

Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

Abou TRAORE^{1*}, Gbombélé SORO¹, Kouassi Ernest AHOUSI¹, Barthélémy Siaka BAMBA²,
Nagnin SORO¹ et Jean BIEMI³

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR des Sciences de la terre et des ressources Minières, 22 BP 582 Abidjan 22, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire

²Centre de Recherches Océanologiques, BP V18 Abidjan, Côte D'Ivoire

³Laboratoire de Géorisques, Assainissement et Environnement, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières 22 BP 582 Abidjan 22, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : bouareta@yahoo.fr

Résumé

Les besoins en eau du District d'Abidjan sont de plus en plus croissants à cause d'une démographie galopante, d'une urbanisation accélérée et de la pollution des eaux souterraines. La lagune Aghien qui est une lagune rurale non influencée par les rejets industriels pourrait servir comme une source alternative d'approvisionnement en eau potable des populations. Les sédiments sont des réservoirs de polluants susceptibles d'être relargués dans l'eau. L'objet de cette étude est d'évaluer le niveau de pollution des sédiments de cette lagune en métaux lourds tels que le cuivre, le cadmium, le fer, le zinc, l'aluminium, le mercure et le plomb. Ces éléments ont été dosés par la méthode de la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA). La méthode du calcul des facteurs d'enrichissement et l'analyse statistique multivariée ont permis de déterminer les origines de la contamination des sédiments et les facteurs qui engendrent son évolution spatio-temporelle. Les concentrations moyennes (en mg.k⁻¹ poids sec) en métaux lourds dans les sédiments sont de 1,41 pour le plomb, 24182,05 pour l'aluminium, 646,32 pour le fer, 29,25 pour le zinc, 0,03 pour le cadmium, 0,54 pour le mercure et 145,71 pour le cuivre. Les concentrations de mercure et de cuivre sont supérieures à celles des sédiments non pollués qui sont respectivement de 0,3 mg.kg⁻¹ et 33 mg.kg⁻¹. Les sédiments de la lagune Aghien sont donc pollués par ces deux métaux lourds. Les facteurs d'enrichissement calculés à chaque station pour Cu, Zn, Cd, Al et Hg sont majoritairement supérieurs à 10. Ils mettent en évidence une prédominance des sources anthropiques de l'enrichissement de ces métaux dans les sédiments. Les sources anthropiques sont notamment les fertilisants utilisés dans les plantations situées sur les berges de la lagune, les déchets domestiques issus des villages riverains et les fermes d'élevages environnantes. Ces résultats sont soutenus par l'analyse en composantes principales qui montre que Cu, Zn, Cd et Al ont une origine anthropique et Fe, Pb et Hg, une origine terrigène.

Mots-clés : lagune Aghien, métaux lourds, sources anthropiques, facteurs d'enrichissement.

Abstract**Contamination level of heavy metals in sediments of a tropical lagoon: the lagoon Aghien (South-east of Côte d'Ivoire)**

The requirements out of water for Abidjan District are increasingly increasing because of gallop demography, an accelerated urbanization and groundwater pollution. Aghien lagoon which is a rural lagoon not influenced by the industrial wastes could be used as an alternative source of drinking water for populations. Sediments are reservoirs of pollutants may be released into the water. The object of this study is to evaluate the level of pollution of the sediments of this lagoon by heavy metals such as copper, cadmium, iron, zinc, aluminum, mercury and lead. These elements were measured out by the method of the Atomic Absorption Spectrometry (SAA). The method of the calculation of the factors of enrichment and the multivariate statistical analysis made it possible to determine the origins of the contamination of the sediments and the factors which generate its space-time evolution. The average concentrations (in mg.k⁻¹ dry weight) out of heavy metals in the sediments are 1,41 for lead, 24182,05 for aluminum, 646,32 for iron, 29,25 for zinc, 0,03 for cadmium, 0,54 for mercury and 145,71 for copper. The copper and mercury concentrations are higher than those of the not polluted sediments which are respectively of 0,3 mg.kg⁻¹ and 33 mg.kg⁻¹. The sediments of the Aghien lagoon are thus polluted by these two heavy metals. The factors of enrichment calculated at each station for Cu, Zn, Cd, Al and Hg are mainly higher than 10. They highlight a prevalence of the anthropic sources of the enrichment of these metals in the sediments. Anthropics origins are in particular the fertilizers used in the plantations located on the banks of the lagoon, domestic waste resulting from the water-side villages and the surrounding farms. These results are supported by the analysis in principal components which shows that Cu, Zn, Cd et Al have an anthropic origin and Fe, Pb and Hg, a natural origin.

Keywords : *Aghien lagoon, heavy metals, anthropic origin, factors of enrichment.*

1. Introduction

L'accès à l'eau potable constitue un défi important à relever pour le développement des différents secteurs de l'économie d'un pays et pour améliorer les conditions de vie des ménages. Ainsi, les autorités ivoiriennes ont entrepris à travers le Programme National de l'Hydraulique Humaine (PNHH) lancé depuis 1973, un vaste programme d'équipements hydrauliques dont l'objectif est d'alimenter en eau potable toutes les populations vivant sur le territoire national. Malgré d'importants acquis, les populations urbaines en général et les populations du District d'Abidjan en particulier ne sont pas suffisamment approvisionnées en eau potable. La capitale économique de la Côte d'Ivoire est uniquement alimentée par les eaux souterraines du Continental Terminal qui représentent 68% de la production d'eau potable nationale [1]. Ces eaux sont menacées par la surexploitation et par divers sources de pollution [2, 3, 4]. Aussi, la pollution par les nitrates explique-t-elle l'abandon de certains champs de captage entraînant ainsi la baisse de la capacité de production d'eau potable. Tous les quartiers de la ville d'Abidjan connaissent un service discontinu voire interrompu de distribution d'eau potable. La Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire (SODECI) procède à un délestage pour satisfaire les ménages. Pour pallier le déficit en eau potable, il convient de trouver d'autres ressources mobilisables notamment les eaux de surface. Aussi, la lagune Aghien est-elle pressentie pour venir en appoint aux champs de captage existants pour l'approvisionnement en eau potable.

Cette lagune est située dans une zone soumise à d'intenses activités agricoles. La forêt autour d'elle est détruite et remplacée par de grandes plantations de palmiers à huile, d'hévéa, de maïs, de banane, de manioc etc et par des fermes d'élevage bovin, ovin et porcin. La lagune Aghien est utilisée pour la pêche, pour la production piscicole mais aussi pour la baignade, la lessive, la vaisselle et comme eau de boisson par les villageois. Ces pressions anthropiques influencent négativement aussi bien la qualité écologique des hydrosystèmes que leur biocénose [5]. La contamination métallique des sédiments constitue un danger pour l'eau, les espèces vivantes et pour la santé de l'homme [6, 7]. Dans les écosystèmes lagunaires côtiers, les métaux lourds peuvent être associés aux sédiments [8, 9, 10, 11] et sont susceptibles d'être relargués dans l'eau. Les sédiments sont des pièges à micropolluants qui donnent une indication de la pollution historique du cours d'eau [6, 12]. L'objectif de ce travail est d'évaluer le niveau de pollution des sédiments de surface de la lagune Aghien par le cuivre, le cadmium, le fer, le plomb, le zinc, l'aluminium et le mercure. Il vise non seulement la préservation de la ressource en eau mais également la protection de l'écosystème aquatique et ses potentialités biologiques.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

La lagune Aghien qui fait l'objet de cette étude est située au Sud-est de la Côte d'Ivoire en zone forestière entre les latitudes 5°21'N et 5°28'N et les longitudes 3°49'W et 3°58'W (*Figure 1*). Le climat de cette zone est celui du littoral septentrional du Golfe de Guinée qui est un climat équatorial de transition. C'est une région humide, avec des précipitations interannuelles de plus de 1500 mm. Le climat est caractérisé par quatre saisons dans le cycle annuel, avec une grande saison sèche de décembre à mars, une grande saison de pluies d'avril à juillet, une petite saison sèche d'août à septembre et une petite saison des pluies d'octobre à novembre. La grande saison des pluies est centrée sur juin et la petite saison l'est sur octobre. La grande et la petite saison sèche sont centrées respectivement sur janvier et août. La végétation est marquée par la forêt dense sempervirente et ombrophile dégradée par des activités anthropiques. La lagune Aghien est alimentée en eau douce par les rivières Bété, Djibi et Mé. Du point de vue géologique, la lagune Aghien est enchâssée dans les formations sablo-argileuses du Continental Terminal. Deux domaines sont à différencier dans cette zone, au Sud, le bassin sédimentaire constitué de roches détritiques du Tertiaire et du Quaternaire et au Nord, le socle cristallin et cristalloyphyllien constitué de gneiss fins à biotite et amphibole [13]. Les faciès les plus courants de la zone sont des conglomérats ferrugineux, grès ferrugineux, sable, sables argileux, argiles et formations ferrugineuses.

2-2. Echantillonnage et techniques d'analyse

La campagne de prélèvement d'échantillons d'eau et de sédiments s'est effectuée dans dix stations bien réparties sur la lagune Aghien (*Figure 1*). Une bouteille Niskin a servi pour le prélèvement des échantillons d'eau. Les analyses chimiques ont été effectuées sur vingt échantillons d'eau dont dix ont été prélevés à 20 cm de la surface et les 10 autres à 50 cm de l'interface eau/sédiment. La température (T°C), le pH, l'oxygène dissous (OD) et le potentiel redox (Eh) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un analyseur multi-paramètres de type THERMO ELECTRON CORPORATION ORION 4 STAR aux précisions $\pm 0,1$ (0-70 °C); 0,002 ; 0,01 et 0,2 respectivement. La conductivité électrique (CE), la salinité et les solides dissous totaux (TDS) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un autre analyseur multi-paramètres de type HACH sension 5 aux précisions $\pm 0,005$; 0,1 et 0,005 respectivement.

Les échantillons d'eau destinés aux analyses de laboratoire ont été recueillis dans des bouteilles en plastique et en verre et transportés dans des glacières au Laboratoire Central pour l'Hygiène Alimentaire et l'Agro-industrie (LCHAI). Le prélèvement des sédiments a été effectué au moyen d'une benne de type Van Veen à l'interface eau/sédiment. Les échantillons ont été recueillis au cœur de la benne pour éviter toute contamination métallique due à celle-ci. Ils ont été conservés dans des sachets en plastique, puis dans du papier aluminium et placés à l'obscurité dans une glacière (4°C) avant leur transport au Laboratoire du Centre de Recherches Océanologiques (LCRO). Au laboratoire, les sédiments ont été placés dans un congélateur (-20°C). Après séchage à l'étuve (70°C) pendant 24 heures, les échantillons ont été pré-tamisés sur 2 mm afin d'éliminer les morceaux de coquilles, de branches et de feuilles. Ils ont été ensuite tamisés pour obtenir une poudre de diamètre $\leq 63 \mu\text{m}$ qui a été conservé dans des flacons en plastique, avec un ruban en plastique autour du dispositif de fermeture afin de la protéger contre l'humidité. Les flacons ont été ensuite stockés dans une armoire à l'obscurité et au frais (20°C) pour la digestion. La méthode utilisée pour cette digestion est celle de la décomposition totale. Des échantillons de sédiments secs de 0,50 g sont prélevés et placés dans des tubes en téflon préalablement lavés à l'acide. Pour une minéralisation à chaud, il a été mis dans chaque tube, 1 mL d'eau régale ($\text{HNO}_3 : \text{HCl} ; 1:3, \text{v/v}$) et 6 mL de HF concentré (48%, pur). Le chauffage s'est fait à 120°C au bain marie pendant 2 heures 30 minutes pour obtenir un liquide limpide.

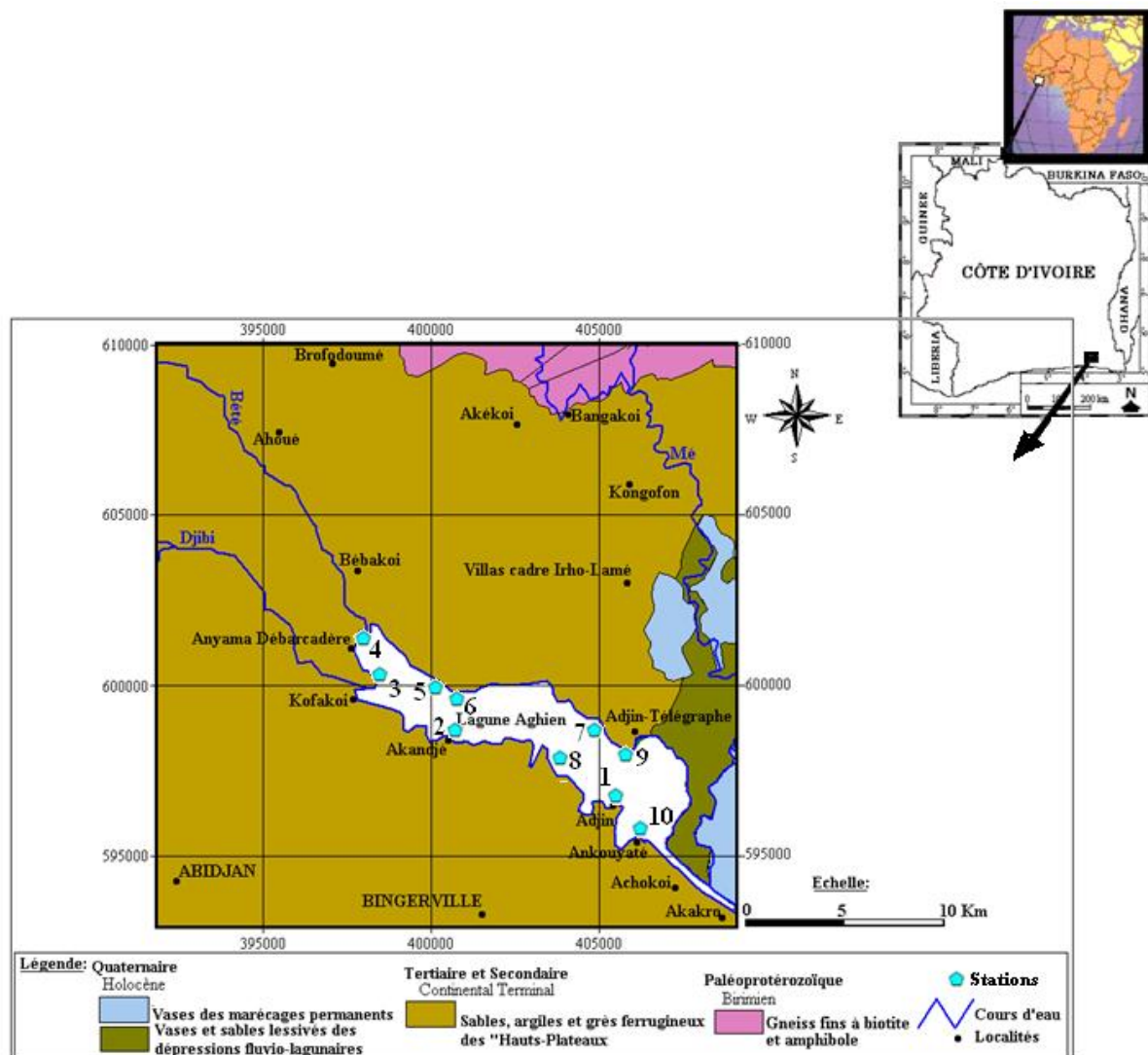


Figure 1 : Situation géographique et géologie de la zone d'étude

Les échantillons sont laissés à la température ambiante et après refroidissement, une solution d'acide borique (2,70 g dans 20 mL d'eau bi distillée) a été ajoutée au contenu des tubes. Le volume final a été ramené à 50 mL et laissé au repos pendant toute une nuit. Les métaux ont été dosés par Spectrométrie d'Absorption Atomique (Perkin-ELmer, model 3030) à flamme équipée d'un four graphite à la longueur d'onde pour chaque métal donné. L'état de la pollution des sédiments par les métaux lourds a été donné en comparant les résultats obtenus aux concentrations des métaux lourds dans les sédiments non pollués (GESAMP, 1982 et Salomons et Förstner, 1984 *in* Calamari et Naeve [14]) (**Tableau 1**). Les paramètres physiques et les métaux lourds dosés ont subi une analyse statistique. Cette approche statistique repose sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables centrées réduites. L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle de description utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données [15]. Elle se propose de trouver les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation linéaires entre les variables centrées réduites [16]. Cette analyse statistique a pour but de suivre l'évolution chimique des eaux de la lagune Aghien. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel NCSS 6.0. L'interprétation des résultats concernant la concentration des métaux dans le sédiment apparaît plus délicate. La fraction liée de façon naturelle aux sédiments se superpose à la fraction de nature exogène [17]. Une solution pour déterminer l'origine anthropique ou naturelle des éléments est le calcul de facteurs d'enrichissement [18-26]. Ce facteur est défini de la façon suivante :

$$EF_{El} = (EI_{ech} / X_{ech}) / (EI_{Crust} / X_{Crust}) \tag{1}$$

avec EF_{El} : facteur d'enrichissement de l'élément El

EI_{ech} : concentration massique de l'élément dans l'échantillon

EI_{Crust} : concentration massique de l'élément dans la croûte continentale moyenne

X_{Crust} : teneur de l'élément de référence dans la croûte

X_{ech} : teneur de l'élément de référence dans l'échantillon. Cet élément est exclusivement issu de la source naturelle terrigène. Il est souvent choisi parmi Al, Li, Sc, Zr, Ti et Th ou parfois Fe ou Mn [27].

Si le facteur d'enrichissement (EF ou FE) est égal ou peu différent de 1, cela suggère que l'élément est principalement d'origine terrigène. Si FE est nettement supérieur à 1, alors il existe d'autres sources que la source naturelle terrigène. Un début d'enrichissement en métaux lourds est significatif seulement si ce dernier dépasse la valeur de 2 [25]. En raison de la variation naturelle de la composition chimique de la croûte terrestre, on estime généralement qu'à partir de $EF > 10$, la source anthropique est clairement majoritaire [18]. Il n'existe pas de règle prédéfinie pour le choix de l'élément de référence si ce n'est qu'il doit être localement principalement représentatif de sources terrigènes [26]. L'élément de référence choisi pour cette étude est le fer. Le facteur d'enrichissement est calculé à partir de la concentration des métaux lourds dans la croûte continentale (UCC: Upper Continental Crust) de Wedepohl [28] (**Tableau 2**).

Tableau 1 : Concentration des métaux lourds dans les sédiments non pollués (GESAMP, 1982 et Salomons et Förstner, 1984 *in* Calamari et Naeve [14])

Métaux lourds	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe
Concentrations (mg.kg ⁻¹)	0,05-0,3	0,11	19	33	95	41000

Tableau 2 : Concentration des métaux lourds dans la croûte continentale [28]

Métaux lourds	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Al
UCC (mg.kg ⁻¹)	0,056	0,1	17	14	79	30890	77440

3. Résultats

Les résultats de la mesure des paramètres physico-chimiques des eaux de la lagune Aghien sont reportés dans le **Tableau 3**. La température des eaux varie entre 31,8°C et 33°C, avec une moyenne de 32,3°C. La salinité est comprise entre 0 et 0,1‰, avec une moyenne de 0,03‰ dans la colonne d'eau. Les valeurs du pH varient entre 6,6 et 8,8 unités pH, avec une moyenne de 7,6 unités pH. La conductivité électrique des eaux varie entre 80,6 et 198,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, avec une moyenne de 110 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les concentrations en oxygène dissous varient entre 3,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (48,90 %) et 6,70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (91,25 %), avec une moyenne de 4,90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (66,83 %) dans la colonne d'eau. Les concentrations en TDS varient de 38,1 à 95,0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, avec une moyenne de 52,2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Le potentiel redox est compris entre -140,2 et -8,3 mV, avec une moyenne de -67,7 mV. Les valeurs de la DBO_5 sont comprises entre 10,95 et 26,63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, avec une moyenne de 17,46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Les résultats de l'analyse réalisée sur les sédiments sont présentés dans le tableau 4. Les concentrations en plomb des sédiments de la lagune Aghien varient de 0,16 à 3,11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 1,41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Elles sont inférieures à celles des sédiments non pollués. Les concentrations en aluminium varient de 10463,34 à 38960,77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 24182,05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ inférieure à la teneur moyenne des sédiments à l'échelle mondiale qui est 72000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [29].

Les teneurs en fer déterminées dans les sédiments de la lagune Aghien sont comprises entre 181,75 et 1335,76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 646,32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ inférieure à la teneur dans les sédiments non pollués. Les concentrations en zinc varient de 10,68 à 55,11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 29,25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ inférieure à la concentration dans les sédiments non pollués. Les concentrations en cadmium sont inférieures à celles des sédiments non pollués. Elles sont comprises entre 0,003 et 0,07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 0,03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Les concentrations en mercure sont comprises entre 0,06 et 1,12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une moyenne de 0,54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Aux stations 8 et 9, les sédiments possèdent une teneur en mercure qui se situe dans l'intervalle des teneurs des sédiments non pollués, avec respectivement 0,06 et 0,17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Par contre, les sédiments prélevés aux stations 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7 et 10 sont pollués, avec une concentration en mercure supérieure à celle des sédiments non pollués. Les concentrations en cuivre déterminées dans les sédiments sont comprises entre 59,98 à 243,08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec une valeur moyenne de 145,71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. A toutes les stations, les sédiments présentent une concentration en cuivre supérieure à celle des sédiments non pollués. Les histogrammes de la répartition de la concentration du mercure et du cuivre en fonction des stations de prélèvement (**Figure 2**) ont été réalisés à partir des différentes valeurs du **Tableau 4**.

Les résultats de l'ACP sont présentés dans les tableaux 5, 6, 7. Le tableau 6 donne les valeurs propres, les pourcentages des variances exprimées pour chaque facteur et le cumul de ces variances. Avec une variance exprimée de 36,4%, le facteur F1 est le plus important, suivi respectivement du facteur F2, avec 21,4% et du facteur F3, avec 12,5%. La matrice de corrélation (**Tableau 7**) montre que Sal est bien corrélé avec CE ($r = 0,87$) et TDS ($r = 0,87$). Il existe également une bonne corrélation entre TDS et CE ($r = 0,99$), entre pH et OD ($r = 0,87$), entre Pb et Fe ($r = 0,77$) et entre Al et Zn (0,81). Le plan factoriel F1-F2 représente 57,8% de la variance exprimée (**Figure 3**). Le facteur F1, le plus important (36,4 %), est déterminé par un premier regroupement constitué de TDS, CE, Sal, Eh, DBO_5 et Zn. Ces variables caractérisent la minéralisation-temps de séjour des eaux de la lagune Aghien. Cette minéralisation est consécutive à l'alimentation de la lagune par les rivières forestières notamment la Bété, la Djibi et la Mé, par les eaux de pluie et de ruissellement. Le facteur F1 est également déterminé par un second regroupement constitué de pH, OD, T° , Cu et Hg. Les variables telles que pH, OD et T° influencent la biodégradation de la matière organique qui entraîne une minéralisation organique des eaux lagunaires. F1 traduit à la fois une minéralisation-temps de séjour et une minéralisation organique.

Le facteur 2 représente 21,4 % de la variance exprimée et est défini par les variables Pb, Hg, Fe et Al. Les faciès les plus courants de la zone d'Aghien sont des conglomérats ferrugineux, grès ferrugineux, sable, sables argileux, argiles et formations ferrugineuses. Aussi, la source du fer est-elle terrigène et sa bonne corrélation avec le plomb et leur proximité dans le cercle de communauté avec Hg montrent que ces trois métaux ont la même origine. Ils sont inversement corrélés à Al, Zn et Cd dans le cercle de communauté montrant ainsi que ces éléments ont une origine superficielle. Le facteur 2 exprime deux phénomènes, l'origine profonde de Pb et de Fe et l'origine superficielle de Al, Zn et Cd. Ce facteur traduit l'origine spatiale des métaux lourds des sédiments de la lagune Aghien.

Les facteurs d'enrichissements (FE) sont présentés dans le **Tableau 8**. L'analyse de ce tableau montre que :

- Hg et Cu sont les métaux fortement enrichis à toutes les stations, avec des FE >10. La source anthropique de ces deux éléments est donc la source majoritaire;
- Cd est fortement enrichi aux stations 1; 4; 5; 6; 7; 8; 9 et 10, avec des FE > 10. La source anthropique de cet élément est dominante à ces stations. Il n'y a pas d'enrichissement du Cd à la station 2 par contre on observe un début d'enrichissement de ce métal à la station 3, avec un FE égal à 8,03 ;
- Pb est fortement enrichi à la station 9, avec un FE > 10. Sa source anthropique est majoritaire à cette station. Aux stations 4; 6 et 7, avec des FE < 2, il n'y a pas d'enrichissement du Pb. Cet élément présente un début d'enrichissement aux stations 1; 2; 3; 5; 8 et 10, avec $2 < FE < 10$;
- Zn présente un début d'enrichissement aux stations 3 et 4. Il est fortement enrichi aux autres stations, avec des FE > 10. Zn a une source anthropique majoritaire à ces stations ;
- Al présente un début d'enrichissement aux stations 1; 2; 3 et 4. Il est fortement enrichi aux six autres stations, avec des FE > 10. La source anthropique de ce métal est dominante à ces stations.

Tableau 3 : Concentration (moyennes (Moy) et coefficients de variation (Cv)) des paramètres physico-chimiques des eaux de la lagune Aghien (mars 2010)

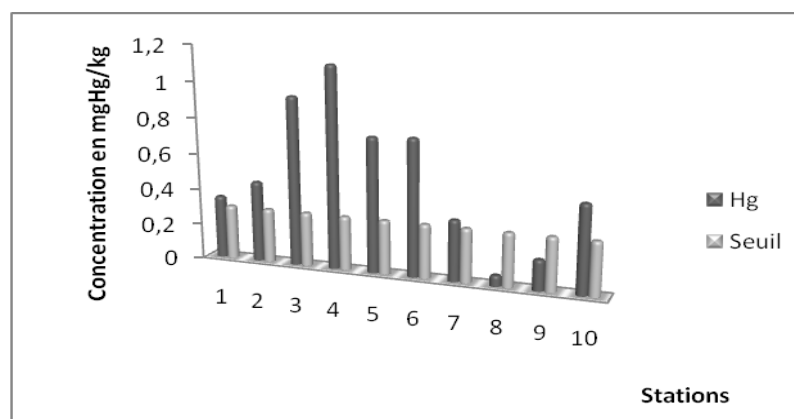
	T (°C)			Sal (‰)			pH (unité pH)			OD (mg/L)		
	*S	F	Moy	S	F	Moy	S	F	Moy	S	F	Moy
Station 1	33,2	31,7	32,4	0,1	0,1	0,1	7,30	6,96	7,13	5,32	4,16	4,74
Station 2	33,2	30,8	32	0	0	0	8,58	6,42	7,50	5,95	2,41	4,18
Station 3	33	31,8	32,4	0	0	0	7,74	6,51	7,12	5,45	2,62	4,03
Station 4	32,7	30,9	31,8	0	0	0	8,32	6,59	7,45	5,72	4,12	4,92
Station 5	32,4	31,8	32,1	0	0	0	8,72	7,69	8,20	6,33	4,31	5,32
Station 6	32,6	33,4	33	0	0	0	8,62	8,68	8,65	6,47	5,58	6,02
Station 7	32,5	32,7	32,6	0	0	0	8,89	8,72	8,80	6,96	6,41	6,68
Station 8	33,9	31,1	32,5	0	0	0	8,21	6,28	7,24	5,95	2,15	4,05
Station 9	31,6	31,9	31,7	0,1	0,1	0,1	7,35	7,06	7,20	5,66	5,24	5,45
Station 10	32,7	31,4	32	0,1	0,1	0,1	6,68	6,52	6,60	4,55	2,63	3,59
Moyenne	32,7	31,7	32,2	0,003	0,003	0,003	8,04	7,14	7,59	5,83	3,96	4,90
Cv (%)	1,15			152,75			9,01			18,99		
	DBO ₅ (mgO ₂ /L)			CE (µS/cm)			Eh (mV)			TDS (mg/L)		
	S	F	Moy	S	F	Moy	S	F	Moy	S	F	Moy
Station 1	31	19,19	25,09	142,4	146,2	144,3	-50,1	-29,6	-39,85	67,9	69,7	68,8
Station 2	26,34	26,92	26,63	86,7	97,4	92,05	-127	2,4	-62,3	41,1	46,2	43,65

Station 3	2,14	26,23	14,18	80,6	80,5	80,55	-76,7	-3,1	-39,9	38,1	38,1	38,1
Station 4	6,80	15,16	10,98	82,6	81	81,80	-111,2	-8	-59,6	39,1	38,3	38,7
Station 5	7,43	14,82	11,12	86	83,2	84,60	-135,3	-73,4	-104,3	40,7	39,4	40,05
Station 6	20,79	22,88	21,83	87,2	87,7	87,45	-129	-133,3	-131,1	41,3	41,5	41,4
Station 7	7,43	14,82	10,95	99,6	105	102,3	-145,3	-135,1	-140,2	47,2	49,8	48,5
Station 8	14,24	18,85	16,54	98,5	97,7	98,1	-105,1	10,8	-47,15	46,7	46,3	46,5
Station 9	18,90	14,82	16,86	124,6	134,6	129,6	-53,3	-35,6	-44,45	59,3	64,1	61,7
Station 10	18,27	22,54	20,40	191,4	206	198,7	-13,3	-3,3	-8,3	91,5	98,4	94,95
Moyenne	15,33	19,58	17,46	107,96	111,93	109,95	-	-	-	51,29	53,18	52,24
							94,63	40,82	67,73			
Cv (%)		31,70				32,49			60,44			32,92

*S=surface ; F=fond ; Sal=salinité ; OD=oxygène dissous ; DBO₅=demande biochimique en oxygène ; CE=conductivité électrique ; Eh=potentiel d'oxydoréduction ; TDS=solides dissous totaux ; pH=potentiel d'hydrogène ; T=température.

Tableau 4 : Concentrations (en mg.kg⁻¹) des métaux lourds dans les sédiments de la lagune Aghien

Stations	Pb	Al	Fe	Zn	Cd	Hg	Cu
1	3,11	25860,05	1335,76	35,69	0,05	0,35	59,98
2	2,52	11244,92	912,74	29,16	0,00	0,45	89,20
3	2,64	10473,41	922,64	13,19	0,02	0,94	243,08
4	0,46	10463,34	811,69	10,68	0,04	1,12	111,23
5	1,56	34744,35	566,06	46,66	0,07	0,75	193,52
6	0,50	19189,06	505,06	13,88	0,03	0,76	126,91
7	0,16	24562,93	300,35	20,73	0,04	0,34	202,37
8	1,30	38960,77	681,46	55,11	0,05	0,06	167,91
9	1,19	33691,74	181,75	27,86	0,03	0,17	127,21
10	0,66	32629,95	245,70	39,58	0,04	0,49	135,75
Minimum	0,16	10463,34	181,75	10,68	0,003	0,06	59,98
Moyenne	1,41	24182,05	646,32	29,25	0,03	0,54	145,71
Maximum	3,11	38960,77	1335,76	55,11	0,07	1,12	243,08
Coefficient de variation (Cv) en %	69,39	42,63	53	48,74	48,14	59,47	36,31



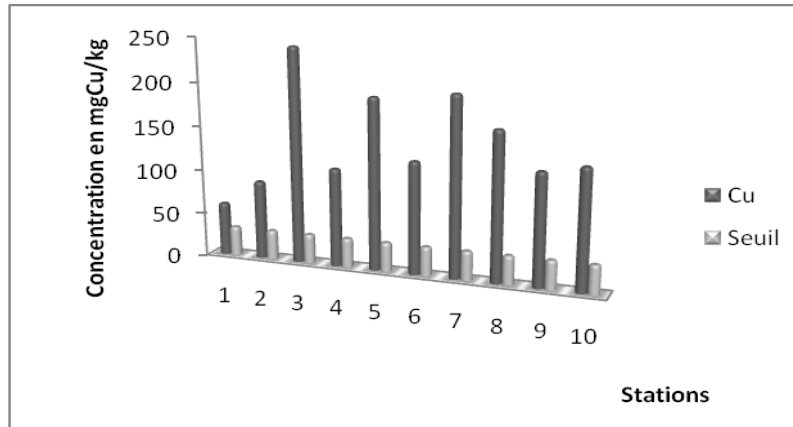


Figure 2 : *Histogrammes de la distribution du mercure et du cuivre dans les sédiments de surface de la lagune Aghien*

Tableau 5 : *Variables statistiques*

Variables	Moyenne	Min	Max	Ecart-type
Pb (mg.kg⁻¹)	1,41	0,16	3,11	1,03
Al (mg.kg⁻¹)	24182,05	10463,34	38960,77	10868,73
Fe (mg.kg⁻¹)	646,32	181,75	1335,76	361,12
Zn (mg.kg⁻¹)	29,25	10,68	55,11	15,03
Cd (mg.kg⁻¹)	0,04	0,00	0,07	0,018
Hg (mg.kg⁻¹)	0,54	0,06	1,12	0,34
Cu (mg.kg⁻¹)	145,72	59,98	243,08	55,77
T °C	32,27	31,75	33,00	0,39
Sal (‰)	0,03	0,00	0,10	0,04
pH (unité pH)	7,59	6,60	8,81	0,72
CE (µS.cm⁻¹)	109,95	80,55	198,70	37,66
Eh (mV)	-67,73	-140,20	-8,30	43,15
TDS (mg.L⁻¹)	52,24	38,10	94,95	18,13
OD (mg.L⁻¹)	4,90	3,59	6,69	0,98
DBO₅ (mg.L⁻¹)	17,46	10,96	26,63	5,84

Tableau 6 : *Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux*

Facteurs	F1	F2	F3
Valeurs propres	5,5	3,2	1,9
% de variance exprimée	36,4	21,4	12,5
% de variance exprimée cumulée	36,4	57,8	70,3

Tableau 7 : Matrice de corrélation entre les variables

	Pb	Al	Fe	Zn	Cd	Hg	Cu	T°	Sal	pH	CE	Eh	TDS	OD	DBO5
Pb	1,000														
Al	-0,196	1,000													
Fe	0,775	-0,450	1,000												
Zn	0,184	0,816	-0,040	1,000											
Cd	-0,096	0,562	0,050	0,490	1,000										
Hg	-0,072	0,678	0,224	0,626	0,025	1,000									
Cu	-0,180	0,076	-0,333	-0,044	0,172	0,185	1,000								
T°	-0,065	-0,007	0,113	-0,090	0,048	-0,065	0,216	1,000							
Sal	0,163	0,416	-0,112	0,235	0,059	-0,418	-0,471	-0,320	1,000						
pH	-0,426	-0,097	-0,234	-0,282	0,119	0,139	0,253	0,532	-0,587	1,000					
CE	-0,041	0,456	-0,254	0,347	0,061	-0,414	-0,347	-0,201	0,872	-0,560	1,000				
Eh	0,426	0,098	0,234	0,283	-0,118	-0,140	-0,254	-0,532	0,589	0,999	0,561	1,000			
TDS	-0,040	0,456	-0,253	0,347	0,061	-0,413	-0,348	-0,201	0,872	-0,560	0,999	0,562	1,000		
OD	-0,482	0,018	-0,348	-0,369	0,151	0,003	0,109	0,343	-0,215	0,870	-0,339	0,868	-0,340	1,000	
DBO5	0,489	-0,101	0,366	0,135	-0,477	-0,330	0,703	0,150	0,393	-0,303	0,379	0,303	0,379	-0,347	1,000

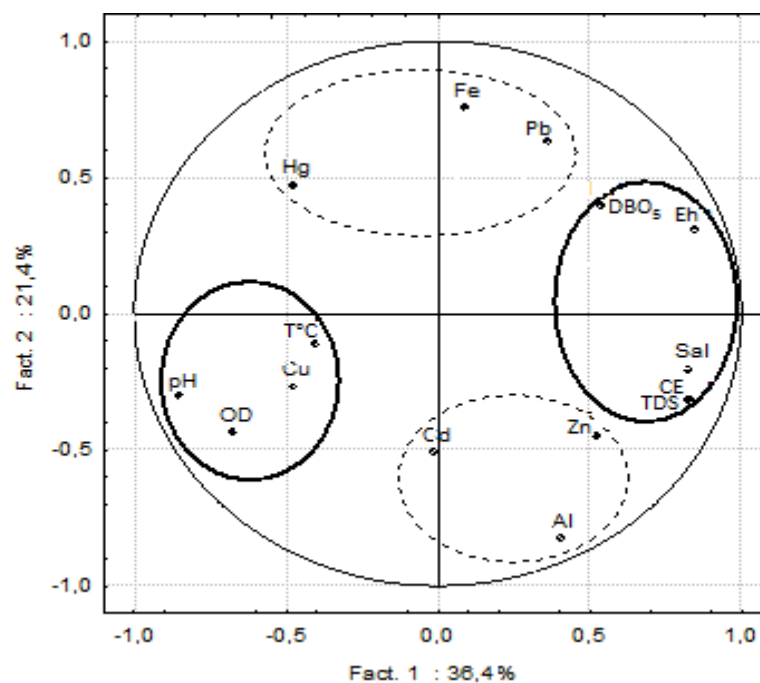


Figure 3 : Espace des variables du plan factoriel F1-F2

Tableau 8 : *Facteurs d'enrichissement des métaux lourds dans les sédiments de la lagune Aghien*

Stations	FE (Hg)	FE (Cd)	FE (Pb)	FE (Cu)	FE (Zn)	FE (Al)
1	144,5	12,0	4,2	99,0	10,4	7,7
2	271,9	1,0	5,0	215,6	12,4	4,9
3	561,9	8,0	5,2	581,3	5,5	4,5
4	761,1	15,6	1,0	302,3	5,1	5,1
5	730,8	38,2	5,0	754,3	32,2	24,4
6	830,0	15,2	1,8	554,4	10,7	15,1
7	624,4	40,1	0,9	1486,6	26,9	32,6
8	48,5	20,8	3,4	543,6	31,6	22,8
9	515,9	42,4	11,9	1544,3	59,9	73,9
10	1100,0	45,2	4,8	1219,0	62,9	52,9

4. Discussion

L'analyse des sédiments prélevés dans les eaux de la lagune Aghien a révélé la présence des métaux lourds tels que Hg, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe et Al. Seuls Hg et Cu présentent des concentrations supérieures à celles des sédiments non pollués. Les concentrations moyennes observées dans les sédiments de la lagune Aghien sont inférieures à celles déterminées dans les sédiments de la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire par Coulibaly et *al.* [30] qui sont de 0,803 mg/kg pour Hg, 0,68 mg.kg⁻¹ pour Cd, 64,8 mg.kg⁻¹ pour Pb, 244 mg.kg⁻¹ pour Zn, 60641 mg.kg⁻¹ pour Fe et 209100 mg.kg⁻¹ pour Al. Les teneurs en Cd, Pb et Zn des sédiments de surface de la lagune Aghien sont largement inférieures à celles mesurées dans les sédiments de la lagune de Lagos au Nigéria (Okoye et *al.*, 1991 *in* Calamari et Naeve [14]) présentant les valeurs moyennes 4,1 mg.kg⁻¹ pour Cd, 178,9 mg.kg⁻¹ pour Pb et 147 mg.kg⁻¹ pour Zn. La caractéristique commune à ces deux lagunes vient du fait qu'elles sont situées dans des zones fortement industrialisées et urbanisées. Selon Bloundi [25], diverses sources anthropiques peuvent être à l'origine de l'alimentation des lagunes en métaux lourds. Il s'agit notamment des déchets liquides constitués des eaux usées, des déchets solides mal gérés avec pour conséquence le développement de nombreuses décharges non contrôlées.

Les résultats de l'Analyse en Composante Principale montre que les eaux de la lagune Aghien sont soumises à la fois à une minéralisation naturelle et à une minéralisation organique. La minéralisation naturelle est consécutive à l'alimentation de la lagune Aghien par les rivières Bété, Djibi et Mé, par les eaux de pluie et par les eaux de ruissellement. En effet, selon Dufour [31] et Konan et *al.* [32], la minéralisation des lagunes dépend des échanges avec l'océan, des apports d'eau douce par les rivières, des précipitations et de l'évapotranspiration qui subissent d'importantes variations spatiales et temporelles. La minéralisation organique est liée à la décomposition de la matière organique qui est influencée par des paramètres environnementaux tels que le pH, la température, le potentiel redox et l'oxygène dissous. Les taux de croissance des bactéries nitrifiantes sont influencés par le pH du milieu. Boursier [33] note que pour une température de 30°C et un pH de 7-8, la vitesse de dégradation de la matière organique est la plus élevée. Pour cet auteur, dans le traitement aérobie du lisier de porcs, tant que la concentration en OD est faible, la nitrification et la nitratisation sont complètement inhibées.

La température élevée des eaux de la lagune entraîne une diminution de l'oxygène dissous [25, 34]. L'insuffisance de OD inhibe la biodégradation de la matière organique qui s'accumule entraînant ainsi une augmentation de la DBO₅. La distribution des métaux lourds dans les sédiments est influencée par la teneur en matière organique [9] qui a une grande affinité pour Cu et Hg dont les teneurs dans les sédiments de la lagune Aghien sont supérieures à celles des sédiments non pollués. Des encroûtements pourraient être à l'origine de la concentration du cuivre [35]. L'altération des minéraux libère cet élément qui co-précipite avec les oxydes, les argiles, les carbonates, les sulfures ainsi que la matière organique [36]. D'après Kribi [37], Stead-dexter et Ward [38] et Lee et *al.* [39], le cuivre est fortement lié à la fraction oxydable des sédiments et selon Pempkowiak et *al.* [40], le cuivre de cette fraction est semblable-t-il lié aux substances humiques qui ont une grande affinité pour ce métal. Thomassin et *al.* [41] notent que, dans les sédiments, le mercure lié à la matière organique et aux sulfures est solubilisé tandis que celui lié aux oxydes et hydroxydes minéraux est précipité. Pour ces auteurs, il semble que les concentrations superficielles en oxyde de fer et manganèse des sédiments empêchent la rediffusion du mercure vers les eaux et déterminent fortement le gradient vertical de concentration en cet élément. Le mercure peut aussi co-précipité avec la pyrite.

L'ACP montre également que Fe qui a une origine terrigène du fait de la nature des formations géologiques de la région, est bien corrélé avec Pb et leur proximité dans le cercle de communauté avec Hg montrent que ces trois métaux ont une origine naturelle. Par contre, elle montre que Al, Cd et Zn, inversement corrélés à Fe, Pb et Hg dans le cercle de communauté, sont d'origine superficielle. D'après Kalantari et Ebadi [42], les métaux lourds présents dans les sédiments sont issus de processus naturels et de pollutions anthropiques. Le calcul des facteurs d'enrichissement corrobore cette observation en montrant que hormis Fe qui est l'élément de référence dans la zone d'étude, tous les métaux dosés dans les sédiments sont enrichis ou connaissent un début d'enrichissement dans les différentes stations. Aussi, les métaux ont-ils une origine terrigène et une origine anthropique. L'altération géologique est l'une des sources principales de ces métaux [43]. Fe et Al sont les éléments prépondérants des sédiments, ils peuvent être sous forme de mica, de feldspaths, de pyroxènes, de plagioclases ou d'amphiboles [37]. Selon Forstner et Wittmann [44], l'érosion des sols et des roches porteuses de métaux apparaît quand les processus d'érosion par le vent, de lessivage par la pluie et d'érosion par les eaux courantes détachent et transportent les particules du sol. La lagune Aghien est une lagune rurale, non influencée par les activités industrielles. Par contre, elle est située dans une zone soumise à une intensification des cultures agro-industrielles.

La présence des métaux lourds dans les sédiments pourrait s'expliquer par le lessivage des produits phytosanitaires et fertilisants utilisés dans les plantations. La nature sableuse, pauvre en humus et en argile, des sols de la basse Côte d'Ivoire ainsi que la violence des précipitations, intensifient le lessivage des polluants agricoles vers les rivières et les lagunes [45]. Les biocides (pesticides, herbicides, conservateurs) contiennent de l'As, du Hg, du Pb, du Cu, du Sn, du Zn, du Mn et les engrais sont composés de Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn [14]. En plus, les populations traversent la lagune à l'aide d'embarcations motorisées. Ces embarcations utilisent du carburant dont les résidus sont déversés dans les eaux. Calamari et Naeve [14] notent que les carburants contiennent du Ni, du Hg, du Cu, du Fe, du Mn, du Pb et du Cd. La zone d'étude comprend plusieurs fermes. Une partie des déjections des animaux est utilisée comme engrais dans les plantations et le reste est rejeté dans la nature. La lagune est un lieu d'aisance pour les populations riveraines. Concentrés dans les excréments, les métaux lourds finissent leur parcours dans l'environnement aquatique. Des décharges sauvages sont visibles sur les bords de la lagune. Le lessivage des déchets domestiques constitue une source principale des métaux lourds. Ces éléments se retrouvent dans tous les compartiments des déchets ménagers [46].

Les travaux d'Aulin et *al.* [47] montrent que les concentrations en Cu, Cd, Zn, Pb et Hg sont 5 à 127 fois plus importantes dans les décharges que dans les sols. Les métaux lourds sont fixés à divers types de matières organiques (organismes, détritiques, pellicule organique à la surface des particules). En milieu oxydant, les matières organiques sont dégradées et elles relarguent ces métaux [48].

5. Conclusion

Les eaux de la lagune Aghien sont soumises à une pression anthropique se traduisant par un enrichissement des métaux lourds dans les sédiments. La fraction fine ($\leq 63 \mu\text{m}$) de sédiments de surface de cette lagune présente des teneurs moyennes en Fe, Pb, Cd, Al et Zn inférieures à celles des sédiments non pollués, avec respectivement $646,32 \text{ mg.kg}^{-1}$, $1,41 \text{ mg.kg}^{-1}$, $0,03 \text{ mg.kg}^{-1}$, $24182,05 \text{ mg.kg}^{-1}$ et $29,25 \text{ mg.kg}^{-1}$. Par contre, les teneurs moyennes en Cu et Hg dans cette fraction, sont très élevées et supérieures aux normes admises, avec $145,71 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour Cu et $0,54 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour Hg. A part le fer qui a une source terrigène, tous ces métaux connaissent un enrichissement d'origine anthropique. Cette contamination métallique est due à l'intensification des activités agricoles dans la zone et le déversement des déchets domestiques dans les eaux de la lagune. L'enrichissement des métaux lourds dans les sédiments de la lagune Aghien souligne la nécessité de la protection de ce milieu pour préserver la ressource en eau, pour protéger les espèces vivantes et pour éviter des problèmes de santé publique.

Remerciements

Nous exprimons nos sincères remerciements aux Docteurs BAMBA Barthélémy Siaka et AKE Assi Yolande respectivement Directeur du Centre de Recherches Océanologiques (CRO) et du Laboratoire Central pour l'Hygiène Alimentaire et l'Agro-industrie (LCHAI) qui ont mis à notre disposition les laboratoires au sein desquels toutes les analyses ont été effectuées.

Références

- [1] – DHH .Hydraulique Humaine en Côte d'Ivoire. Ministère des Infrastructures Economiques, Direction de l'Hydraulique Humaine, Abidjan, (2001) 66.
- [2] – J. P. JOURDA, K. J KOUAMÉ, M. B. SALEY, B. H. KOUADIO, Y. S. OGA. Contamination of the Abidjan aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection. In: Groundwater pollution in Africa (Edited by Yongxin X. and Brent U.), Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, (2006)293-302.
- [3] - K. E. AHOUSI K. E., N. SORO, G. SORO, T. LASM, M. S. OGA, S. ZADE. Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of_Abidjan (Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, 20, 2(2008) 302-316.
- [4] - K. DONGO, K. F. KOUAME, B. KONE. Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, 8, 3(2008), [En ligne] mis en ligne le 21 décembre 2008. URL:<http://vertigo.revues.org/index6252.html>.

- [5] - D. J. ROUX, J. L. NEL, P. J. ASHTON, A. R. DEACON, M. F. C. DE, D. HARDWICK, L. HILL, C. J. KLEYNHANS, G. A. MAREE, J. MOOLMAN, R. J. SCHOLE. Designing protected areas to conserve riverine biodiversity: Lessons from a hypothetical redesign of the Kruger National Park. *Biological Conservation*, 141, (2008)100 - 117.
- [6] - C. BOUCHESEICHE, E. CREMILLE, T. PELTE, K. POJER. Bassin Rhône — Méditerranée — Corse. Guide technique n°7, Pollution toxique et écotoxicologie : notion de base. Lyon, Agence de l'Eau Rhône — Méditerranée - Corse, (2002)83.
- [7] - K. M. YAO, M. B. SORO, A. TROKOUREY. Y. BOKRA. Assessment of Sediments Contamination by Heavy Metals in aTropical Lagoon Urban Area (Ebrié Lagoon, Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, 34, 2(2009)280 -289.
- [8] - P. SZEFER, G. P. GLASBY, D. STÜBEN, A. KUSAK, J. GELDON, Z. BERNER, T. NEUMANN, J. WARZOCHA. Distribution of selected heavy metals and rare earth elements in surficial sediments from the polish sector of the Vistula Lagoon. *Chemosphere*, 39, 15(1999)2785-2798.
- [9] - L. G. BELLUCCI, M. FRIGNANI, D. PAOLUCCI, M. RAVANELLI. Distribution of heavy metals in sediments of the Venice Lagoon: the role of the industrial area. *Science of the total Environment*, 295, 1-3(2002)35-49.
- [10] - G. P. GLASBY, P. SZEFER, J. GELDON J., J. WARZOCHA. Heavy-metal pollution of sediments from Szczecin Lagoon and the Gdansk Basin, Poland. *Science total Environment*, 330, 1-3(2004)249-269.
- [11] - M. MAANAN, B. ZOURARAH, C. CARRUESCO, A. AAJJANE, J. NAUD. The distribution of heavy metals in the Sidi Moussa lagoon sediments (Atlantic Moroccan Coast). *Journal of African Earth Sciences*, 39,3-5(2004)473-483.
- [12] - L. EKOUE, T. EKOUE, K. J. N'DA, T. DJE. Variations Temporelles des Paramètres Physicochimiques et Biotiques de Deux Écosystèmes Aquatiques de la Lagune Ebrié. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, 58, 3(2011)414-422.
- [13] - C. DELOR, I. DIABY, Y. SIMEON, M. ADOU, B. Z. ZAMBLE, J-P. TASTET, B. YAO, G. KONAN, J-C. CHIRON, A. DOMMANGET. Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, 1^{ère} Edition, Feuille GRAND-BASSAM, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte d'Ivoire, (1992).
- [14] - D. CALAMARI, H. NAEVE. Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain. Document technique du CPCA, N°25, Rome, FAO, (1994)129.
- [15] - Y. RAVI, J. MUDRY. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères du socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Hydrogéologie*, 1, (1997)13-21.
- [16] - J. MUDRY, B. BLAVOUX. Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur les variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères Karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*, 1, (1986)53-59.
- [17] - M. MARCHAND, J-L. MARTIN. 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(1985)25-39.
- [18] - C. BILOS, J. C. COLOMBO, C. N. SKORUPTA, M. J. R. PRESA. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental Pollution*, 111, (2001)149-158.
- [19] - G. WECKWERTH. Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany). *Atmospheric Environment*, 35, (2001)5525-5536.
- [20] - Y. GAO, E. D. NELSON, M. P. FIELD, Q. DING, H. LI, R. M. SHERRELL, C. L. GIGLIOTTI, D. A. V. RY, T. R. GLENN, S. J. EISENREICH. Characterization of atmospheric trace elements on PM_{2.5} particulate matter over the New-York - New Jersey harbor estuary. *Atmospheric Environment*, 36, (2002)1077-1086.

- [21] - E. MANOLI, D. VOUTSA, C. SAMARA. Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, 36,(2002) 949-961.
- [22] - J. CYRYS, M. STÖLZEL, J. HEINRICH, W. G. KREYLING, N. MENZEL, K. WITTMACK, T. TUCH T., H. E. WICHMANN. Elemental composition and sources of fine and ultrafine ambient particles in Erfurt, Germany. *The Science of the Total Environment*, 305, (2003)143-156.
- [23] - I. SENARATNE, D. SHOOTER. Elemental composition in source identification of brown haze in Auckland, New Zealand. *Atmospheric Environment*, 38, (2004)3049-3059.
- [24] - A. ARDITSOGLOU, C. SAMARA. Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study. *Chemosphere*, 59, 5(2005)669-678.
- [25] - M. K. BLOUNDI. Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des facteurs anthropiques. Thèse de Doctorat, 215 p. Université Mohamed V- Agdal, Maroc, (2005).
- [26] - L. LAMAISON. Caractérisation des particules atmosphériques et identification de leurs sources dans une atmosphère urbaine sous influence industrielle. Thèse de Doctorat 351 p. Université des Sciences & Technologies de Lille, France (2006).
- [27] - C. REIMANN, P. D. CARITAT. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337, (2005)91-107.
- [28] - K. H. WEDEPOHL. The composition of continental crust. *Goechimica and Cocomochimica Acta*, 59, 7(1995)1217-1232.
- [29] - A. R. KARBASSI, G. R. NABI-BIDHENDI, I. BAYATI. Environmental geochemistry of heavy metals in a sediment core off bushehr, Persian Gulf. Iran. *J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 2, 4(2005)255-260.
- [30] - A. S. COULIBALY, S. MONDE, V. A. WOGNIN, K. AKA. State of anthropic pollution in the estuary of Ebrie lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the Metal Elements Traces. *European Journal of Scientific Research*, 19, 2(2008)372-390.
- [31] - P. DUFOUR. Les frontières naturelles et humaines du système lagunaire Ebrié. Incidences sur l'hydroclimat. *Hydrobiologia* 94, (1982)105-120.
- [32] - K. S. KONAN, A. M. KOUASSI, A. A. ADINGRA, B. K. DONGUI, D. GNAKRI. Variations Saisonnières des Paramètres Abiotiques des Eaux d'une Lagune Tropicale: La Lagune de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X, 21, 3(2008)376-393.
- [33] - H. BOURSIER. Etude et modélisation des processus biologiques au cours du traitement aérobie du lisier de porcs en vue d'une optimisation du procédé. Thèse de Doctorat 190 p, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France (2003).
- [34] - S. GHIZELLAOUI, S. GHIZELLAOUI. Evaluation of the qualityof waters treated by the activated muds station in Oued El Athmania, *Desalination*, 250, 1(2010)438-443.
- [35] - D. OTEKO. Analysis of some major and trace metals in the sediments of Gazi, Makupa and Tudor creeks of the Kenyan coast: A comparative investigation into the anthropogenic input levels. M. Sc. Thesis 112 p. Free University of Brussels, Belgium (1987).
- [36] - R. K. KAID. Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia. Thèse de Doctorat 193 p, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia — Marrakech, Maroc (2009).
- [37] - S. KRIBI. Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage. Thèse de Doctorat 220 p. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France (2005).

- [38] - K. STEAD-DEXTER, N. I. WARD. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater. *Science of the Total Environment*, 334-335(2004)271-277.
- [39] - P. K. LEE, Y. H. YU, S. T. YUN, B. MAYER. Metal contamination and solid phase partitioning of metals in urban roadside sediments. *Chemosphere*, 60, 5(2005)672-689.
- [40] - J. PEMPKOWIAK, A. SIKORA, E. BIERNACKA. Speciation of heavy metals in marine sediment vs their bioaccumulation by mussels. *Chemosphere*, 39(1999)313-321.
- [41] - J. F. THOMASSIN, S. TOUZE, P. BARANGER, P. FREYSSINET. Le mercure et ses composés. Comportement dans les sols, les eaux et les boues de sédiments. Rapport final BRGM/RP-51890-FR, (2003)119.
- [42] - M. R. KALANTARI, A. G. EBADI. Geochemical assessment of some heavy metal levels in Neka river sediments - Neka city, Iran. *Journal of Applied Sciences*, 6, 5(2006)1017-1019.
- [43] - C. NOWAK, J. R. MOSSMANN, A. SAADA. Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. Rapport final BRGM/RP-51960-FR, (2003)97.
- [44] - U. FORSTNER, G. T. W. WITTMANN. Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, (1979)486.
- [45] - P. DUFOUR, J. LEMOALLE, J. J. ALBARET. Le système Ebrié dans les typologies lagunaires : in Environnement et ressources aquatiques de Côte-d'Ivoire. Tome II-Les milieux lagunaires, Editions de l'ORSTOM, Paris, France (1994)17-24.
- [46] - G. MIQUEL. Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. 2979 Assemblée Nationale, (2001)366.
- [47] - C. AULIN, S. BOZKURT, L. MORENO, N. I. OCH. The influence of humic substances on the long term mobility of toxic metals. In *Sardinia 97* (Christensen, T., Cossu, R. & Stegman, R., eds) Proceedings of the Sixth International landfill Symposium, Cagliari, Italy, (1997)267-278.
- [48] - V. COLANDINI. Effets des structures réservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales : Qualité des eaux et devenir des métaux lourds. Thèse de Doctorat 254 p, Université de Pau et des pays de l'Adour, France (1997).