

QUALITÉ ET POLLUTION DES EAUX D'UN HYDROSYSTÈME LITTORAL TROPICAL : CAS DU SYSTÈME LAGUNAIRE DE LOMÉ, TOGO

Massabalo Ayah

Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges Groupement de
Recherche Eau Sol Environnement (GRESE), Limoges Cedex, France
Faculté Des Sciences, Université de Lomé (FDS/UL), Laboratoire de Chimie
des Eaux (LCE), Lomé-Togo

Malgorzata Grybos

Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges Groupement de
Recherche Eau Sol Environnement (GRESE), Limoges Cedex, France

Lallébila Tampo

Limam Moctar Bawa

Faculté Des Sciences, Université de Lomé (FDS/UL), Laboratoire de Chimie
des Eaux (LCE), Lomé-Togo

Hubert Bril

Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges Groupement de
Recherche Eau Sol Environnement (GRESE), Limoges Cedex, France

Gbandi Djaneye-Boundjou

Faculté Des Sciences, Université de Lomé (FDS/UL), Laboratoire de Chimie
des Eaux (LCE), Lomé-Togo

Abstract

This study was conducted to evaluate the physicochemical quality and heavy metals (HM) in the water of Lomé lagoon system. The conductivity, pH, nitrogen, phosphorus, organic matter and HM were determined by AFNOR methods. The results showed that the waters of Lomé lagoon system have generally pH close to neutral (pH between 7.34 and 8.5). However, the balance of the water in the equilibrium canal has an acid pH (pH 6.53). The levels of nitrogen and phosphorus are relatively high 1.27 mg/L phosphorus against 0.15 mg/L in natural waters. Dissolved organic matter is higher at the site C₄ over the entire lagoon system. The East Lake E₃ and E₁ sites recorded a high rate of mineralization with 2536 mg/L of dissolved salts. The contents of the major ions such as Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ and HCO₃⁻ helped to highlight the nature of brackish water of Lomé lagoon system. The material suspended (77 mg/L) and turbidity (35

NTU) are also very high in the waters of the equilibrium canal. C₄ websites, C₂, E₃, O₁₁, O₅ and B₃ have recorded the highest levels of HM. This indicates a potential bioavailability of HM in the waters of Lomé lagoon system. The degree of contamination and the interrelationships between the physical and chemical parameters of water and metallic micropollutants were confirmed by Principal Component Analysis (PCA).

Keywords: Coastal lagoon, heavy metals, contamination, anthropogenic inputs, nutrients.

Résumé

Cette étude a été réalisée dans le but d'évaluer la qualité physicochimique et en éléments traces métalliques (ETM) des eaux du système lagunaire de Lomé (Togo). La conductivité électrique, le pH, l'azote, le phosphore, la matière organique et les ETM ont été déterminés par les méthodes AFNOR. Les résultats ont montrés que les eaux du système lagunaire de Lomé présentent un pH en général proche du pH neutre (pH entre 7,34 et 8,5). Cependant, les eaux du Canal d'équilibre ont un pH légèrement acide (pH 6,53). Les teneurs en azote et en phosphore sont relativement élevées 1,27 mg/L de phosphore contre 0,15 mg/L dans les eaux naturelles. La matière organique dissoute est plus élevée au niveau du site C₄ par rapport à l'ensemble du système lagunaire. Les sites E₃ et E₁ du lac Est ont enregistré un taux de minéralisation élevé avec 2536 mg/L de sels dissous. Les teneurs en ions majeurs tels que Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻ ont permis de mettre en évidence le caractère saumâtre des eaux du système lagunaire de Lomé. Les MES (77 mg/L) et la turbidité (35 NTU) sont également très élevées dans les eaux du Canal d'équilibre. Les sites C₄, C₂, E₃, O₁₁, O₅ et B₃ ont enregistrés les teneurs les plus élevées en ETM. Ce qui indique un risque potentiel de la biodisponibilité des ETM dans les eaux du système lagunaire de Lomé. Le degré de contamination et les interrelations entre les paramètres physico-chimiques des eaux et les micropolluants métalliques ont été confirmés par une Analyse en Composantes Principales.

Mots clés : Lagune littorale, ETM, contamination, apport anthropique, nutriments.

1. Introduction

Les hydrosystèmes littoraux tels que les rivières, les fleuves, les lacs, les estuaires, les lagunes, les océans etc., sont de nos jours soumis à de fortes pressions anthropiques notamment, l'urbanisation, le tourisme, l'agriculture, la pêche, l'expansion industrielle et les exploitation minières (Brambati, et

al., 2003 ; Bloundi, 2005 ; Ayah, et *al.*, 2012). Ces activités sont à l'origine des rejets de divers polluants organiques et inorganiques qui contribuent à la pollution de ces hydrosystèmes. Les concentrations de ces contaminants dans certaines eaux, sédiments et organismes vivants ont atteint des teneurs alarmantes du point de vue écotoxicologique, entraînant parfois des effets négatifs sur la santé humaine (Briton Bi, et *al.*, 2006 ; Boillot, 2008). De nombreuses études portant sur la qualité des eaux lagunaires ont mis en évidence une corrélation entre l'apport d'effluents domestiques, agricoles, industriels et l'augmentation des teneurs en nutriments et en éléments traces métalliques (ETM) dans l'eau et les sédiments. Par exemple, dans le bassin d'Arcachon (France) les concentrations en Cu, Pb et Zn des sédiments ont augmenté de 100 à 400% en quelque années (Péna, 1989 ; Dedieu, et *al.*, 2007). De même, Chouti et *al.*, (2010a) ont relevé des concentrations dépassant 340 µg/L de Hg, 160 µg/L de Cu et 5000 µg/L de Zn dans la lagune de Porto-Novo Bénin. Cette tendance élevée des teneurs en ETM dans les hydrosystèmes littoraux urbains a été également observée dans la lagune de Venise en Italie (Brambati, et *al.*, 2003), dans la lagune de Nador au Maroc (Bloundi, 2005), dans la lagune de Korle et de Kpeshie au Ghana (Nixon, et *al.*, 2007 ; Addo, et *al.*, 2011). Aussi, la quantité de phosphore et d'azote dans les eaux de plusieurs lacs a augmenté de façon considérable depuis quelques décennies en raison du développement des collectivités humaines sur les bassins versants. Parmi les principales sources anthropiques de phosphore et d'azote, les rejets d'eaux domestiques constituent généralement la principale source de pollution des eaux par les phosphates. En France, les rejets de phosphore sont estimés à environ 70 000 tonnes par an, dont 51 % d'origine urbaine (Miquel, 2003). A proximité des grands centres urbains, cette part est beaucoup plus importante. L'usage de tripolyphosphates de sodium comme additifs dans les lessives textiles et les produits pour lave-vaisselle constitue une autre source de contamination des eaux par les phosphates. Les teneurs en azote ammoniacal (NH_4^+) à partir de 1,2 mg/L dans un hydrosystème à pH 7,5 et à 15°C sont toxiques pour la faune piscicole (INERIS, 2012). Les teneurs élevées en nutriments peuvent entraîner à partir de 0,03 mg/L de NO_3^- et de 0,01 mg/L de phosphore, la prolifération accrue d'algues et par conséquent l'apparition des phénomènes d'eutrophisation et le développement de cyanobactéries produisant des toxines très dangereuses pour le système nerveux des espèces aquatiques (Chambers, et *al.*, 2001 ; Trinquier, 2009). Les ETM sont très nocifs voire mortels pour des espèces animales et/ou végétales aquatiques provoquant un dysfonctionnement dans la chaîne trophique et diminuant la biodiversité (Boucheseiche, et *al.*, 2002). En effet, l'un des enjeux majeurs en ce XXI^e siècle, est la gestion environnementale et socioéconomique des hydrosystèmes littoraux. Au Togo, le système lagunaire de Lomé, malgré les

travaux d'aménagement de ces dernières années, connaît une détérioration inquiétante, conséquences des apports anthropiques en nutriments et en substances chimique comme les ETM (Bawa, et *al.*, 2007 ; Gnandi, et *al.*, 2011). Ce système lagunaire constitue le réservoir ultime des effluents et des déchets solides caractérisés par les apports telluriques, des eaux de ruissellement, des lixiviats des dépotoirs (rejets d'ordures ménagères par les riverains) et des retombées atmosphériques issues de la combustion (carburants, essence, incinération des ordures ménagères). Ces apports ne sont pas sans dangers sur la qualité des eaux et le bon fonctionnement de ce hydrosystème. Cette étude vise à évaluer le degré de contamination des éléments nutritifs et des éléments traces métalliques des eaux du système lagunaire de Lomé à travers les caractéristiques hydrochimiques et à estimer l'impact des activités anthropiques sur ce hydrosystème.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire côtier au sud du Togo qui est sous l'influence d'un climat de type subéquatorial guinéen caractérisé par quatre saisons dont une grande saison sèche de novembre à mi-mars, une grande saison de pluie de mi-mars à mi-juillet, une petite saison sèche d'août à septembre et une petite saison de pluie d'octobre à novembre. Cette zone connaît des précipitations très irrégulières comprises entre 750 mm et 1000 mm de hauteur par an. La couverture végétale autour du système lagunaire est fortement dégradée à cause d'une urbanisation croissante. Le réseau hydrographique est constitué du système lagunaire, des bassins d'orages et dans une moindre mesure du fleuve Zio. Les sédiments accumulés dans la zone lagunaire et le cordon littoral sont des argiles et des sables marins (Figure 1).

Au nord du système lagunaire, on distingue : un sol sabloargileux rouge appelé "terre de barre", d'éléments détritiques issus d'érosion continentale, des formations argileuses et des sables argileux lacustres et lagunaires (Millet, 1986 ; Akouvi, et *al.*, 2008 ; Da Costa, et *al.*, 2013). Le système lagunaire de Lomé est situé en contrebas de la ville de Lomé et parallèle à la côte sur une distance de 8 km environs. Ce système lagunaire, d'une superficie totale de 80 ha est composé de trois lacs naturels aménagés : le lac Ouest de 20 ha, le lac Est de 31 ha et le lac de Bè de 29 ha (Gnandi, et *al.*, 2011). Un canal d'équilibre d'environ 2,3 km de long relie les lacs Ouest et Est.

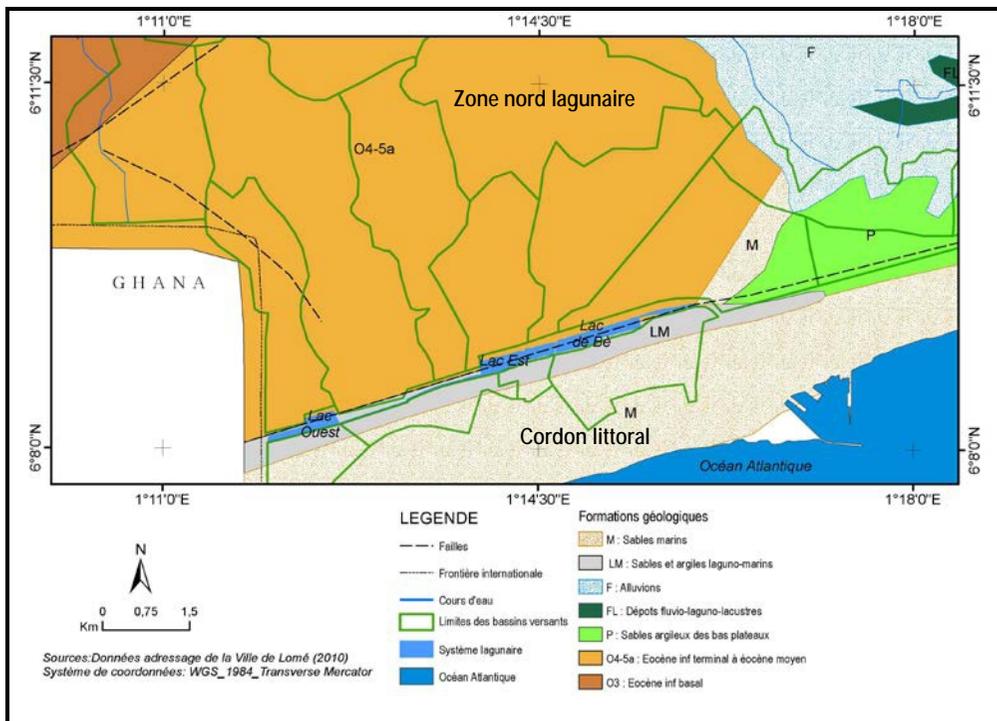


Figure 1 : Ensemble géologique et hydrographique de la zone d'étude

2.2. Echantillonnage et mesures *in-situ*

Après une enquête sur le terrain en août 2011, la campagne d'échantillonnage d'eau a été réalisée en huit points (O₁₁, O₅, C₄, C₂, E₃, E₁, B₆ et B₃) suivant une ligne médiane du plan d'eau et à une profondeur de 50 cm de la surface (Tableau 1 et Figure 2).

Tableau 1 : Position géoréférencée des sites de prélèvement

Station	Site	Coordonnées GPS	Profondeur (m)
Lac Ouest	O ₁₁	6° 8' 08"N ; 1° 12' 10"E	5,0
	O ₅	6° 8' 16"N ; 1° 12' 29"E	3,0
Canal d'équilibre	C ₄	6° 8' 22"N ; 1° 13' 01"E	1,0
	C ₂	6° 8' 31"N ; 1° 13' 24"E	1,0
Lac Est	E ₃	6° 8' 49"N ; 1° 14' 11"E	2,5
	E ₁	6° 8' 57"N ; 1° 14' 34"E	2,3
Lac de Bè	B ₆	6° 9' 03"N ; 1° 14' 54"E	2,5
	B ₃	6° 9' 09"N ; 1° 15' 12"E	6,0

La profondeur, la température (T°C), le pH, l'oxygène dissous (OD), le potentiel redox (Eh), la transparence et la conductivité électrique ont été mesurés *in situ*. Les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-chimiques ont été recueillis dans des bouteilles en polytéréphtalate d'éthylène de 1,5 litre et transportés dans une glacière au Laboratoire de Chimie des Eaux de la Faculté Des Sciences de l'Université de Lomé (Togo).

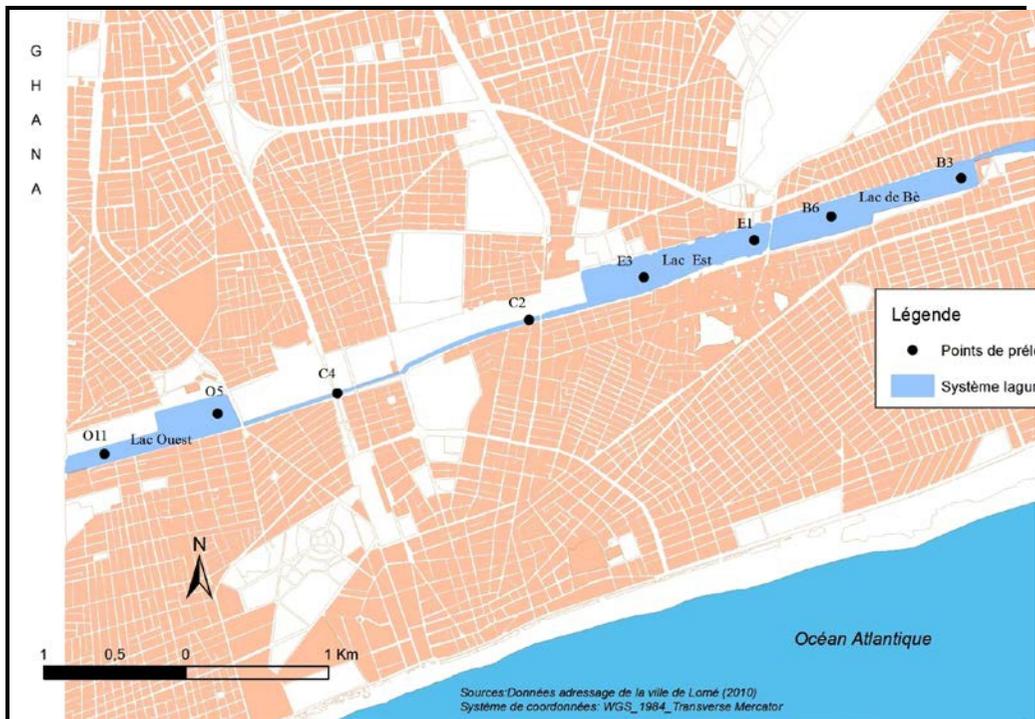


Figure 2 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons

2.3. Analyse au laboratoire

Les analyses physico-chimiques et chimiques des eaux ont été réalisées au Laboratoire de Chimie des Eaux de la Faculté Des Sciences de l'Université de Lomé (Togo) et dans les Laboratoires du Groupement de Recherche Eau Sol Environnement (EA 4330), Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges (France). Ces analyses ont porté sur des échantillons d'eau filtrés sur des membranes "Millipore" 0,2 µm et 0,45 µm pour des analyses directes ou conservés à 4°C. Les méthodes d'analyses physico-chimiques décrites par les normes Afnor sur la « Qualité de l'eau » et celles de Rodier sur « L'analyse de l'eau » ont été utilisées (Afnor, 1997 ; Rodier, 2009). Dans le cas du dosage des éléments majeurs et traces métalliques, les échantillons d'eau ont été acidifiés par l'acide nitrique concentré (67,58%) pour éviter toutes précipitations. Tous les appareils utilisés ont été préalablement étalonnés ou calibrés (Afnor, 1997 ; Rejsek, 2002 ; Aminot, & Kérouel, 2004 ; Rodier, 2009 ; Rouessac, 2009).

Le tableau 2 présente l'ensemble des paramètres physicochimiques étudiés ainsi que le matériel et les méthodes utilisés.

Tableau 2 : Matériel et méthodes d'analyses physico-chimiques

Paramètres	Méthodes	Norme/référence	Précision/ Limite de détection	Matériel
Température	Electrométrie	NFT 90-100	± 0,01 °C	Multimètre
pH	Electrométrie	NFT 90-008	± 0,01 upH	“Type WTW Multi 3420”
Cond.él. à 25°C	Conductimétrie	NFT 90-031	± 0,5 %	Turbidimètre
Turbidité	Turbidimètre	NFT 90-033	± 0.01 NTU	“Type DRT100B model 20012”
Transparence	Secchi	NF EN ISO 7027	Max : 1,20 m	Disque de Secchi Potentiomètre
Eh	Electrométrie	NF ISO 10390	± 0.01 mV	"Type PHM210 MeterLab"
HCO ₃ ⁻	Acidimétrie	NFT 90-036	± 0,25 mg/L	Verrerie de laboratoire
Ca ²⁺	Complexométrie	NFT 90-016	± 0,5 mg/L	
Mg ²⁺		NFT 90-014	± 0,5 mg/L	
Cl ⁻		NFT 90-014	± 0,5 mg/L	
IP	Basique/Chaud	EN ISO 8467	± 0,5 mg/L	Verrerie de laboratoire
Oxygène dissous	Iodometrie	NF EN 25813/	± 0,5 mg/L	
COD	CTO-métrie	NF EN 1484	LD : 50 µgC/L	Analyseur Shimadzu
Azote total (NT)			LD : 20 µgN/L	“type TOC-L Analyser 5000”
AbsUV _{254nm}	Spectrométrie	-	± 0,0005 uDO	Spectromètre Varian
Na ⁺	Absorption atomique	NFT 90-20	± 0.04 mg/L	“Type Cary 50 Probe”
K ⁺			± 0.02 mg/L	Photomètre à flamme
SiO ₂				
PO ₄ ³⁻	Spectrométrie	NFT 90 007	1 à 2%	Spectromètre UV/Visible “Type Digitron Elvi 675”
NH ₄ ⁺		EN ISO 6878		
NO ₃ ⁻		NFT 90-015		
SO ₄ ²⁻	Néphélométrie	NFT 90-012		
MES	Gravimétrie/ Centrifugation	NF EN 872	2 mg/L	Equipement de filtration/Centrifugeuse
ETM	ICP-MS	NF EN ISO 11885	LD : 0,005 - 0,1 µg/L pour la plupart des éléments	“Type T52 MLW” ICP-MS “Agilent 7700x, Agilent technologies”

2.4. Traitement des données

Les faciès chimiques des eaux du système lagunaire de Lomé ont été déterminés à l'aide du diagramme de Piper (Simler, 2005). Ce diagramme a permis de faire ressortir les similarités entre les échantillons d'eau et de les regrouper en familles en fonction des ions majeurs. Le programme de traitement statistique Xlstat (Fahmy, 2006) a été utilisé pour l'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur une matrice de 08 sites échantillonnés (sites O₁₁, O₅, C₄, C₂, E₃, E₁, B₆ et B₃) et 39 paramètres variables (T°C, pH, conductivité électrique, sels dissous, Eh, oxygène dissous, transparence, profondeur, azote total, phosphore total, matière en suspension, turbidité, carbone organique dissous, aromaticité, la silice, les anions et cations majeurs et les ETM). Cette ACP a permis de mettre en évidence les interrelations entre les paramètres physicochimiques et chimiques des eaux du système lagunaire de Lomé et leur distribution dans les différents sites échantillonnés. Les rapports de Redfield et *al.*, (1963)

concernant l'azote et la silice par rapport au phosphore (NT/PT et Si/PT) ont été déterminés où NT (en mgN/L) correspond à l'azote total (NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^-), Si (en mgSi/L) les teneurs en silice et PT (en mgP/L) correspond au phosphore total des orthophosphates (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-). Ces rapports caractérisent pour $\text{NT/PT} > 16$ et $\text{Si/PT} > 20$, la prolifération intense du phytoplancton dans un milieu aquatique.

3. Résultats

3.1. Causes principales de la pollution du système lagunaire

Les observations faites sur le terrain ont permis de remarquer l'existence de caniveaux et de collecteurs qui débouchent directement dans les unités hydrologiques du système lagunaire (lac Ouest, Canal d'équilibre, lac Est et lac de Bè) (Figure 3).



Figure 3 : Etat des lieux de quelques endroits du système lagunaire de Lomé

Ces infrastructures d'assainissement pluvial drainent malheureusement aussi bien les eaux pluviales que les eaux usées. A cette situation, s'ajoutent des dépotoirs incontrôlés d'ordures de tout genre (débris végétaux, déchets métalliques et électronique, sachets plastiques, etc.) aux abords de ce hydrosystème lagunaire qui finissent par se retrouver dans les eaux. Malgré les travaux d'aménagement, on assiste à l'envasement des

bassins et du canal du à l'érosion par les eaux de ruissellement qui charrient des débris terreux et végétaux de toute sorte, à l'effondrement des berges et aux rejets urbains suite à l'occupation croissante de l'espace environnant.

3.2. Paramètres physiques et chimiques des eaux

Les résultats d'analyses physicochimique et chimique des eaux du système lagunaire de Lomé sont présentés dans le Tableau 3. La température oscille entre $28,7 \pm 0,01^\circ\text{C}$ dans le lac de Bè (site B3) et $30,3 \pm 0,01^\circ\text{C}$ au niveau du canal d'équilibre (site C₂) avec une valeur moyenne de $29,5 \pm 0,01^\circ\text{C}$ pour l'ensemble du système lagunaire. Les valeurs de pH sont comprises entre $6,52 \pm 0,01$ (site C₄ du canal d'équilibre) et $8,47 \pm 0,01$ au site E₃ du lac Est avec une moyenne de pH $7,57 \pm 0,01$. La plus faible valeur du potentiel d'oxydoréduction enregistrée, est de 15,5 mV observée au niveau du site C₄ du canal d'équilibre et la plus forte valeur enregistrée est de 261,3 mV (site O₁₁ du lac Ouest). Le pouvoir d'oxydoréduction (rH) déterminé à partir du pH, Eh et la température selon Rejsek, (2002) montrent des valeurs de rH variant entre 13,6 (site C₄) et 24,2 au site O₁₁ avec une moyenne de 20,2. La teneur minimale en oxygène dissous (O_{2dis}) est de 1,5 mgO₂/L au site C₄ du canal d'équilibre contre une teneur maximale de 7,8 mgO₂/L au site O₁₁ du lac Ouest. La teneur moyenne en O_{2dis} est de 5,0 mgO₂/L. La conductivité électrique des eaux est très élevée et varie entre 2697 µS/cm au niveau du site C₄ du canal d'équilibre et 4453 µS/cm au niveau du site E₁ du lac Est. La conductivité électrique moyenne est de 3547 µS/cm. Les teneurs en sels totaux dissous fluctuent entre 1805 mg/L au site C₄ et 2536 mg/L au site E₁, avec une moyenne de 2138 mg/L.

Tableau 3 : Paramètres physicochimique des eaux

Paramètres	Unités	Sites de prélèvement								Min.	Max.	Moy
		O ₁₁	O ₅	C ₄	C ₂	E ₃	E ₁	B ₆	B ₃			
T	°C	29,2	28,9	30	30,3	30,1	29,3	29,1	28,7	28,7	30,3	29,5
pH	-	7,73	7,34	6,52	6,55	8,47	8,21	7,92	7,85	6,5	8,5	7,57
Eh	mV	261,3	125,5	15,5	40,4	115	186,7	228,9	244,3	15,5	261,3	152,2
rH	-	24,2	18,9	13,6	14,4	20,8	22,6	23,5	23,9	13,6	24,2	20,2
O _{2dis}	mgO ₂ /L	7,8	4,7	1,5	1,7	5,9	5,2	6,1	7,3	1,5	7,8	5,0
CE	µS/cm	3153	3123	2697	3033	4277	4453	3882	3757	2697	4453	3547
TDS	mg/L	1857	1886	1805	2025	2536	2499	2238	2260	1805	2536	2138

T : température, pH : potentiel d'hydrogène, Eh : potentiel d'oxydoréduction, rH : pouvoir d'oxydoréduction,

O_{2dis} : oxygène dissous, CE : conductivité électrique, TDS : sels dissous

Pour ce qui est de la turbidité de la transparence, et des teneurs en matière en suspension (MES), les résultats sont présentés sur la Figure 4.

La turbidité de l'eau est en moyenne de 35 NTU. Le site où l'eau est la plus turbide est le site C₄ du canal d'équilibre avec une turbidité de 50,35 NTU par rapport au site B3 du lac de Bè où la turbidité est la plus faible

(20,45 NTU). Les valeurs de la transparence sont comprises entre 11 cm au site C4 du canal d'équilibre et 22 cm au site B3 du lac de Bè avec une moyenne de 16 cm pour l'ensemble du système lagunaire. Les teneurs en matière en suspension (MES) indiquent des valeurs extrêmes de 47 mg/L au site B₃ du lac de Bè et de 105 mg/L au site C₄ du canal d'équilibre avec une moyenne de 77 mg/L.

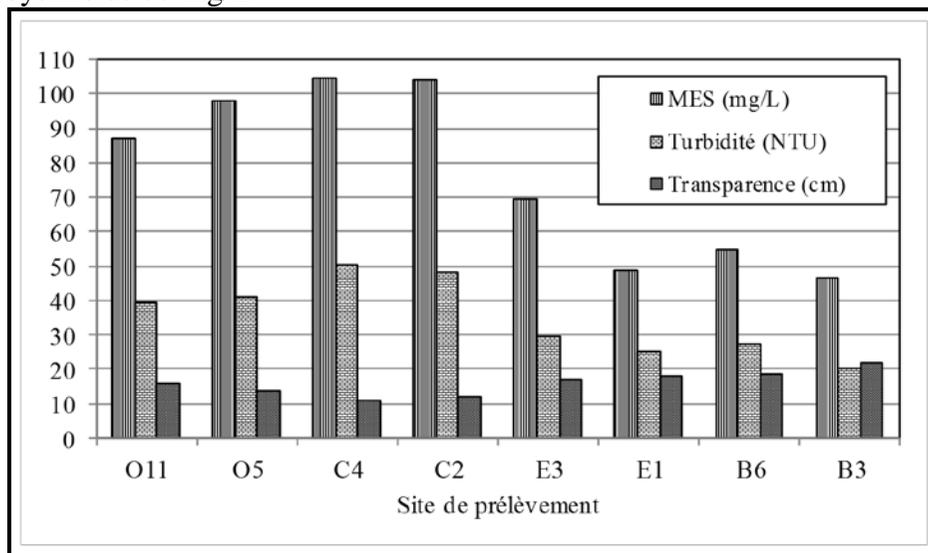


Figure 4 : Variation de MES, turbidité et transparence.

3.3. Composition chimique des eaux

Cation et anions majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_2) : Les teneurs en cations et anions majeurs sont enregistrées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Teneurs en cations et anions majeurs (en mg/L)

Paramètres	Sites de prélèvement								Min.	Max.	Moy
	O ₁₁	O ₅	C ₄	C ₂	E ₃	E ₁	B ₆	B ₃			
Ca^{2+}	99,2	104	105,6	108,8	88	76,8	68,8	71,5	68,8	108,8	90,3
Mg^{2+}	53,8	50,9	45,2	61,5	56,2	75,8	73,9	65,3	45,2	75,8	60,3
Na^+	420	413	355	461	725	708	639	653	355,0	725,0	547
K^+	69,4	65,5	64,7	63,9	78,7	79,5	68,3	66,3	63,9	79,5	69,5
HCO_3^-	509,5	549,7	582	576	267,4	288,8	217,4	236,4	217,4	582,0	403,4
Cl^-	630,7	627,5	590,6	590,6	1143	1094	997	995	590,6	1143,0	833,6
SO_4^{2-}	71,9	71,7	61,1	162,4	173,8	174,5	167,1	165,4	61,1	174,5	131,0
NO_3^-	2,47	3,31	0,81	0,83	3,71	1,92	6,46	7,46	0,8	7,5	3,37

La concentration minimale en calcium (Ca^{2+}) est de 68,8 mg/L (site B₆) et une teneur maximale de 108,8 mg/L au niveau du site C₂ avec une moyenne de 90,3 mg/L. Les concentrations en magnésium (Mg^{2+}) varient entre 45,2 mg/L (site C₄) et 75,8 mg/L (site E₁). La moyenne étant de 60,3

mg/L. Les teneurs en sodium (Na^+) vont de 355 mg/L au site C_4 du canal à 725 mg/L au niveau du site E_3 du lac Est. La moyenne enregistrée est de 547 mg/L. Quant au potassium (K^+), les teneurs des eaux du système lagunaire fluctuent entre 63,9 mg/L (sites C_2) et 79,5 mg/L au site E_1 avec une moyenne de 69,5 mg/L. Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) varient entre 217,4 mg/L dans le site B_6 du lac de Bè, et 582 mg/L dans le site C_4 du canal d'équilibre. La teneur moyenne est de 403,4 mg/L pour l'ensemble du système lagunaire. Les teneurs en chlorures (Cl^-) sont très élevées et sont comprises entre 590,6 mg/L (sites O_5 et O_{11}) et 1143 mg/L (sites E_1 et E_3). Cependant, la teneur moyenne est de 833,6 mg/L pour les eaux du système lagunaire. Les sulfates (SO_4^{2-}) varient entre 61,1 mg/L au niveau du site C_4 du canal d'équilibre et 174,5 mg/L au niveau du site E_1 du lac Est avec une teneur moyenne de 131 mg/L. Les teneurs en nitrate (NO_3^-) sont faibles et varient entre de 0,81 mg/L (site C_4) et 7,46 mg/L (site B_3). La teneur moyenne en nitrate du système lagunaire est de 3,37 mg/L. La Figure 5 présente le faciès hydrochimique du système lagunaire à travers les diagrammes de Piper.

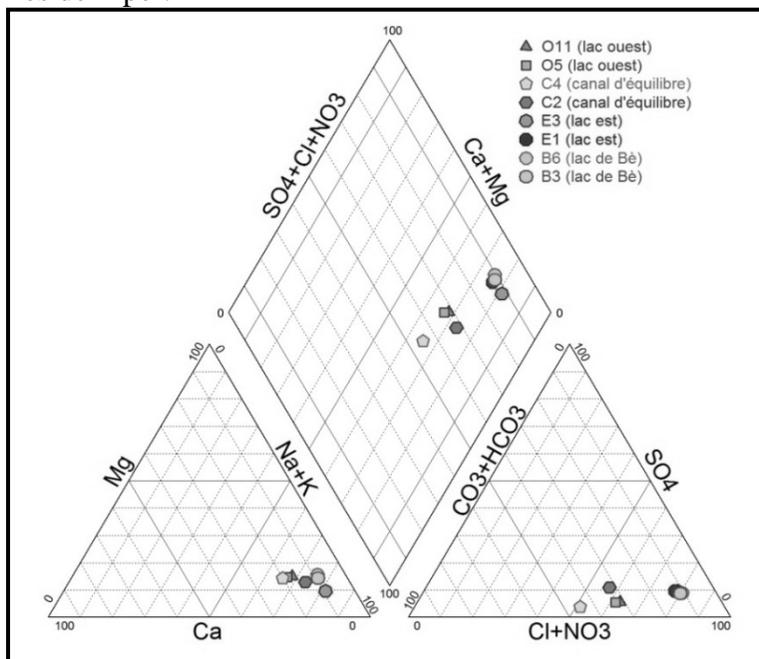


Figure 5 : Diagramme de Piper des eaux

Dans le diagramme ternaire des cations, la majorité des eaux est orientée vers le pôle sodique potassique par contre dans le diagramme ternaire des anions, la majorité est orientée vers le pôle chloruré. Cette orientation est plus marquée pour les sites E_3 et E_1 du lac Est et les sites B_6 et B_3 du lac de Bè. Ces analyses des diagrammes ternaires traduisent par projection dans le

losange du diagramme de Piper un faciès unique chloruré sodique et potassique des eaux du système lagunaire.

Les résultats concernant les ETM (Cd, Hg, Pb, As, Cr, Sb, Cu, Zn, Co, Ni, Ag, Mo, Ti, Mn, Fe et Al) des eaux du système lagunaire de Lomé sont présentés dans le Tableau 5. Les teneurs en ETM varient d'un site à un autre et dans une même unité hydrologique (lac Ouest, Canal d'équilibre, lac Est et le lac de Bè) du système lagunaire. De manière décroissante, les éléments les plus abondants en teneurs moyennes sont Fe (6044 µg/L), Mn (2818 µg/L), Ti (1498 µg/L), et Al (895 µg/L) et celles des ETM se présente comme suit : Zn (56,60 µg/L) > Cu (15,85 µg/L) > Mo (15,52 µg/L) > Cr (14,32 µg/L) > As (9,29 µg/L) > Pb (5,69 µg/L) > Co (3,41 µg/L) > Sb (2,74 µg/L) > Cd (0,85 µg/L) > Ag (0,53 µg/L) > Hg (0,42 µg/L) > Ni (0,27 µg/L). Les concentrations les plus élevées en ETM sont enregistrées au niveau du site C₄ suivi de C₂, E₃, O₁₁, O₅, B₃, E₁ et B₆.

Tableau 5 : Teneurs en ETM des eaux du système lagunaire (en µg/L)

ETM	Site de prélèvement								Min	Max	Moy
	O11	O5	C4	C2	E3	E1	B6	B3			
Cd	0,19	0,16	2,97	2,89	0,17	0,14	0,13	0,11	0,11	2,97	0,85
Pb	1,33	1,36	35,04	2,64	2,23	0,78	0,85	1,29	0,78	35,04	5,69
Cu	11,3	11,37	21,02	19,72	27,63	13,22	9,65	12,91	9,65	27,63	15,85
Zn	42,26	41,47	97,53	93,59	89,81	24,23	27,86	36,05	24,23	97,53	56,60
Co	1,96	1,8	10,36	7,48	2,18	0,85	0,79	1,88	0,79	10,36	3,41
Ni	0,16	0,15	0,27	0,13	0,41	0,16	0,25	0,62	0,13	0,62	0,27
Cr	6,5	5,61	57,25	17,46	10,16	6,42	3,8	7,36	3,80	57,25	14,32
As	8,67	10,62	4,58	18,2	13,15	6,18	2,89	10,05	2,89	18,20	9,29
Hg	0,16	0,11	2,45	0,07	0,28	0,14	0,07	0,09	0,07	2,45	0,42
Ag	0,09	0,06	2,88	0,18	0,41	0,41	0,08	0,11	0,06	2,88	0,53
Mo	8,37	11,38	16,45	14,38	16,01	26,06	5,71	25,8	5,71	26,06	15,52
Sb	3,29	2,31	3,26	2,86	2,66	2,01	3,58	1,93	1,93	3,58	2,74
Ti	811	796	5012	2693	961	633	360	719	360	5012	1498
Mn	1407	1259	10668	7112	1347	518	95	135	95	10668	2818
Fe	2957	3036	19450	14571	4594	1730	483	1533	483	19450	6044
Al	254	237	3370	1656	617	239	206	584	206	3370	895

Matière organique dissous : le tableau 6 présente les teneurs en carbone organique dissous, en aromaticité et substances oxydables. Les plus fortes teneurs en substances oxydables (oxydabilité au KMnO₄) ou l'indice permanganate (IP) de 40 mg/L et en carbone organique dissous (COD = 91,11 mg/L) sont enregistrées au niveau du site C₄ suivi du site C₂ (IP de 31,0 et COD de 20,83 mg/L) du canal d'équilibre. Quant à l'aromaticité (AR), elle varie entre 14,02 % au niveau du site C₄ du Canal d'équilibre et

41,83 % du site O₁₁ du lac Ouest avec une moyenne de 20,8 % dans les eaux du système lagunaire.

Tableau 6 : Teneurs en matières organiques, en nutriments et en silice

Paramètre	Unité	Sites de prélèvement								Min.	Max.	Moy
		O ₁₁	O ₅	C ₄	C ₂	E ₃	E ₁	B ₆	B ₃			
IP	mgO ₂ /L	21	13	40	31	13	10	5	4	4	40	17,1
COD	mgC/L	10,99	11,61	91,11	20,83	11,79	11,12	8,12	8,11	8,1	91,1	21,7
AR	%	41,83	22,6	14,02	15,77	18,18	17,61	18,07	18,21	14,0	41,8	20,8
N	mgN/L	5,36	8,32	51,07	45,59	2,59	4,29	1,56	1,55	1,6	51,1	15,0
P	mgP/L	0,42	0,47	1,27	1,18	0,29	0,24	0,21	0,07	0,07	1,27	0,5
SiO ₂	mg/L	52,61	51,46	87,92	91,27	2,25	2,58	1,43	1,69	1,4	91,3	36,4

IP : Indice permanganate, COD : Carbone organique dissous, AR : Aromaticité, N : Azote total, P : Phosphore total

Les teneurs en azote total, en phosphore total des orthophosphates et en silice sont également présentés dans le tableau 6. Les teneurs en azote total (N) fluctuent entre 1,55 mg/L au site B₃ et 51,07 mg/L au site C₄ avec une moyenne de 15,04 mg/L. Les teneurs en phosphore total des orthophosphates (P) varient entre 0,07 mg/L au site B₃ du lac de Bè et 1,27 mg/L au site C₄ du canal d'équilibre avec une moyenne de 0,52 mg/L. Les teneurs en silice (SiO₂) des eaux du système lagunaire varient entre 1,43 mg/L dans les eaux du site B₆ du lac de Bè à 91,27 mg/L (site C₂ du canal d'équilibre). La moyenne enregistrée sur l'ensemble du système lagunaire étant de 36,4 mg/L. Les rapports de Redfield et al., (1963) concernant l'azote total et la silice par rapport au phosphore total de orthophosphates (N/P et Si/P) présentés sur la Figure 6, montre dans l'ordre décroissant que les sites C₄, C₂, B₃, E₁ et O₅ indique des rapports N/P > 16 et que des rapports Si/P > 20 sont observés au niveau des sites O₁₁, O₅, C₂ et C₄.

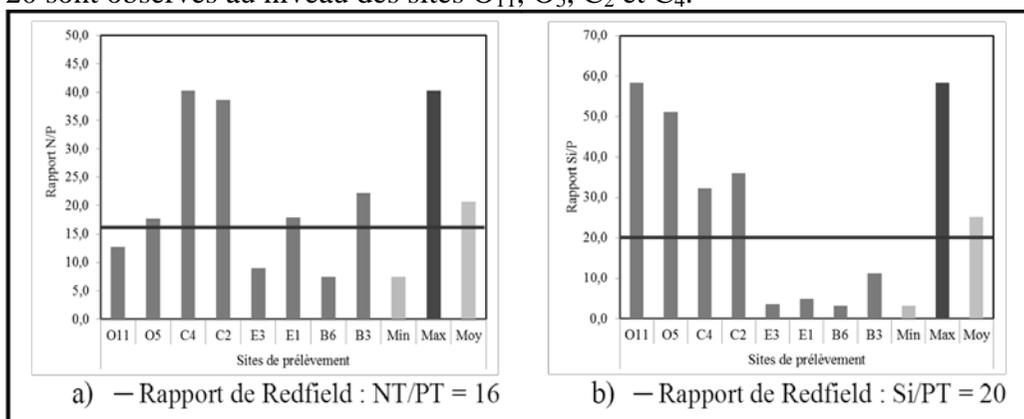


Figure 6 : Rapports N/P et Si/P dans les eaux du système lagunaire de Lomé.

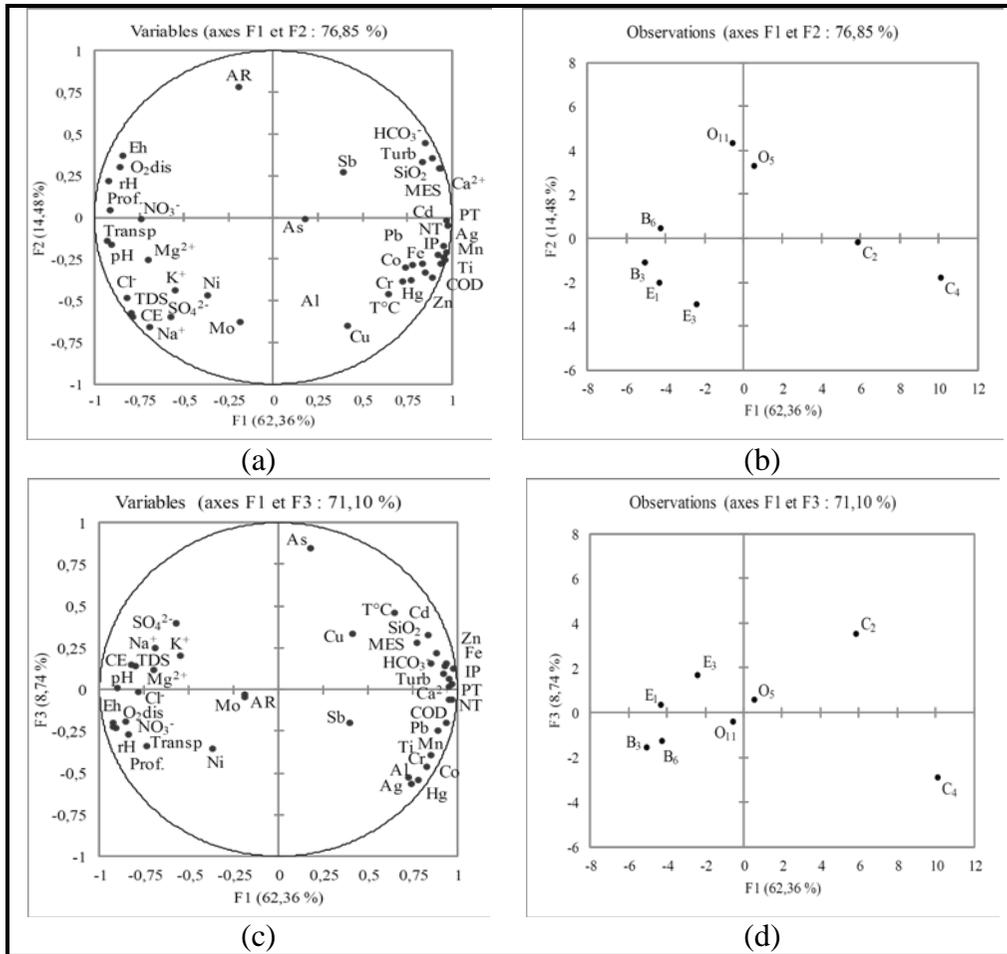
3.4. Analyses en composantes principales

Le pourcentage de variance par chaque facteur est donné dans le Tableau 7 qui donne la contribution de chaque facteur au nuage de points présentés sur la figure 7. Les trois premiers facteurs expriment 85,58% de la variance dont 62,36% pour F1, 14,48% pour F2 et 8,74% pour F3. Les plans factoriels (F1xF2) et (F1xF3) expriment respectivement 76,85% et 71,10% de la variance totale des nuages de points. La représentation des données dans les deux plans factoriels (F1xF2 et F1xF3) rend compte de manière assez satisfaisante de la proximité des éléments.

Tableau 7 : Valeurs propres et pourcentage des variances exprimées par les facteurs.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	25,57	5,94	3,58	2,00	1,78	1,44	0,69
% Variance exprimée	62,36	14,48	8,74	4,87	4,34	3,52	1,69
% Variance cumulée	62,36	76,85	85,58	90,46	94,79	98,31	100,00

L'Analyses en Composantes Principales (ACP) des variables dans le plan factoriel F1xF2, présentée sous forme de cercle de corrélations sur la figure 7a met en évidence l'axe factoriel F1 qui est défini d'une part, en négatif par le pH (-0,90), la conductivité électrique (-0,82), les sels dissous (-0,69), le Eh (-0,84), le rH (-0,92), l'oxygène dissous (-0,85), la transparence (-0,93), la profondeur (-0,91), magnésium (-0,70), les nitrates (-0,74), les chlorures (-0,78), le sodium (-0,80) et dans une moindre mesure, les sulfates (-0,58), les chlorures (-0,69) et le potassium (-0,55), et d'autre part, en positif par la température (0,65), l'azote total (0,95), le phosphore total (0,98), la matière en suspension (0,89), l'indice permanganate (0,97), la turbidité (0,94), le carbone organique dissous (0,83), la silice (0,93), les bicarbonates (0,85), le calcium (0,84) et les ETM notamment, Cd (0,92), Pb (0,78), Zn (0,77), Co (0,95), Cr (0,85), Hg (0,74), Ag (0,73), Ti (0,94), Mn (0,97), Fe (0,96) et Al (0,89). Ainsi, la composante principale F1 définit un enrichissement en sels minéraux, en matières organiques, en éléments nutritifs et en micropolluants métalliques. Cette composante principale F1 caractérise un pôle de pollution en matière organique et en ETM du côté droit et du côté gauche un gradient de minéralisation et d'enrichissement en sels dissous. L'axe factoriel F2 est défini en négatif par les ETM comme Cu (-0,65), Ni (-0,50) et Mo (-0,59). Seule l'aromaticité (0,78) définie en positif l'axe F2. Cependant, dans le plan F1xF3 (Figure 7c), l'axe factoriel F3 est défini essentiellement en positif par As (0,84). En ce qui concerne l'affinité entre les paramètres physicochimiques, la matière organique et les ETM, les interrelations qui existent entre toutes ces variables prises deux à deux sont données par la matrice de corrélation présentée dans le tableau 8.



T[°]C : température ; pH : potentiel hydrogène ; CE : conductivité électrique ; TDS : Sel total dissous ; Eh : potentiel d'oxydoréduction ; rH : pouvoir d'oxydoréduction ; IP : indice permanganate ; O₂dis : oxygène dissous ; Transp : transparence ; Prof. : profondeur ; NT : azote total ; PT : phosphore total ; MES : matière en suspension ; Turb : turbidité ; COD : carbone organique dissous ; Aro : aromaticité ; SiO₂ : silice ; Na⁺ : sodium ; K⁺ : potassium ; Ca²⁺ : calcium ; Mg²⁺ : magnésium ; Cl⁻ : chlorure ; SO₄²⁻ : sulfate ; NO₃⁻ : nitrate ; HCO₃⁻ : bicarbonate ; Cd : cadmium ; Pb : plomb ; Cu : cuivre ; Zn : zinc ; Co : cobalt ; Ni : nickel ; Cr : chrome ; As : arsenic ; Hg : mercure ; Ag : argent ; Mo : molybdate ; Sb : antimoine ; Ti : titane ; Mn : manganèse ; Fe : fer ; Al : aluminium

Figure 7 : Plans factoriel F1xF2 et F1xF3 des variables et des individus
 Le tableau 8 montre des corrélations importantes entre les ETM et la majeure partie des variables notamment, pH, Eh, O₂dis, TDS, COD, NT, PT, SiO₂ et MES. Les projections des individus (sites de prélèvement) dans les plans F1xF2 (figure 7b) et F1xF3 (Figure 7d) superposés à celle des variables (paramètres physicochimiques et ETM) dans les mêmes plans respectivement des figures 8a et 8c montrent que les sites C₄ et C₂ du Canal

d'équilibre sont ceux qui sont plus marqués par une pollution organique (azote total ; phosphore total et carbone organique dissous), telluriques (Silice) et en micropolluants métalliques (Cd, Pb, Cu, Zn, Co, Cr, Hg, Ag, Ti, Mn, Fe, Al). Les sites E₃ et E₁ du lac Est, B₆ et B₃ du lac de Bè et les sites O₁₁ et O₅ du lac Ouest sont caractérisés par les sels dissous (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻) qui définissent dans ces site une pollution minérale. Ces sites (surtout O₁₁, B₆ et B₃) sont plus transparents et plus aérés que les sites C₄ et C₂.

Tableau 8 : Matrice de corrélation entre les paramètres physicochimiques et ETM sur l'ensemble des huit sites étudiés à $p < 0,05$

	Cd	Pb	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	As	Hg	Ag	Mo	Sb	Ti	Mn	Fe	Al
T°C	0,72	0,41	0,84	0,89	0,69	-0,24	0,54	0,44	0,40	0,44	-0,06	0,33	0,64	0,70	0,75	0,63
pH	-0,89	-0,61	-0,10	-0,54	-0,87	0,35	-0,69	-0,2	-0,55	-0,52	0,18	-0,31	-0,81	-0,86	-0,84	-0,77
Eh	-0,83	-0,63	-0,68	-0,85	-0,83	0,26	-0,72	-0,35	-0,60	-0,62	-0,03	-0,11	-0,81	-0,84	-0,87	-0,79
rH	-0,91	-0,66	-0,54	-0,81	-0,90	0,31	-0,76	-0,33	-0,62	-0,63	0,04	-0,19	-0,87	-0,91	-0,93	-0,84
O ₂ dis	-0,90	-0,63	-0,50	-0,69	-0,85	0,39	-0,73	-0,22	-0,59	-0,62	-0,02	-0,17	-0,83	-0,88	-0,88	-0,8
CE	-0,67	-0,55	0,03	-0,44	-0,71	0,31	-0,59	-0,13	-0,51	-0,44	0,40	-0,42	-0,67	-0,71	-0,68	-0,62
TDS	-0,50	-0,50	0,24	-0,22	-0,54	0,39	-0,50	0,03	-0,43	-0,36	0,50	-0,44	-0,52	-0,55	-0,50	-0,50
Ca ²⁺	0,65	0,41	0,34	0,66	0,67	-0,53	0,50	0,50	0,38	0,35	-0,30	0,23	0,62	0,70	0,70	0,53
Mg ²⁺	-0,41	-0,58	-0,40	-0,62	-0,57	0,07	-0,59	-0,20	-0,59	-0,52	0,27	-0,23	-0,59	-0,57	-0,57	-0,55
Na ⁺	-0,59	-0,53	0,10	-0,35	-0,63	0,50	-0,54	-0,06	-0,50	-0,43	0,43	-0,41	-0,61	-0,65	-0,61	-0,54
K ⁺	-0,52	-0,33	0,26	-0,19	-0,52	0,05	-0,35	-0,11	-0,26	-0,19	0,34	-0,30	-0,44	-0,50	-0,50	-0,43
HCO ₃ ⁻	0,67	0,50	0,11	0,50	0,68	-0,59	0,52	0,30	0,42	0,39	-0,30	0,26	0,64	0,71	0,69	0,55
Cl ⁻	-0,62	-0,42	0,10	-0,36	-0,63	0,51	-0,50	-0,20	-0,37	-0,31	0,42	-0,37	-0,58	-0,64	-0,61	-0,50
SO ₄ ²⁻	-0,25	-0,53	0,16	-0,15	-0,38	0,35	-0,50	0,22	-0,54	-0,50	0,39	-0,32	-0,44	-0,41	-0,36	-0,37
NO ₃ ⁻	-0,65	-0,44	-0,39	-0,56	-0,62	0,70	-0,53	-0,25	-0,43	-0,50	0,03	-0,17	-0,62	-0,69	-0,69	-0,53
IP	0,90	0,75	0,50	0,78	0,93	-0,40	0,83	0,19	0,72	0,72	-0,15	0,43	0,91	0,95	0,94	0,87
COD	0,76	0,99	0,39	0,61	0,87	-0,07	0,99	-0,28	0,99	0,98	0,04	0,35	0,95	0,88	0,85	0,94
AR	-0,40	-0,32	-0,40	-0,33	-0,36	-0,26	-0,37	-0,03	-0,29	-0,36	-0,42	0,24	-0,37	-0,34	-0,37	-0,43
NT	0,99	0,73	0,42	0,76	0,98	-0,30	0,83	0,23	0,68	0,69	-0,03	0,32	0,94	0,98	0,98	0,91
PT	0,97	0,70	0,42	0,77	0,95	-0,42	0,8	0,25	0,65	0,65	-0,16	0,39	0,91	0,97	0,96	0,87
SiO ₂	0,84	0,55	0,20	0,62	0,83	-0,51	0,64	0,31	0,5	0,50	-0,28	0,36	0,77	0,84	0,83	0,70
MES	0,70	0,50	0,30	0,67	0,72	-0,52	0,56	0,36	0,50	0,41	-0,43	0,38	0,67	0,75	0,74	0,60
Turb	0,79	0,58	0,27	0,66	0,79	-0,59	0,64	0,25	0,54	0,51	-0,42	0,50	0,76	0,83	0,81	0,68
Transp	-0,79	-0,59	-0,38	-0,70	-0,78	0,63	-0,66	-0,25	-0,56	-0,55	0,33	-0,38	-0,76	-0,83	-0,83	-0,69
Prof.	-0,93	-0,57	-0,35	-0,70	-0,87	0,51	-0,67	-0,27	-0,52	-0,53	0,25	-0,41	-0,81	-0,89	-0,89	-0,77

T°C : température ; pH : potentiel hydrogène ; CE : conductivité électrique ; TDS : Sel total dissous ; Eh : potentiel d'oxydoréduction ; rH : pouvoir d'oxydoréduction ; IP : indice permanganate ; O₂dis : oxygène dissous ; Transp : transparence ; Prof. : profondeur ; NT : azote total ; PT : phosphore total ; MES : matière en suspension ; Turb : turbidité ; COD : carbone organique dissous ; Aro : aromaticité ; SiO₂ : silice ; Na⁺ : sodium ; K⁺ : potassium ; Ca²⁺ : calcium ; Mg²⁺ : magnésium ; Cl⁻ : chlorure ; SO₄²⁻ : sulfate ; NO₃⁻ : nitrate ; HCO₃⁻ : bicarbonate ; Cd : cadmium ; Pb : plomb ; Cu : cuivre ; Zn : zinc ; Co : cobalt ; Ni : nickel ; Cr : chrome ; As : arsenic ; Hg : mercure ; Ag : argent ; Mo : molybdate ; Sb : antimoine ; Ti : titane ; Mn : manganèse ; Fe : fer ; Al : aluminium

4. Discussion

4.1. Composition physique et chimique globale et faciès chimiques des eaux

Les températures des eaux du système lagunaire de Lomé ont montré une grande homogénéité spatiale sur l'ensemble du plan d'eau avec une moyenne de 29,45 °C. La température ainsi obtenue est caractéristique des températures des eaux des lagunes tropicales qui oscillent entre 25 et 35 °C

en moyenne (Isabelle, 1999 ; Abulude, et *al.*, 2006 ; Bawa, et *al.*, 2007). En effet, la température de l'eau fait partie des facteurs importants contrôlant la presque totalité des réactions physicochimiques et biologiques des milieux aquatiques (Chapman, & Kimstach, 1996). Paramètre essentiel dans l'appréciation de la qualité des eaux, la température de l'eau est directement soumise aux conditions climatiques locales et à l'influence des marées et des saisons climatiques. La faible profondeur des hydrosystèmes lagunaires fait que la température est le plus souvent homogène sur toute l'épaisseur de la tranche d'eau ; environ 3 m en moyenne dans le cas du système lagunaire de Lomé. Les effets de convection thermique et mécaniques des vagues dus au vent et aux activités de pêche, de navigation sont à l'origine d'un bon brassage des eaux (Traore, et *al.*, 2012). Le pH est un facteur limitant dans les écosystèmes aquatiques. C'est l'un des paramètres qui influence le comportement et la répartition des éléments chimiques dans les hydrosystèmes (Chapman, & Kimstach, 1996). Par exemple, la diminution du pH entraîne une augmentation des processus de solubilisation des dépôts qui libèrent les éléments chimiques comme les ETM. D'après Traoré et *al.*, (2012), les eaux d'origine marine sont basiques et celles d'origine continentale sont acides. Dans le cas du système lagunaire de Lomé, les sites C₄ et C₂ du Canal d'équilibre ont un pH légèrement acide avec un pH moyen de 6,54. Ce Canal d'équilibre est plus alimenté en eau riche en matière organique et élément chimique provenant des bassins de rétention du plateau nord lagunaire et des eaux de ruissellement, tandis que les eaux des lacs Ouest, Est et Bè sont presque basiques (pH 7,54 à 8,34) et sont sous l'influence des eaux marines. Ces observations sont confirmées par les valeurs de la conductivité électrique élevées (2697 et 4453 µS/cm) dans les lacs du système lagunaire marquées par des teneurs importantes en sels dissous (1805 à 2499 mg/L). Ces teneurs en sels dissous sont le résultat de la contribution des constituants majeurs des eaux comme Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻ (Tableau 9) (Riley, & Chester, 1971 ; Martin, & Meybeck, 1979).

Tableau 9 : Ordre des constituants majeurs des eaux suivant leurs concentrations moyennes

Cations (en mg/L)	Anions (en mg/L)
<i>Eaux du système lagunaires de Lomé</i>	
Na ⁺ (547) > Ca ²⁺ (90,3) > K ⁺ (69,5) > Mg ²⁺ (60,3)	Cl ⁻ (833,6) > HCO ₃ ⁻ (403) > SO ₄ ²⁻ (131)
<i>*Eau de mer</i> (Martin, et <i>al.</i> , 1979 ; Whitfield, et <i>al.</i> , 1983)	
Na ⁺ (10733) > Mg ²⁺ (1294) > Ca ²⁺ (412) > K ⁺ (499)	Cl ⁻ (19344) > SO ₄ ²⁻ (2712) > HCO ₃ ⁻ (142)
<i>*Eaux de rivières mondiales</i> (Martin, et <i>al.</i> , 1979 ; Whitfield, et <i>al.</i> , 1983)	
Ca ²⁺ (13,3) > Na ⁺ (5,3) > Mg ²⁺ (3,1) > K ⁺ (1,5)	HCO ₃ ⁻ (51,7) > SO ₄ ²⁻ (8,7) > Cl ⁻ (6,0)

(*) D'après Riley et Chester, (1971) ; Martin et Whitfield, (1983)

Les teneurs en éléments majeurs des hydrosystèmes littoraux dépendent en général des échanges avec l'océan et les apports d'eau du continent (Millet, 1986 ; Akouvi, et *al.*, 2008 ; Gnazou, 2008 ; Séraphin, et *al.*, 2008). D'après Karikari et *al.*, (2007b), le modèle de dominance cationique et anionique d'éléments majeurs dans le cas des eaux du système lagunaire de Lomé est un mélange d'eau de mer et d'eau douce des bassins versant avec un faciès chloruré sodique et potassique.

4.2. Evaluation de la qualité des eaux

Les teneurs en oxygène dissous (O_{2dis}) sont relativement faibles avec une moyenne de 5,03 mg/L. Cette valeur moyenne en O_{2dis} est inférieure à celles déterminées dans les lacs Est et de Bè du système lagunaire de Lomé (6,8 mg/L) (Bawa, et *al.*, 2007). L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des plantes aquatiques (Arrignon, 1998). Les eaux du système lagunaire semblent être aérées. Cependant, le taux très faible de l'oxygène dissous dans le canal d'équilibre (C_4 : 1,5 mg/L et C_2 : 1,7 mg/L) et dans une moindre mesure dans le site O_5 (4,7 mg/L) du lac Ouest dénote d'une mauvaise qualité de l'eau. En effet, quand l' O_2 est inférieure à 2 mg/L, de nombreux organismes aquatiques périssent suite aux processus de décomposition qui réduisent le taux de l'oxygène dissous (Cunningham & Saigo, 1997). La faible teneur en O_2 enregistrée peut être attribuée au manque d'écoulements continus de l'eau, aux rejets d'eau usée des riverains. Ainsi, lorsque l'oxygène se fait rare, la décomposition de la matière organique devient très lente et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) devient très faible voire négatif conduisant à un milieu réducteur caractérisé par une dénitrification et une transformation des sulfates en sulfures d'hydrogène. Cette situation est surtout observée dans le canal d'équilibre (sites C_4 et C_2) avec des valeurs faibles du potentiel redox dont la valeur moyenne dans cette station est environ de 28 mV. Suivant les valeurs du pouvoir d'oxydoréduction (rH) des eaux on a constaté que les sites C_4 et C_2 ($rH \leq 15$) du canal d'équilibre correspondent à un milieu fortement réducteur et totalement anoxique avec une absence totale d'oxygène dissous suivi des sites O_5 du lac Ouest, E3 et E1 du lac Est qui sont faiblement aérés et des sites O_{11} du lac Ouest, B_6 et B_3 du lac de Bè ($rH \geq 23$) suffisamment aérés. Les eaux des milieux totalement anoxiques sont caractérisées par une fermentation anaérobie avec un dégagement de sulfure d'hydrogène, source d'odeurs nauséabondes (Isabelle, 1999). Cette situation est souvent accentuée par des apports excessifs des composés d'azote et de phosphore qui sont de véritables indicateurs de pollution biologique des eaux naturelles (Arrignon, 1998 ; Peltre, et *al.*, 2002b). Les sites C_4 et C_2 du Canal d'équilibre enregistrent des teneurs très élevées en azote total (moyenne

48,33 mg/L) par rapport aux sites O₁₁ et O₅ du lac Ouest (moyenne 6,84 mg/L), E₃ et E₁ du lac Est (moyenne 3,44 mg/L), et B₆ et B₃ du lac Bè (moyenne 1,56 mg/L). Les sites C₄ et C₂ sont également très enrichis en matières organiques avec des teneurs moyennes en carbone organique dissous (COD) de 21,7 mg/L. Aussi, les teneurs en phosphore de 0,52 mg/L en moyenne sont largement supérieures à celles de la plupart des eaux naturelles où les teneurs oscillent entre 0,005 et 0,02 mg/L (Chapman, & Kimstach, 1996). En effet, Les problèmes d'eutrophisation dans les eaux commencent à partir des teneurs de l'ordre de 0,34 à 0,70 mg/L de phosphore qui serait dans certains cas pour des rapports NT/PT > 16 le facteur limitant de la productivité aquatique (Chapman, & Kimstach, 1996 ; Karikari, *et al.*, 2007b). Ces cas sont observés dans les sites O₅, C₄, C₂, E₁ et B₃ où on note une prolifération intense du phytoplancton et de la jacinthe d'eau du aux apports anthropiques (eaux domestiques, résidus agricoles, déchets solides, lixiviats des dépotoirs, etc.). Cette prolifération fréquente et excessive des macrophytes et des phytoplanctons est marqué par une suite de perturbations de l'activité photosynthétique caractérisées par des variations importantes de la concentration en oxygène dissous, du pH et du Eh et des teneurs très importantes en MES conduisent à une forte turbidité des eaux (Christensen, *et al.*, 1996 ; Lynda, *et al.*, 2011). Les teneurs en ETM des eaux sont en générale hétérogènes dans les différentes unités du système lagunaire (lac Ouest, Canal d'équilibre, lac Est et lac de Bè) et varient selon le métal, et le site échantillonné. Les moyennes des teneurs en ETM enregistrées dans les eaux du système lagunaire sont 8 à plus de 30 fois supérieures aux normes DCE (Ghestem, *et al.*, 2008). Seul les ETM (Ni et Sb) sont en moyenne faibles et inférieurs à la Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour l'eau (Ghestem, *et al.*, 2008). Aussi, les teneurs moyennes en ETM des eaux du système lagunaire de Lomé comparées à celles des eaux de la lagune Kpeshie (Accra, Ghana), de rivières et de mer indiquent des teneurs élevées (Tableau 10) (Martin, & Meybeck, 1979 ; Martin, & Whitfield, 1983 ; Ghestem, *et al.*, 2008 ; Addo, *et al.*, 2011). Cette comparaison montre que les eaux du système lagunaire paraissent moins polluées par rapport aux eaux de la lagune Kpeshie au Ghana (Addo, *et al.*, 2011). Toutefois, l'enrichissement en ETM du système lagunaire de Lomé est à mettre à l'actif des apports du bassin versant notamment, en dehors des sources naturelles telles que les eaux de ruissellement, les apports d'eaux usées, les lixiviats des décharges municipaux et dépotoirs anarchique (résidus des ateliers mécaniques, de teinture, de menuiserie, de peinture, des sites de recyclage de ferraille, de batteries usées, des déchets électriques et électroniques, etc.), des déchets des champs agricoles et de maraichages où les engrais à base azoté-phosphaté sont utilisés.

Le déversement des déchets ménagers et artisanaux aux abords du système lagunaire de Lomé est un danger potentiel pour l'enrichissement des eaux en micropolluants métalliques. En effet, les éléments tels Cd, Hg, Pb, Co, Zn, Ni, Pb, Sb ; As, Ag, Mo, autres les apports naturels comme les apports telluriques, sont des éléments chimiques caractéristiques d'une pollution de type urbain. A ce titre Rousseaux et *al.*, (1991), ont montré par exemple que le zinc représente 44 à 47% des piles et accumulateurs, 12 à 13% des matériaux ferreux protégés par le zinc contre la corrosion, 11 à 13% des caoutchoucs, 8 à 9% des papiers cartons, etc. La bonne corrélation entre les paramètres physicochimiques et chimiques met en évidence à travers l'ACP, l'origine anthropogénique de la pollution chimique et organique du système lagunaire de Lomé. Toutefois, le transport, la stabilité, la biodisponibilité d'un polluant, sa toxicité vis-à-vis de la biocénose aquatique dépend d'une part, de son état chimique de son engagement dans les différentes associations avec la phase minérale et/ou organique dans les différents compartiments aquatiques et d'autre part, des variations de certains paramètres notamment, le pH, les éléments majeurs, le Eh, l'oxygène dissous, la conductivité électrique (Bordin, 1991 ; Péna, & Picot, 1991 ; Callender, 2003).

Tableau 10 : Teneurs en ETM des eaux du système lagunaire de Lomé comparées à celles des eaux de quelques hydrosystèmes mondiaux (teneurs en µg/L)

ETM	Eau du système lagunaire de Lomé (Lomé, Togo)	Eau de la lagune de Kpeshie (Accra, Ghana)	Eau de rivière	Eau de mer	Réf. DCE
		<i>Addo, et al., (2011)</i>	<i>Martin et Meybeck, (1979); Martin et Whitfield, (1983)</i>	<i>Ghestem, et al., (2008)</i>	
Cd	0,11 - 2,97	2 - 8	0,05	0,05	0,25
Hg	0,07 - 2,45	-	-	-	0,05
Pb	0,78 - 35,04	5 - 58	0,1	0,03	0,4
Cu	9,65 - 27,63	-	1,5	0,5	1,4
Zn	24,23 - 97,53	19 - 162	30,0	2,0	7,8
Co	0,79 - 10,36	10 - 75	0,2	0,05	0,3
Cr	3,80 - 57,25	10 - 740	1,0	0,2	3,4
Ni	0,13 - 0,62	37 - 87	-	-	2,1
Sb	1,93 - 3,58	-	-	-	113
As	2,89 - 18,20	-	-	-	4,2
Ag	0,06 - 2,88	-	-	-	0,05
Mo	5,71 - 26,06	-	-	-	6,7
Ti	360 - 5012	-	-	-	2
Mn	95 - 10668	-	8,0	0,2	50
Fe	483 - 19450	-	40,0	2,0	200
Al	206 - 3370	-	0,5	10,0	200

5. Conclusion

L'étude des paramètres physicochimiques et chimiques des eaux du système lagunaire de Lomé a mis en évidence une dégradation de la qualité physicochimique des eaux vis-à-vis des caractéristiques des apports anthropiques. Le phénomène de pollution est appréciable d'une part, par la faible transparence de l'eau (11 à 22 cm) avec des apports excessifs en MES (47 à 107 mg/L) et une forte turbidité des eaux (20,45 à 50,35 NTU), et d'autre part les teneurs importantes de matières organiques biodégradables traduites par l'indice permanganate élevés 17,1 mg/L (COD : de 8,1 à 91 mg/L) ; l'azote total en moyenne de 15 mg/L en moyenne et le phosphore total de 1,27 mg/L met en cause l'autoépuration des eaux de ce système lagunaire. Les eaux du système lagunaire de Lomé ont une salinité élevée (plus de 2000 mg/L) caractérisée par une influence d'eau marine. Aussi, la présence des ETM comme, Cd, Hg, Pb, Zn, Cr dont les teneurs moyennes sont relativement élevées dans les eaux du système lagunaire ont été également mise en évidence par rapport à la Norme de Qualité Environnementale pour l'eau de surface en France. L'utilisation du diagramme de Piper et l'ACP comme des outils d'évaluation des interrelations entre les paramètres physicochimiques et chimiques ont montré une distribution spatiale des ETM qui sont étroitement liés aux paramètres environnementaux tels que la teneur en matière organique, le pH, l'oxygène dissous et les MES.

Remerciement

Les auteurs tiennent à remercier le Service de Coopération et d'Action Culturelle au Togo, toute l'équipe de recherche du Groupement de Recherche Eau Sol Environnement (GRESE- EA 4330), Faculté des Sciences et Techniques (Université de Limoges) pour leur soutien financier et matériel qu'ils ont apporté pour cette étude.

References:

- Abulude, F. O., Fapohunda, O. O., Awanlenhen, B. E., (2006) Determination of some heavy metals in *Procambaris clarkii*, *Palaemon sp.*, *Macrobrachium vollenhovenii* and *Penaeus notalis* from the Coastal Water of Ondo State, Nigeria. *J. Animal Vet. Adv.*, 5(1) 38-41.
- Afnor, (1997) Qualité de l'eau. Recueil des Normes Françaises Environnement. Tomes 1, 2, 3 et 4. 1372 p.
- Addo M.A., Okley G.M., Affum H.A., Acquah S., Gbadago J.K., Seno J.K. and Botwe B.O., (2011) Water Quality and Level of Some Heavy Metals in Water and Sediments of Kpeshie Lagoon, Accra, Ghana *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 3(5): 487-497.

- Akouvi, A., Dray, M., Violette, S., de Marsily, Gh., Zuppi, G. M., (2008) The sedimentary coastal basin of Togo: example of a multilayered aquifer still influenced by a palaeo-seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, 16, 419-436.
- Aminot, A., & K erouel, R., (2004) *Hydrologie des écosystèmes marins*’, Paramètres et analyses.  d. Ifremer, 336 p.
- Arrignon, J., (1998) *Am nagement piscicole des eaux douces (5e  dition)*. Lavoisier Tec. Doc.: Paris.
- Atanle, K., Bawa, L. M., Kokou, K., Djaneye-Boundjou, G., Edoth, M. T., (2013) Distribution saisonnière du phytoplancton en fonction des caractéristiques physico-chimiques du lac de Zowla (Lac Boko) dans le Sud-Est du Togo : cas de la petite saison sèche et de la grande saison sèche. *J. Appl. Biosci.* 64 4847-4857
- Ayah, M., Bawa, L. M., Djaneye-Boundjou, G., Doni, S. K., Nambo, P., (2012) Spéciation du cadmium, du chrome, du cuivre et du plomb dans les sédiments des déchets de phosphate de Kp m  (Sud-Togo). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* Vol. 6, no 1, pp. 479-492.
- Bawa, L. M., Djaneye-Boundjou, G., Boyode, B. P., Assih, B. T., (2007) Water quality evaluation from Lomé’s lagoon : Effects on heavy metals contamination on fishes. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* Vol. 11(4) 33-36
- Bloundi, M. K., (2005) *Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des facteurs anthropiques*. Thèse de Doctorat Univ. Mohammed V, Fac.Sci. Rabat & ULP-EOST Strasbourg I, 215p.
- Boillot, C., (2008) *Evaluation des risques écotoxicologiques liés aux rejets d’effluents hospitaliers dans les milieux aquatiques : Contribution à l’amélioration de la phase « caractérisation des effets »* Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 298 p+annexes
- Bordin G., (1991) *Distribution et évolution saisonnière du cuivre dissous dans un écosystème estuarien macrotidal d’Europe occidentale (estuaire de l’Aulne, France)*. *Oceanologica Acta*, 14 (5), p. 445-456.
- Boucheseiche, C., Cremille, E., Pelte, Th., Pojer, K., (2002) *Bassin Rhône-Méditerranée-corse. Guide technique n 7, Pollution toxique et écotoxicologie : notion de base*. Lyon, Agence de l’Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 82 p.
- Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., Tosi, L. (2003) *The Lagoon of Venise: geological setting, evolution and land subsidence*. *Int. J. Geosci.*, n 26-3, (p.264-268)
- Briton Bi, G.H., Yao, B., Ado, G., (2006) *Evaluation of Abidjan lagoon pollution* *J Appl Sci Environ Manage* 10(3), 175-181.
- Callender, E., (2003) *Heavy metals in the environment - Historical Trends*, pp.67-106. In *Environmental Geochemistry* (ed. B.S. Lollar) Vol. 9 Treatise

on Geochemistry (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford.

Chambers, P. A., Kent, R., Charlton, M. N., Guy, M., Gagnon, C., Roberts, E., Grove, E., and Foster, N., (2001) Nutrients and their impact on the Canadian environment. Environ. Canada, 241 pp.

Chapman, D., Kimstach, V., (1996) Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E and FN Spon, London, pp. 59-126.

Chouti W., Mama D., Alapini, F., (2010a) Etude des variations spatio-temporelles de la pollution des eaux de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin). Int. J. Biol. Chem. Sci., 4(4), 1017-1029.

Christensen J.B., Jensen D.L., Christensen T.H., (1996) Effect of dissolved organic carbon on the mobility of cadmium, nickel and zinc in leachate polluted groundwater. Water Research, 30 (12) 3037-3049.

Cunningham W.P., Saigo, B.W., (1997) Environmental Science a Global Concern. 4th Edn., WMC Brown Publisher, Country, New York, pp: 389.

Da Costa, P. Y. D., Togbe, K., Tairou, M., S., Affaton, P., Johnson, A. K.C., (2013) Contribution to the study of the “Terre de barre” of the coastal sedimentary basin of Togo (West Africa): chronostratigraphical and paleoclimatic implications. Stand. Sci. Res. and Essays Vol 1 (8):168-176, www.standresjournals.org/journals/SSRE

Dedieu, K., Rabouille, C., Gilbert, F., Soetaert, K., Metzger E., Simonucci C., Jézéquel D., Prévot F., Anschutz P., Hulth S., Ogier S., Mesnage V., (2007) Coupling of carbon, nitrogen and oxygen cycles in sediments from a Mediterranean lagoon: a seasonal perspective. Mar. Ecol. Prog. Ser., v. 346 p. 45–59

Fahmy, T., (2006) www.xlstat.com.Addinsoft.

Ghestem, J.P., Crouzet, C., Girardot, N., (2008) Estimation des fonds géochimiques en éléments traces des eaux de surface continentales et des eaux souterraines : cahier des charges pour l’analyse et le prélèvement. Version 0, BRGM/RP-56835-FR, 38 p.

Gnandi, K., Han, S., Rezaie-Boroon, M. H., Porrachia, M., Deheyn, D. D., (2011) Increased Bioavailability of Mercury in the Lagoons of Lomé, Togo: The Possible Role of Dredging. Ambio. 40 26-42.

Gnazou, M. D. T., (2008) Etude hydrodynamique, hydrogéochimique, isotopique et modélisation de l’aquifère du paléocène du bassin sédimentaire côtier du Togo”, Thèse de doctorat. FDS.UL. 204p+annexes

INERIS, (2012) Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 110p. <http://www.ineris.fr>

Isabelle, M., (1999) Infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol urbain - Vers une approche globale et

- pluridisciplinaire'', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p. 207.
- Karikari, A.Y., Asante, K. A., Biney, C.A., (2007b) Water Quality Characteristics at the Estuary of Korle Lagoon in Ghana. Unpublished paper. CSIR-Water Research Institute, P.O. Box M32, Accra-Ghana.
- Lynda, E., Tchirioua, E., Jules, N. K., Toussaint, D., (2011) Variations temporelles des paramètres physicochimiques et biotiques de deux écosystèmes aquatiques de la lagune Ebrié. *European Journal of Scientific Research*, 58(3) 414-422.
- Martin, J. M., Meybeck, M., (1979) Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Mar.Chem.*, 7 173-206.
- Martin, J.M., and Whitfield, M., (1983) The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In *Trace metals in sea water*. C.S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton, E. D. Goldberg, (eds). New York: Plenum; pp. 265-296.
- Millet, B., (1986) *Hydrologie et hydrochimie d'un milieu lagunaire tropical : le lac Togo*, Collection Etudes et Thèses O.R.S.T.O.M. 230 p.
- Miquel, G., (2003) *La qualité de l'eau et de l'assainissement en France*. Rapport No. 215 tome 1 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Sénat). 195 pp.
- Nixon, S. W., Buckley, B. A., Granger, S. L., Entsua-Mensah, M., Ansa-Asare, O., White, M. J., Mckinney, R. A., Mensah, E., (2007) Anthropogenic enrichment and nutrients in some tropical lagoons of Ghana, West Africa. *Ecol. Appl.*, 17, 144-164.
- Peltre, M.C., Muller, S., Ollivier, M., Dutartre, A., Barbe, J., Haury, J., Tremolieres, M., (2002b) Synthèse bibliographique. Les proliférations végétales aquatiques en France/caractères biologiques et écologiques des principales espèces et milieux propices. 1. Bilan d'une synthèse bibliographique. *Bull. fr. Pêche Piscic. n°s 365- 366*, 237-258.
- Péna, G., (1989) *Sels nutritifs et micropolluants métalliques dans un écosystème lagunaire : l'étang de Thau''*, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 135 pp.
- Péna, G., Picot, B., (1991) Métaux traces dans les sédiments d'une lagune méditerranéenne: l'étang de Thau. *Océanologica Acta.*, 14(5) 459-472.
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water, pp. 26-77. in M.N. Hill ed. *The Sea*. Vol.2, pp.554. John Wiley & Sons, New York.
- Rejsek, F., (2002) *Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques*, Série Sciences et techniques de l'environnement, Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, Bordeaux, France, 368p.
- Riley, J.P., and Chester, R., (1971) *Introduction to Marine Chemistry*. Academic Press, New York, 465 pp.

- Rodier, J., (2009) *Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*, 9ème éd., Dunod. Paris, 1579 p.
- Rouessac, F., Rouessac, A., (2009) *Analyse chimique-Méthodes et techniques instrumentales modernes*. 6e éd., Dunod, Paris, 481p.
- Rousseaux A. R., Navaro A., Vermande P., *Distribution des sept principaux métaux lourds dans les constituants des ordures ménagères. Etudes et Mémoires, Tribune de l'eau*, (1991) 17-25.
- Séraphin, K. K., Marcel, A. K., Antoinette, A. A., Dongui, B. K., Dago, G., (2008) *Variations saisonnières des paramètres abiotiques des eaux d'une lagune tropicale: la lagune de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire*. *European Journal of Scientific Research*, 21(3) 376-393.
- Simler, R., (2005) *Logiciel d'hydrochimie*. www.lha.univ-avignon.fr/logiciel.htm
- Traore, A., Soro, G., Kouadio, K. E., Bamba, B. S., Oga, M. S., Soro, N., Biemi, J., (2012) *Evaluation des paramètres physiques, chimiques et bactériologiques des eaux d'une lagune tropicale en période d'étiage : la lagune Aghien (Côte d'Ivoire)*. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(6) 7048-7058,
- Trinquier, C., (2009) *Le risque d'eutrophisation des lagunes Méditerranéennes : Le cas de la lagune de Thau (Hérault)*. Master 1 professionnel *Gestion des catastrophes et des risques naturels*. Université Paul Valéry-Montpellier III UFR III : Sci. Hum., Sci. Environ. Départ. Géogr. Amé., 121p.