



Étude des éléments traces métalliques contenus dans les sédiments de la lagune de Porto-Novo (Sud Bénin)

Study of the metallic traces elements contained in the sediments of the lagoon of Porto-Novo (South Benin)

^{1,2}CHOUTI Waris*, ^{1,2}MAMA Daouda, ²CHANGOTADE Odilon, ¹ALAPINI François et ²BOUKARI Moussa

¹Laboratoire de Chimie Inorganique et de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques (FAST), Université d'Abomey-Calavi BP : 4521 Cotonou Bénin

²Laboratoire d'Hydrologie Appliquée Faculté des Sciences et Techniques (FAST), Université d'Abomey-Calavi01 BP : 526 Cotonou Bénin

*Auteur correspondant e-mail : lawaniwaris@yahoo.fr Tél : 00229 97 48 73 20

Original submitted on 19th July 2010. Published online at www.biosciences.elewa.org on October 7, 2010

RESUME

Objectifs : Analyser les Eléments Traces Métalliques (fer, manganèse, chrome, cadmium, plomb, arsenic et mercure) dans les sédiments de la lagune de Porto-Novo suivant les quatre saisons de l'année.

Méthodologie et résultats : Les sédiments sont prélevés au moyen d'une benne Schipecck permettant de recueillir les sédiments de 0 à 5cm. Les métaux (Fe, Cd, Pb, Cr, Mn) ont été analysés par la méthode des kits MERCK au spectrophotomètre NOVA 60. Le mercure a été déterminé d'après la méthode de pré concentration à la vapeur froide suivie d'un dosage colorimétrique au spectrophotomètre HACH DR2800. L'arsenic a été déterminé par la méthode des kits à l'Arsenator Wagtech Wag-WEI 0500. La matière organique a été déterminée selon la méthode de Walkey et Black et l'azote selon la méthode de Kjeldahl. Le traitement des données a été fait avec le logiciel SPSS 12. Les variations saisonnières sont les mêmes à tous les points pour le fer, le manganèse et le chrome. Les concentrations ont été les plus élevées lors de la période de basses eaux suivies de celles de la saison des pluies. Ces trois métaux semblent être liés par une même source de pollution : les déchets urbains. Les valeurs relativement élevées du plomb, du cadmium, de l'arsenic et du mercure obtenues au Canal de Totchè montrent que le lac Nokoué est une source de contamination de la lagune. Les résultats ont également montré que les eaux de ruissellement constituent une des sources de contamination de la lagune et de ses sédiments.

Conclusions et applications : Ces résultats pourraient servir de base aux politiques environnementales nationales et autres qui visent à protéger les lagunes côtières et les organismes qui y vivent.

Mots-clés : lagune, pollution, métaux lourds, Porto-Novo, sédiments

ABSTRACT:

Objectives: To study the concentration of metals (iron, manganese and chromium, cadmium, lead, arsenic and mercury) in the sediments of the Porto-Novo lagoon during the four seasons of the year.

Methodology and results: The sediments were sampled using a Schipecck tube which helps to collect sediments of between 0 to 5cm. The metals (Fe, Cd, Pb, Cr and Mn) were analyzed by the method of MERCK kits with the spectrophotometer NOVO 60. The mercury was determined using the preconcentration method cold vapor followed by a colorimetric dosage with the spectrophotometer HACH DR2800. Arsenic metal was determined by the method of hits with the Arsenator Wagtech Wag-WEI 0500.



The organic matter was determined with the method of Walkey and black and nitrogen was determined by the method of the Kjeldahl. The treatment of data was made by software SPSS 12. Seasonal variations are the same at all points for iron, manganese and chromium. The concentrations increased at the period rainy season. These three metals (iron, manganese and chromium) seem to be linked by the same source of pollution: wastes from residential areas. The results also showed that flowing waters and the Totchè canal (Lake Nokoué) constitute the sources of contamination of the lagoon and its sediments.

Conclusion and application: The results could serve as a basis for national policies and other environmental policies designed to protect the coastal lagoons and living organisms.

INTRODUCTION

La contamination des écosystèmes aquatiques par les métaux demeure un sérieux problème d'environnement de plus en plus inquiétant (Reyms-Keller et al, 1998). Ils sont présents dans tous les compartiments de l'écosystème aquatique (eau, sédiment, faune et flore) (Langstone, 1999). Les sédiments sont donc souvent étudiés comme réservoirs ou puits de nombreux polluants chimiques (Yao et al, 2009). Ils sont des pièges à micropolluants, ils donnent une indication de la pollution historique du cours d'eau [Boucheseche., 2002]. C'est pour ces différentes raisons qu'ils ont été étudiés par plusieurs auteurs dans le cadre des recherches sur la qualité des cours d'eau, lagunes et lacs. Yao et al. (2009) ont étudié les sédiments de la lagune d'Ebrié (Côte d'Ivoire) et sont parvenus à la contamination par le plomb, le

cuivre et le zinc. Par contre, Yacoub et al. (2009) en étudiant les sédiments de la lagune de Fresco ont-ils montré que cette lagune n'est pas contaminée par les métaux lourds, et aussi que ces sédiments proviennent essentiellement des apports continentaux et océaniques.

Les rares études de pollution chimique effectuées sur la lagune de Porto-Novo n'ont été que ponctuelles. Dans le but de connaître l'état de pollution de la lagune, nous avons choisi, entre autres, d'étudier les métaux suivants le fer, le chrome, le manganèse, le plomb, le cadmium et le mercure dans les sédiments prélevés à six points suivant les quatre périodes de l'année : saison sèche, période de basses eaux, saison des pluies et période de hautes eaux.

MATERIELS ET METHODES

Prélèvement des échantillons : Les six points de prélèvements ont été choisis en tenant compte des déversements domestiques, eaux de ruissellement et apport du Lac Nokoué (tableau 1). Les prélèvements sont effectués comme indiqués suivant les saisons de l'année : le 29 novembre 2008 (petite saison

pluvieuse), le 07 mars 2009 (grande saison sèche), 29 juin 2009 (début de la grande saison des pluies) et 07 septembre 2009 (fin de la grande saison des pluies qui correspond à la période des grandes eaux de la lagune).

Tableau 1 : Sites de prélèvements des sédiments de la lagune

Sites	Nom	Raisons du choix du site	Coordonnées géographiques
1	L'embarcadère de Djassin	Il permet d'apprécier l'influence du trafic humain et des marchandises partant de ce point à destination des Aguégus.	N06°28'28.6" E002°35'27.7"
2	Bouédomey,	Situé au milieu de la lagune ce point constituait une source d'approvisionnement en eau des populations des Aguégus, ses eaux ne sont jamais salées selon les propos des riverains.	N06°29'49.9" E002°34'13.3"
3	Canal de Totchè	C'est par ce point que communique le Lac Nokoué avec la lagune. Il permettra de mesurer donc l'apport	N06°27'14.5" E002°34'51.3"

4	Douane Topka	du Lac Nokoué Il permet de mesurer l'apport du petit marché situé non loin du pont de Porto-Novo.	N06°27'59.4" E002°37'21.4"
5	SONICOG	SONICOG est une industrie de fabrication de savon situé non loin de la lagune. Donc il s'agit de mesurer l'influence d'éventuels rejets.	N06°27'45.1" E002°38'25.4"
6	Hôtel Beau Rivage	C'est un complexe hôtelier	N06°28'14.4" E002°36'18.4"

Les échantillons de sédiments sont prélevés au moyen d'une benne Schipeck permettant de recueillir les sédiments de 0 à 5cm.

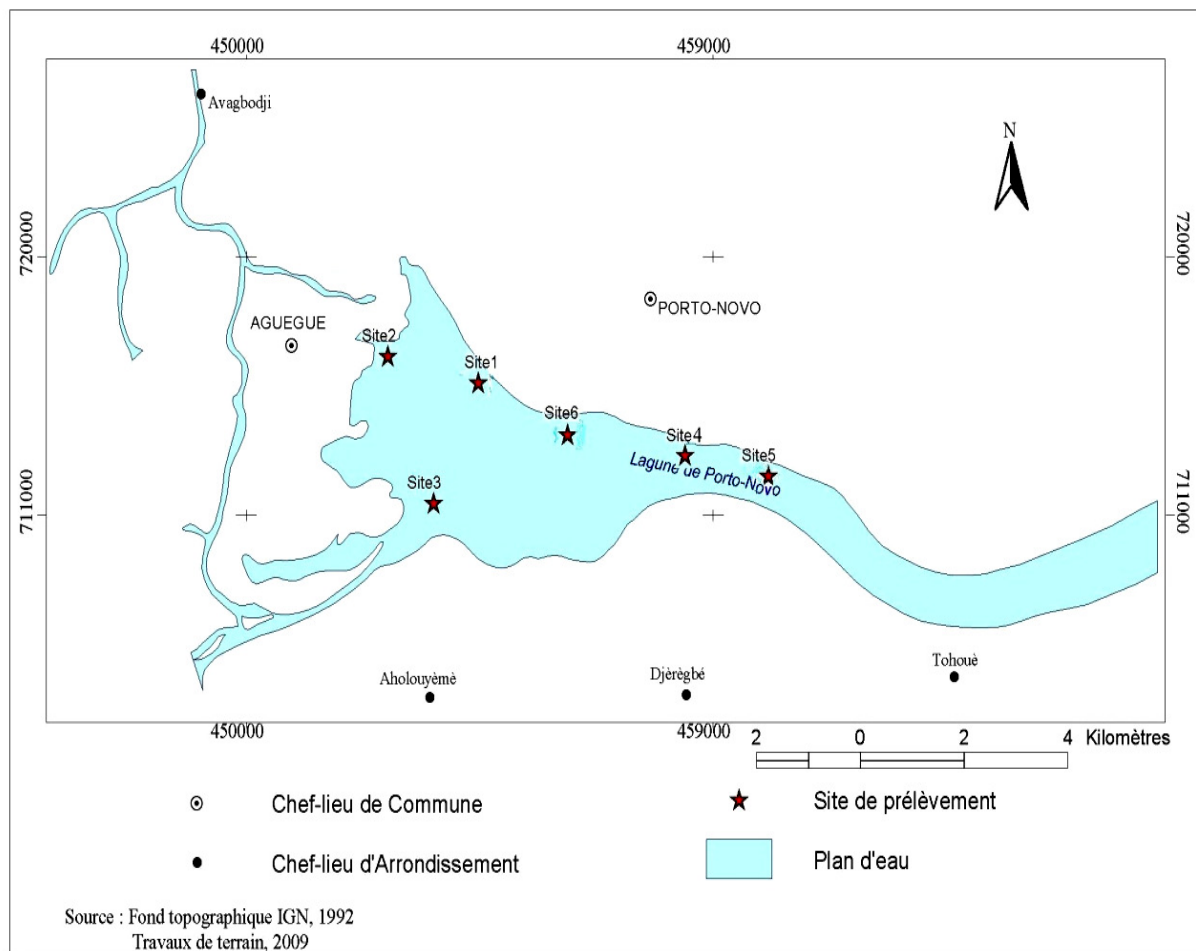


Figure 1 : Répartition des sites de prélèvement

Produits, matériels et méthodes : Les sédiments ont été séchés au laboratoire à l'air libre pour éliminer l'humidité tout en évitant toute détérioration avant la minéralisation. Les métaux (Fe, Cd, Pb, Cr, Mn) ont été analysés par la méthode des kits MERCK au spectrophotomètre NOVA 60. Le mercure a été déterminé d'après la méthode de pré concentration à la

vapeur froide suivie d'un dosage colorimétrique au spectrophotomètre HACH DR2800. L'arsenic a été déterminé par la méthode des kits à l'Arsenator Wagtech Wag-WEI 0500. La matière organique a été déterminée selon la méthode de Walkey et Black et l'azote selon la méthode de Kjeldahl.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Analyse des cations des sédiments :

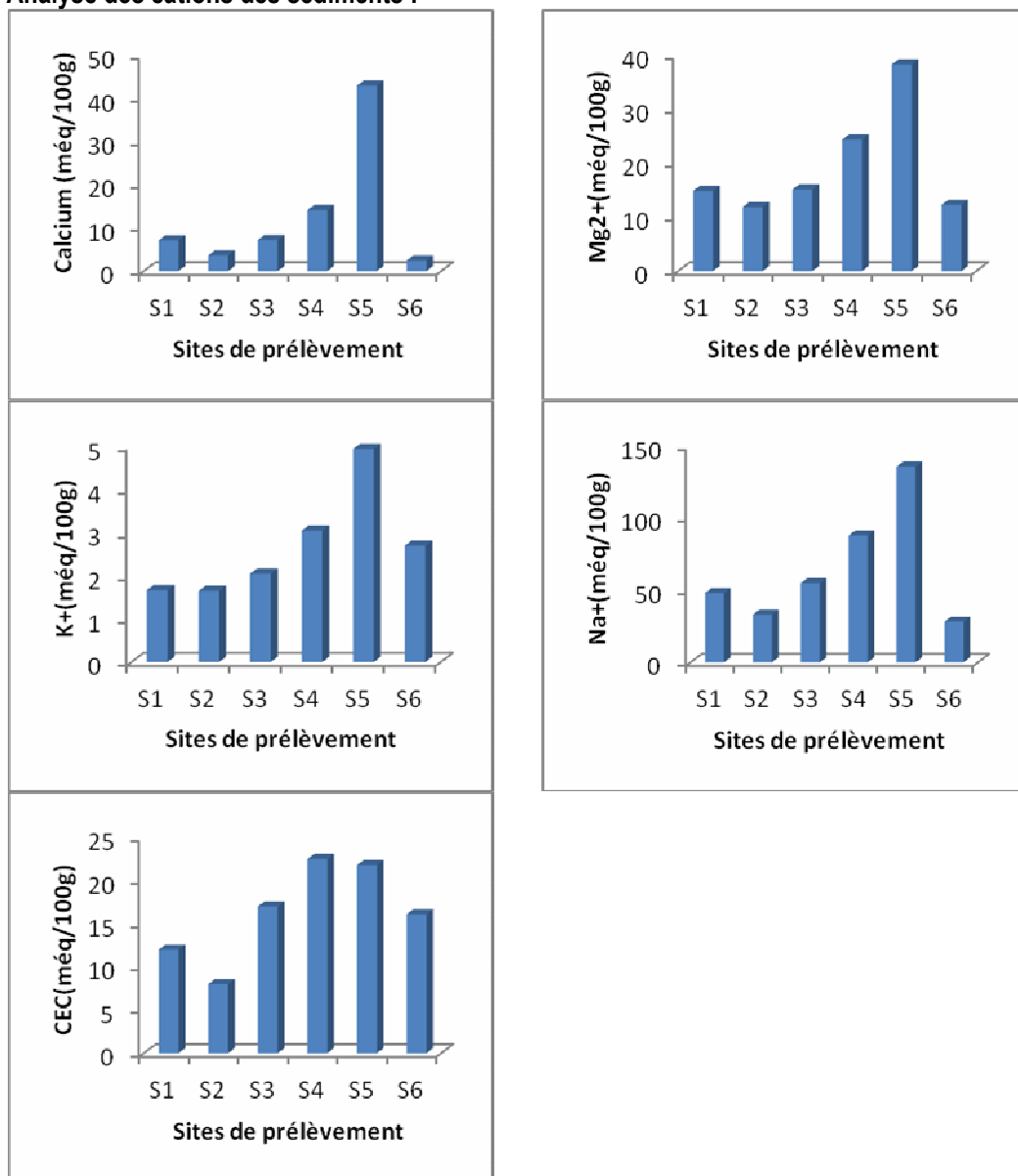


Figure 2 : Composition en cations des sédiments

On constate que les valeurs élevées pour les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ sont observées au niveau des sédiments de S5 (SONICOG). Ce point est situé derrière une usine de fabrication de savons. On peut

donc penser à une pollution due aux usées industrielles contenant des rejets des différents produits utilisés par cette usine. A l'opposé, les sédiments de S2 (Bouédomey) sont les moins riches.

Analyse des matières organiques et phosphore :

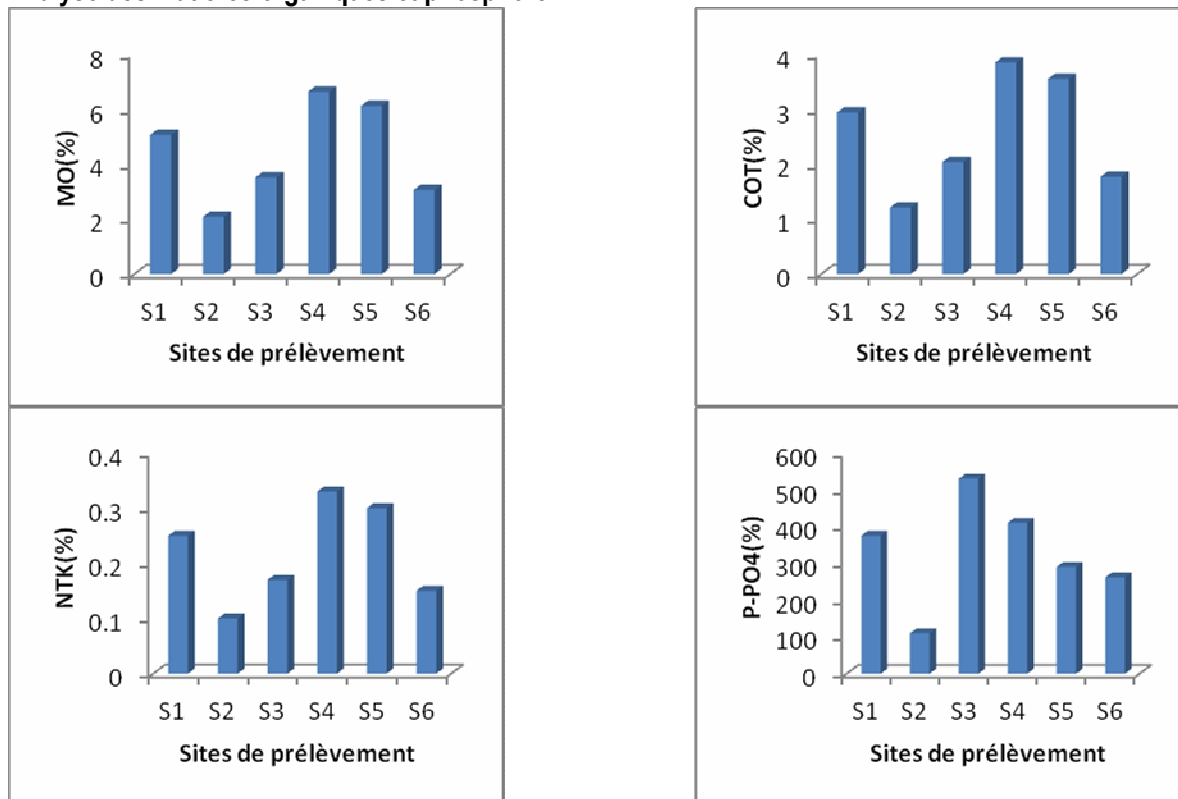


Figure 3 : Analyse des matières organiques et phosphore

Les taux de matières organiques et d'azote sont plus élevés dans le sédiment de S4 (Douane Topka). Par

contre, c'est au niveau du sédiment S3 (Canal de Totchè) que le taux de phosphore est plus élevé.

Ordre de gradeur des concentrations des métaux :

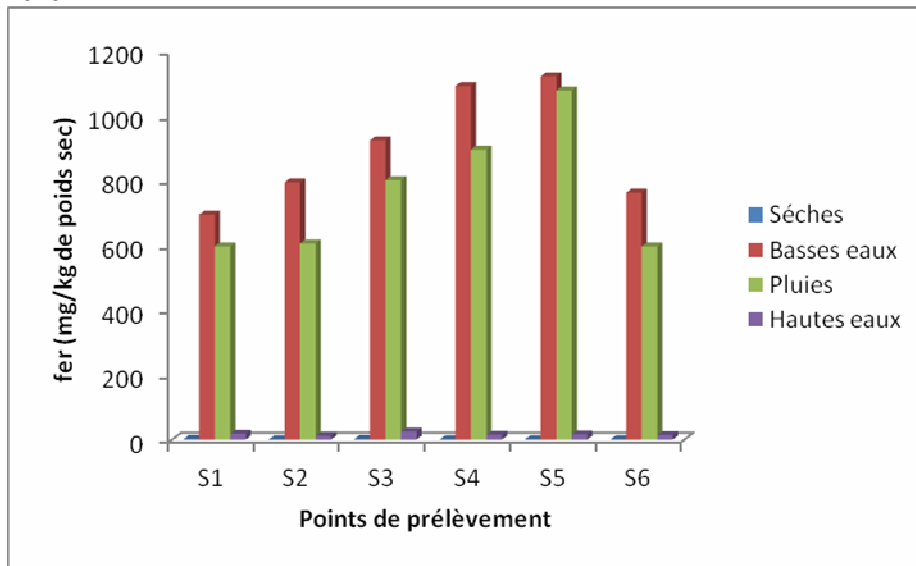
Tableau 2 : Moyennes annuelles des teneurs en métaux lourds des sédiments

Métaux	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Valeur seuil*
Fe (mg/kg)	328	354	438	501	555	344	
Mn (mg/kg)	98	80	116	118	94	80	
Cr (mg/kg)	91	125	97	210	149	147	37,3
Cd (mg/kg)	6,04	5,39	7,33	6,68	5,52	6,00	0,6
Pb (mg/kg)	8,39	3,52	41,12	25,72	12,95	60,62	35,0
Hg (µg/kg)	1,30	1,80	2,67	2,73	0,90	1,27	0,17
As (µg/kg)	0,30	0,27	0,40	0,33	0,22	0,20	5,9

*Conseil canadien des ministres de l'environnement. 1999. Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments : protection de la vie, dans *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 1999, Winnipeg, le Conseil.

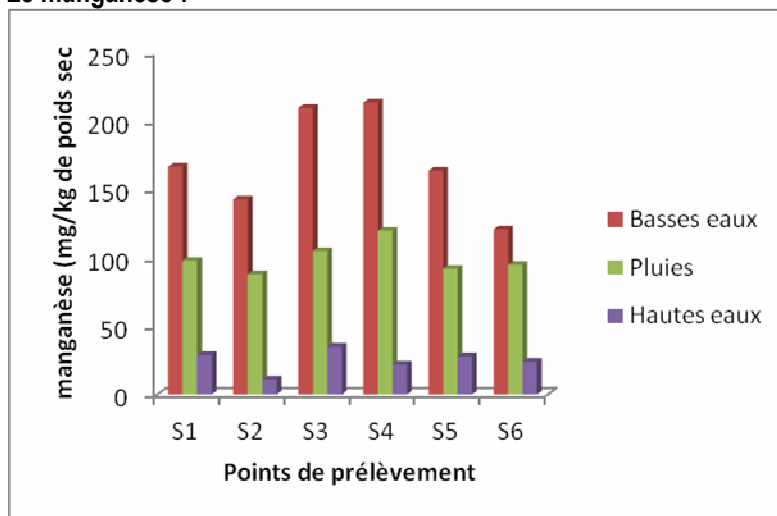
Les sédiments de la lagune sont très riches en fer. Les valeurs varient entre 328 à 555mg/kg de poids sec. La valeur maximale est obtenue au site S5. Le site S4 est riche en fer et présente les valeurs maximales en chrome et en manganèse. Ce site est situé non loin

d'un dépôt d'ordures qui est probablement la source de contamination due aux eaux de ruissellement. Les valeurs moyennes annuelles obtenues à tous les sites dépassent les valeurs seuils pour le chrome, le cadmium et le mercure.

Le fer :**Figure 4 :** Variations saisonnières de la teneur en fer des sédiments

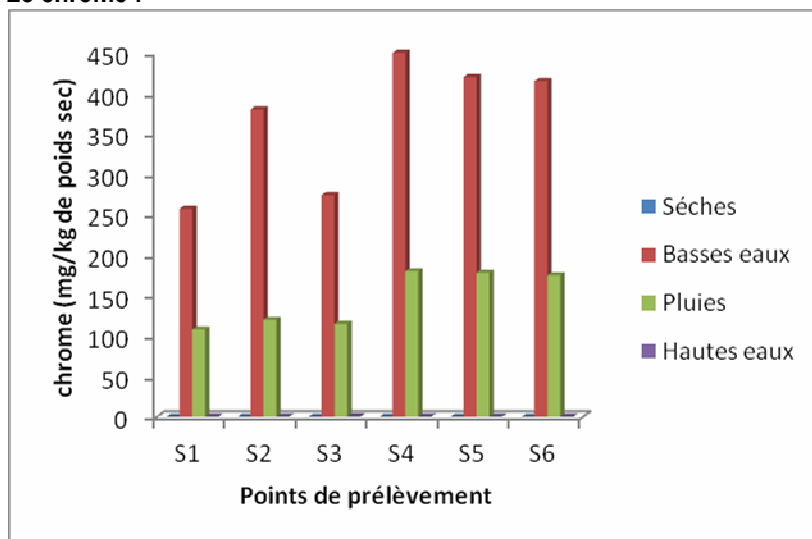
Les variations saisonnières sont les mêmes à tous les points. Les concentrations ont été les plus élevées lors

de la période de basses eaux. Après la période de basses eaux, vient la saison des pluies.

Le manganèse :**Figure 5 :** Variations saisonnières de la teneur en manganèse des sédiments

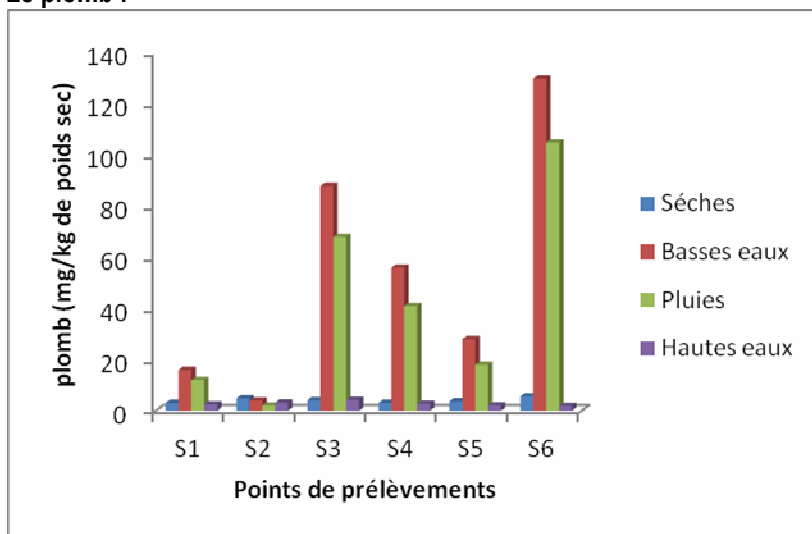
Le manganèse n'a pas été analysé lors de la première de la saison sèche. On constate que, tout comme pour le fer, les concentrations ont été les plus élevées lors

de la période de basses eaux. Après cette période, vient la saison des pluies.

Le chrome :**Figure 6 :** Variations saisonnières de la teneur en chrome des sédiments

Les variations observées sont les mêmes pour le fer, le manganèse et le chrome. Les concentrations sont très élevées pendant la période de basses eaux et saison des pluies par rapport à la saison sèche et la période des hautes eaux. Ces trois métaux (Fe, Mn, Cr)

semblent être liés par une même source de contamination : les déchets. De même, les concentrations élevées constatées pendant la saison des pluies indiquent une pollution causée essentiellement par les eaux de ruissellement.

Le plomb :**Figure 7 :** Variations saisonnières de la teneur en plomb des sédiments

Les valeurs maximales au cours de la saison sèche (5,65 mg/kg), de la période de basses eaux (130 mg/kg) et de la saison des pluies (105 mg/kg) sont obtenues au site S6 situé non loin d'un centre hôtelier

(Beau Rivage). Ces valeurs sont suivies de celles du site S3 (Canal de Totché).

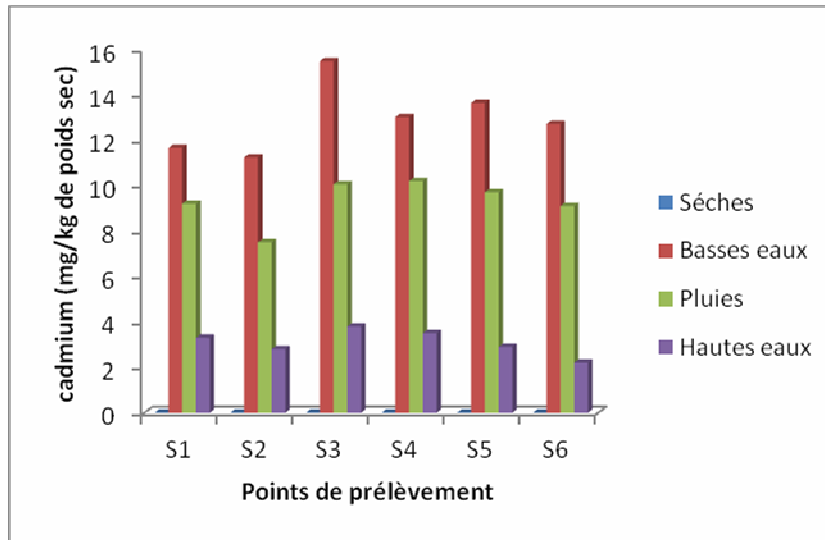
Le cadmium :

Figure 8 : Variations saisonnières de la teneur en cadmium des sédiments
Les valeurs de cadmium sont également élevées au site S3 (Canal de Totchè) tout comme pour le plomb.

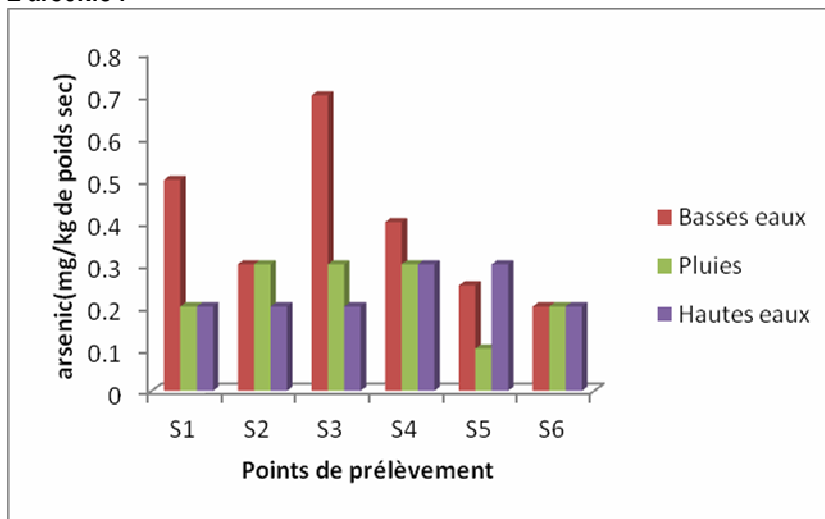
L'arsenic :

Figure 9 : Variations saisonnières de la teneur en arsenic des sédiments

Les valeurs élevées en période de basses eaux sont obtenues au site S3 (Canal de Totchè) tout comme pour le plomb et le cadmium. Ce canal est le point de

communication entre le lac Nokoué et la lagune. Le lac Nokoué constituerait une source de pollution pour la lagune.

Le mercure :

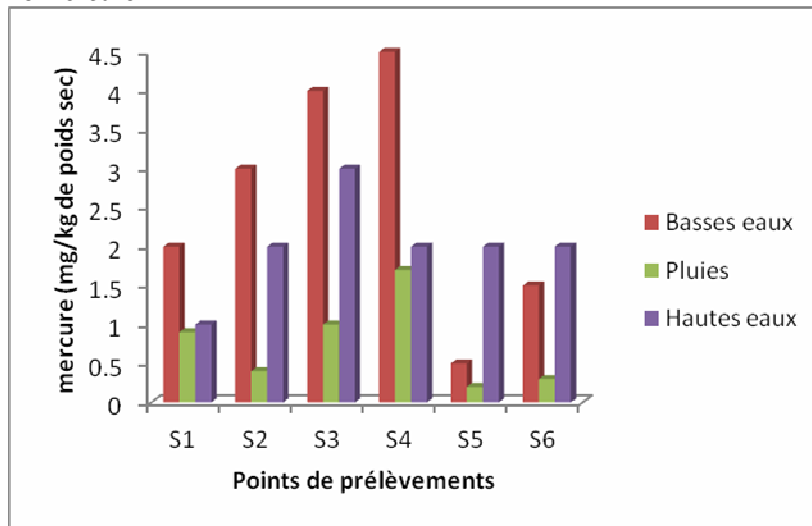


Figure 10 : Variations saisonnières de la teneur en mercure des sédiments

Les variations saisonnières sont les mêmes à tous les points sauf au point S5. Les concentrations ont été les

plus élevées lors de la période de basses eaux suivies de celles de la période de hautes eaux.

Relations entre les métaux : Le coefficient de corrélation détermine la relation entre deux variables et mesure l'intensité de ce lien. Il varie entre -1 et +1. Lorsqu'il est égal à 1, il indique un lien parfait entre les variables et lorsqu'il est égal à 0, il indique une absence de lien. Le signe + signifie que la relation est proportionnelle alors que le signe - signifie que la

relation est inversement proportionnelle. Le calcul du coefficient de corrélation permet d'avoir une idée sur les éventuelles relations entre métaux : origine commune, distribution homogène, comportement identique vis-à-vis des processus physicochimiques, fractionnement similaire, influence de l'un sur l'autre.

Tableau 3 : Matrice de corrélations entre les métaux des sédiments et les paramètres physicochimiques des eaux de la lagune

	Cr	As	Fe	Hg	Mn	Cd	Pb	T°C	pH	Cond	O ₂	Turb	MES	Coul	Trans
Cr	1	0,32	0,88	0,24	0,88	0,89	0,60	0,36	-0,10	-0,58	0,20	-0,34	-0,29	-0,35	0,58
As		1	0,29	0,61	0,63	0,50	0,23	0,31	0,26	-0,50	0,39	-0,51	-0,46	-0,51	0,32
Fe			1	-0,01	0,88	0,94	0,57	0,26	-0,08	-0,32	0,19	0,02	0,08	0,03	0,30
Hg				1	0,35	,155	0,04	0,13	0,29	-0,27	0,21	-0,40	-0,41	-0,50	0,16
Mn					1	0,95	0,50	0,83	0,15	-0,64	0,72	-0,47	-0,40	-0,49	0,46
Cd						1	0,65	0,12	-0,06	-0,40	0,08	-0,05	0,02	-0,04	0,36
Pb							1	0,30	0,15	-0,25	0,33	0,01	0,05	0,03	0,13
T°C								1	0,45	-0,27	0,83	-0,37	-0,32	-0,41	0,26
pH									1	0,46	0,75	0,19	0,23	0,09	-0,19
Cond										1	0,13	0,73	0,72	0,69	-0,70
O ₂											1	-0,12	-0,08	-0,17	0,05
Turb												1	0,97	0,98	-0,83
MES													1	0,97	-0,81
Coul														1	-0,83
Trans															1

Corrélations significatives ($p < 0,05$) en gras

On note une bonne corrélation entre le fer, le manganèse, le cadmium, le chrome et le plomb. Par contre, le mercure qui est fortement lié à l'arsenic n'est-il pas lié à aucun de ces cinq métaux. Le mercure serait donc lié à une source de contamination différente de celle de ces cinq métaux.

Le manganèse est positivement associé à la température et l'oxygène dissous alors qu'il est négativement avec la conductivité, la turbidité et la couleur. La turbidité, les MES et la couleur sont fortement liés. Cela se justifie par le fait que les MES sont non seulement responsables de la couleur mais

également leur présence trouble l'eau. De même, la conductivité est-elle aussi corrélée avec ces trois paramètres. Les MES sont donc des espèces ioniques qui augmentent le pouvoir ionique des eaux de la lagune. Tout ceci justifie la raison pour laquelle la transparence de l'eau est faible lorsque ces quatre paramètres sont élevés (les coefficients de corrélation entre la transparence et chacun des quatre paramètres sont significativement négatifs). On constate également que le pH, l'oxygène dissous et la température sont associés.

DISCUSSIONS

Les produits chimiques libérés dans l'environnement sous l'effet de processus naturels ou par suite d'activités anthropiques peuvent pénétrer dans les écosystèmes aquatiques et s'intégrer dans les matières en suspension. Ces particules se déposent au fil du temps sur les matériaux de fond, où les contaminants peuvent s'accumuler. Les sédiments peuvent donc constituer, par le phénomène de relargage, une source endogène de pollution des cours d'eau. Pour ce fait, les polluants contenus dans ces sédiments représentent un énorme danger pour les organismes aquatiques. C'est ce qui a amené certains états à fixer des valeurs seuils pour certains polluants, en occurrence les métaux, à ne pas dépasser dans les sédiments des cours d'eau afin de protéger les organismes qui y vivent. Les recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, protection de la vie aquatique, qui se sont basées sur des travaux de différents chercheurs sont une preuve des précautions à prendre pour une meilleure protection des organismes aquatiques. Les valeurs moyennes obtenues lors de cette étude pour le cadmium, le mercure et le chrome dépassent les valeurs seuils fixés dans ces recommandations à tous les sites et pour le plomb les valeurs seuils sont dépassées au niveau de deux sites.

Les conséquences néfastes qu'engendrent les métaux sur l'écosystème aquatique ne sont plus à démontrer. En effet, les effets biologiques néfastes répertoriés pour ces différents métaux comprennent une diminution de l'abondance des invertébrés benthiques et de la fécondation, un accroissement de la mortalité, la létalité, des modifications comportementales, un développement anormal dans les premiers stades de la vie des organismes benthiques (Environnement Canada, 1997, annexes IIa et IIb ; 1998, annexes IIa et IIb). Ainsi, les taxons relativement sensibles que sont

les éphéméroptères, les plécoptères et les trichoptères étaient peu abondants dans la baie de Penetang (lac Huron, en Ontario), où la concentration moyenne de cadmium était de 0,77 mg/kg, concentration qui dépasse la valeur seuil recommandée pour les sédiments d'eau douce, par rapport aux abondances observées à des endroits où la concentration de cadmium s'établissait à 0,38 mg/kg (Jaagumagi, 1988). De même, on a observé une augmentation de la mortalité, une diminution du réenfouissement et une hausse de l'émergence chez *Lepidactylus dytiscus*, un amphipode (Hall et coll., 1992).

De même, dans le port de Toronto, en Ontario, on a observé une diminution de l'abondance des gastéropodes et des chironomidés à des endroits où les concentrations moyennes de mercure atteignaient respectivement 0,987 et 1,09 mg/kg, valeurs qui correspondent à plus de cinq fois la valeur seuil recommandée pour les sédiments d'eau douce (Jaagumagi, 1988; Jaagumagi et coll., 1989). Ces organismes étaient toutefois relativement abondants à des endroits où l'on enregistrait des concentrations moyennes de 0,013 et de 0,009 mg·kg⁻¹ respectivement.

De plus, Ainsi, la diversité des espèces benthiques et l'abondance des amphipodes et des chironomidés dans le port de Toronto, en Ontario, étaient plus faibles aux endroits où la concentration moyenne de chrome s'établissait à 95 mg/kg, valeur qui dépasse les concentrations produisant un effet probable établies pour le chrome pour les sédiments d'eau douce, qu'à des endroits où les concentrations de chrome variaient entre 10,2 et 11 mg/kg. (Jaagumagi, 1988).

Donc les concentrations élevées du chrome, du cadmium et du mercure dans les sédiments de la lagune de Porto-Novo constituent donc un danger potentiel et font de ces sédiments une source



endogène de pollution. En effet, ces polluants métalliques passent dans la colonne d'eau lorsque les conditions sont favorables engendrant ainsi des effets néfastes sur la qualité des eaux et les organismes.

En outre, les taux de phosphore dans les sédiments expliquent la présence des macrophytes constatée dans la lagune. En effet, les macrophytes utilisent-ils

directement le phosphore contenu dans les sédiments pour leur développement.

Cette mauvaise qualité des sédiments associée à la mauvaise qualité des eaux explique en réalité la mortalité des poissons que signalent souvent les pêcheurs au large de la lagune.

CONCLUSIONS

Les variations saisonnières du fer, du manganèse et du chrome ont montré que les eaux de ruissellement constitueraient une source de contamination des sédiments de la lagune de Porto-Novo. Ces trois métaux sont significativement corrélés et semblent être liés à une même source de contamination : les déchets urbains. Les résultats ont également montré que les eaux de ruissellement et le Canal de Totchè (Lac Nokoué) constituent aussi des sources de contamination de la lagune et de ses sédiments. Les

concentrations en ions minéraux Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ sont plus élevées à la SONICOG qui utilise différents produits chimiques dans la fabrication des savons.

Ces différents résultats pourraient servir de base aux politiques environnementales nationales et autres qui visent à protéger les lagunes côtières et les organismes vivants qui y vivent. Ces résultats montrent l'urgence de la mise en place d'un système qui contrôle et traite les eaux usées avant le déversement dans la lagune.

REMERCIEMENT :

Les auteurs tiennent à remercier tout le personnel de l'Agence des Musulmans d'Afrique (AMA) pour avoir financé cette étude.

REFERENCES

- C Boucheseiche, Cremille E, Pelte T, Pojer K, 2002. Guide technique n°7, pollution toxique et écotoxicologie : notion de base. Lyon, Agence de l'eau Rhône – Méditerranée – Corse, 83pp.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement. 1999. Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments : protection de la vie, dans *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 1999, Winnipeg, le Conseil.
- Directive-cadre européenne, Circulaire 2005/12 relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (*cours d'eaux et plans d'eau*). Direction de l'eau, Ministère de l'écologie et du développement durable, République Française.
- Environnement Canada. 1997. Canadian sediment quality guidelines for cadmium: Supporting document. Service de la conservation de l'environnement, Direction générale de la science des écosystèmes, Direction de la qualité de l'environnement et de la politique scientifique, Division des recommandations et des normes, Ottawa.
- Environnement Canada. 1997. Canadian sediment quality guidelines for mercury: Supporting document. Service de la conservation de l'environnement, Direction générale de la science des écosystèmes, Direction de la qualité de l'environnement et de la politique scientifique, Division des recommandations et des normes, Ottawa.
- Hall, L.W., Jr., M.C. Ziegenfuss, S.A. Fischer, R.D. Anderson, W.D. Killen, R.W. Alden III, E. Deaver, J.W. Gooch et N. Shaw. 1992. A pilot study for ambient toxicity testing in Chesapeake Bay: Year two report. CBP/Trs 82/92. Préparé pour U.S. Environmental Protection Agency for the Chesapeake Bay Program. Contrat no. 68-WO-00-43. Préparé par University of Maryland System. Queensland, MD.
- I Yacoub, K Aka, B Dogui, Atoinette A, Jean B, 2009. Contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune côtière tropicale : lagune de Fresco (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences* 18 : 1009 – 1018.
- Jaagumagi, R. 1988. The in-place pollutants program. Volume V, Partie B. Benthic invertebrates studies results. Ministère de l'environnement



- de l'Ontario, Direction des ressources en eau, Section de biologie aquatique, Toronto.
- Jaagumagi, R., D. Persaud, T. Lomas. 1989. The in-place pollutants program, Volume V, Partie A. A synthesis of benthic invertebrates studies. Ministère de l'environnement de l'Ontario, Direction des ressources en eau, Section de biologie aquatique, Toronto.
- K Yao, M Soro, T Albert, Y Bokra, 2009 : Assessment of Sediments Contamination by Heavy Metals in Tropical Lagoon Urban Area (Ebrié Lagoon, Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, Vol. 34 No.2 (2009), pp. 280-289.
- M Lamizana-Diallo, S Kenfach, Millogo-Rasolodimby J, 2008. Evaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un cours d'eau temporaire du Burkina Faso – Le cas de Massili dans le Kadiogo. Sud Sciences et Tehnologies, No.16 (juin 2008).
- W. J Langstone, G. R Burt And Pope N. D, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 48 (1999) 519-540.

