiments de la lagune Ebrié en métaux lourds.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Dr. ABE Jacques anciennement responsable du Département environnement du Centre de Recherche Océanologique, ainsi que tous les techniciens qui nous ont aidés lors de la campagne d'échantillonnage et des analyses au laboratoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adingra AA, Arfi R. 1998. Organic and bacterial pollution in the Ebrié lagoon, Côte d'Ivoire. *Mar. Pollut. Bull.*, **36**(9): 689-695.
- Amiard-Triquet C. 1989. Bioaccumulation et nocivité relatives de quelques polluants métalliques à l'égard des espèces marines. *Bull. Ecol.*, **20**(2): 129-151.
- Armstrong PB, Hanson GM, Gaudette HE. 1976. Minor elements in sediment of Great Bay Estuary, New Hampshire. *Environ. Geol.*, **1**: 207-214.
- Ben Bouih H, Nassali H, Leblans M, Shiri A. 2005. Contamination en métaux traces des sédiments du lac Fouarat (Maroc). *Afrique Science*, **1**(1) :109-125.
- Biney C, Amuzu AT, Calamari D, Kaba N, Mbome IL, Naeve H, Ochumba PBO, Osibanjo O, Radegonde V, Saad MAH. 1994a. Review of heavy metals in the african aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **28**: 134-159.
- Biney CA, Calamari D, Naeve H, Maembe TW, Nyakageni B, Saad MAH. 1994b. Scientific basis for pollution control. *FAO (CIFA) Tech. Paper*, **25**: 7-20.
- Bloom H, Ayling GM. 1977. Heavy metals in the Derwent Estuary. *Environ. Geol.*, **2**: 3-22.
- Coulibaly AS, Monde S, Wognin VA, Aka K. 2008. State of antropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal traces. *Eur. J. of Sci. Res.* **19**(2): 371-390.
- Durand JR, Chantraine JM. 1982. L'environnement climatique des lagunes

- ivoiriennes. *Revue Hydrobiologie Tropicale*, **15**(2): 85-116.
- Durand JR, Guiral D. 1994. Hydroclimat et hydrochimie. In *Environnement et Ressources Aquatiques* de Côte d'Ivoire. Tome II, Milieux lagunaires. Editions de l'ORSTOM; 59-90.
- Fakayode SO. 2005. Impact assessment of industrial effluent on water quality of the receiving Alaro River in Ibadan, Nigeria. *AJEAM-RAGEE*, **10**: 1-13.
- Forstner U, Wittman GTW. 1981. *Metal pollution in the Aquatic Environment* (2nd edn). Springer-Verlag: Berlin; 486.
- François M, Li D, Dubourguier HC, Douay F. 2002. Facteurs déterminants de la mobilité des métaux (Pb, Cd et Zn) dans les sols contaminés autour de deux usines métallurgiques du Nord de la France. Journées Nationales de l'Etude des sols, 22-24 octobre 2002, Orléans.
- Gnandi K, Tobschall HJ. 1999a. The pollution of marine sediments by trace elements in the coastal region of Togo caused by dumping of cadmium-rich phosphorite tailing into the sea. *Environmental Geology*, **38**(1): 13-24.
- Gnandi K, Tobschall HJ. 1999b. Heavy metal release from phosphorite tailings into seawater: a simulated laboratory study. *The Science of the Total Environment*, **236**(1-3): 181-190.
- Guiral D, Ferhi A. 1989. Caractérisation ionique et isotopique d'un système hydrologique tropical: la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Oceanologica Acta*, **12**(1): 47-55.
- Henry JL, Mac Gibbon, Davis S, Mackay GRM, Moldan GS. 1989. Heavy metals, carbon, and hydrocarbons in sediment of table Bay Harbour. Special report. Republic of South Africa. Department of Environment Affairs. SEA Fisheries Research Institute, 1-26.
- Horsfall MJr, Spiff AI. 2001. Distribution and partitioning of trace metals in sediments of the lower reaches of the New Calabar River, Port Harcourt, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, **78**: 309-326.
- Jouanneau JM. 1990. Evaluation des pollutions métalliques dans les sédiments. *Oceanis*, **16**(4): 277-286.
- Koné M, Aka K. 1996. Les lagunes d'Abidjan asphyxiées par la pollution. *Africa Geoscience Review*, **3**(3-4): 461-470.
- Kouadio I, Trefry JH. 1987. Sediment trace metals contamination in Ivory Coast, West Africa. *Water Air Soil Pollution*, **32**: 145-154.
- Kouassi AM, Kaba N, Métongo BS. 1995. Land-based sources of pollution and environmental quality of the Ebrié lagoon waters. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**(5): 295-300.
- Liu WX, Li XD, Shen ZG, Wang DC, Wai O WH, Li YS. 2003. Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary. *Environmental Pollution*, **121**(3): 377-388.
- Loring DH. 1976. The distribution and partition of zinc, copper and lead in the sediments of the Saguenay Fjord. *Can. Journ. Earth. Sci.*, **13**(17): 960-971.
- Marchand M, Martin JL. 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**(1): 26-39.
- Martin JM, Meybeck M. 1979. Elemental mass-balance of material carried by world major rivers. *Mar. Chemistry*, **7**(2): 173-206.
- Mermut AR, Jain JC, Song L, Kerrich R, Kozak L, Jana S. 1996. Trace element concentrations of select soils and fertilizers in Saskatchewan. *Canada. Environ. Qual.*, **25**: 845-853.
- Métongo BS, Kouassi AM, Kaba N. 1993. Evaluation quantitative et qualitative des effluents et de polluants ; cas de la Côte d'Ivoire et de la ville d'Abidjan. Centre de Recherche Océanologiques, Abidjan, Côte d'Ivoire, p.94.
- Muller G. 1979. Schwermetalle in den Sedimenten der Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau.*, **79**(24): 778-783.
- Okoye BCO, Afolabi OA, Ajao EA. 1991. Heavy metals in the Lagos Lagoon sediments. *Int. J. Environ. Stud.*, **37**: 35-41.
- Pena G, Picot B. 1991. Métaux traces dans les sédiments d'une lagune méditerranéenne: l'étang de Thau. *Océanologica Acta.*, **14**(5): 459-472.

- Rapin F, Fernex F. 1981. Teneurs en métaux lourds dans les sédiments des baies de Nice et de Villefranche-sur-Mer (Méditerranée, France). Origine des contaminations. *Rev. Int. Océanogr. Méd.*, Tomes **LXIII-LXIV**: 85-95.
- RNO. 1981. Synthèse des Travaux de Surveillance 1975-1979 du Réseau National d'Observation de la Qualité du Milieu Marin. CNEXO (édn). Centre Océanologique de Bretagne; p.358.
- Rubio B, Nombela MA, Vilas F. 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution. *Marine Pollution Bulletin*, **40**(11): 968-980
- Scheren PAGM, Kroeze C, Janssen FJJG, Hordijk L, Ptasiński KJ. 2004. Integrated water pollution assessment of the Ebrié Lagoon, Ivory Coast, West Africa. *Journal of Marine Systems*, **44**: 1– 17
- Solodov IN, Aleksand VZ, Aleksand PM, Aleksand DK, Boris RT. 1998. Geochemistry of natural and contaminated subsurface waters in the lake Karacai, Southern Urals, Russia. *Applied Geochemistry*, **13**(8): 921- 939.
- Rousseaux AR, Navaro A, Vermande P. 1991. Distribution des sept principaux métaux lourds dans les constituants des ordures ménagères. Etudes et Mémoires, Tribune de l'eau, 17-25.
- Tastet J-P. 1979. Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse Université de Bordeaux I, 2 vol., p.212.
- Tastet JP, Aka K, Bakayoko S, Lapaquellerie Y, Sombo B. 1984. La teneur en métaux lourds des sédiments marins et lagunaires de Côte d'Ivoire. Pollution d'une baie en zone urbaine industrialisée. 10^e Réunion annuelle des Sciences de la Terre. Bordeaux, Soc. Géol. Fr. Edit., Paris.
- Tastet J-P, Guiral D. 1994. Géologie et sédimentologie. In *Environnement et Ressources Aquatiques de Côte d'Ivoire. Tome II. Les Milieux Lagunaires*. Editions ORSTOM; 59-90.
- UNEP. 1995. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Reference Methods For Marine Pollution Studies*, **63**: 73.
- Varlet F. 1978. Le régime de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Paris, Travaux Document Orstom, 1-15.
- Voutsinou-Taliadouri F, Satsmadjis J. 1983. Distribution of heavy metals in sediments of Patraikos Gulf (Greece). *Mar. Poll. Bull.*, **14**(1): 33-35.
- Yao KM, Métongo BS, Trokourey A, Bokra Y. 2007. Détermination de certains paramètres de pollution dans les baies d'une lagune tropicale: la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *J. Ivoir. Océanol. Limnol. Abidjan*, **4**(1): 1-10.