



Physical and chemical parameters and trace metal concentrations in the Ebrié Lagoon (Côte d'Ivoire) : influence of tides and urban wastewaters Paramètres physiques et chimiques et métaux lourds des eaux de la Lagune Ebrié (Côte d'Ivoire) : influence de la marée et des effluents liquides urbaines

Inza Bakary, Yao Koffi Marcellin *

Centre de Recherches Océanologiques (CRO), 29, Rue des pêcheurs /BP V 18 Abidjan Côte d'Ivoire.

Received 11 Oct 2014, Revised 16 Feb 2015, Accepted 16 Feb 2015

*Auteur correspondant: E-mail : markcelklindr@gmail.com ; Tel : +225 60042828

Abstract

The impact of urban wastewaters on total metal concentrations in the Ebrié Lagoon (Côte d'Ivoire) is unknown. Physical and chemical parameters (temperature, conductivity, dissolved oxygen, salinity, pH, and redox hydrogen potential) and total metal concentrations (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, and Zn) were measured in water samples from Cocody Bay and wastewater effluents from 5:00 am to 10:00 pm in December 2008. Dissolved oxygen concentrations at 0.5 m depth in the lagoon were below 2.7 mg/L from 5:00 am to 3:00 pm over two consecutive days. This may explain in part the massive fish mortalities which occur between late November and January each year in the Ebrié Lagoon. Physical and chemical parameters and metal concentrations in the lagoon were highest during high tides, except for Zn and redox hydrogen potential. Total metal concentrations ($\mu\text{g/L}$) in water ranged from 5 to 172 for Fe, 79 to 91 for Cu, 30 to 47 for Cd, 0 to 96 for Pb, 5 to 132 for Cr, and 36 to 376 for Zn. The wastewater / lagoon water concentration ratios were 20.86-37.82 for Fe, 1.53-6.3 for Zn, 0.8-1.7 for Cu, 0.5-2.6 for Cd, and 0.5-2 for Cr, which indicate that wastewaters are significant sources of metals in the urban area of the Ebrié Lagoon. Cd and Cr concentrations in Cocody Bay exceeded the limits of the French and WHO standards for surface waters. Total metal concentrations in wastewaters exceeded the US EPA standards in general. Wastewaters should be treated before being discharged in the Ebrié Lagoon.

Key words: Metals, Pollution, Effluents, Estuary, Tides, Ebrié Lagoon,

Résumé

L'impact des eaux usées urbaines sur la contamination métallique des eaux de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire) reste inconnu, malgré les inquiétudes selon lesquelles les baies de cette lagune sont menacées par la pollution par les métaux toxiques. Des paramètres physiques et chimiques et concentrations totales de métaux (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr et Zn) ont été déterminés à 0,5 m de la surface des eaux de la baie de Cocody et dans les effluents liquides qui s'y déversent. Les concentrations en oxygène dissous des eaux lagunaires ont été en dessous de 2,7 mg/L de 5 heures à 15 heures sur deux jours consécutifs. Ce résultat explique en partie la mortalité massive de poissons dans la lagune Ebrié de façon cyclique entre fin novembre et janvier de chaque année. Les valeurs des paramètres physiques et chimiques et des concentrations des métaux ont été plus élevées pendant les marées hautes, à l'exception du zinc et du potentiel redox d'hydrogène. Les concentrations totales des métaux dans l'eau ont varié en $\mu\text{g/L}$, de 5 à 172 pour Fe, 79 à 91 pour Cu, 30 à 47 pour Cd, 0 à 96 pour Pb, 5 à 132 pour Cr, et 36 à 376 pour Zn. Les rapports concentration des métaux dans les eaux usées/ concentration des métaux dans les eaux de la lagune ont été dans l'intervalle 20,86-37,82 pour Fe, 1,53-6,3 pour Zn, 0,8-1,7 pour Cu, 0,5-2,6 pour Cd, et 0,5-2 pour Cr, ce qui indique que les eaux usées sont des sources significatives de la contamination métallique des eaux de la baie de Cocody. Les concentrations totales de Cd et Cr dans la baie de Cocody ont dépassé les limites des normes françaises et de l'OMS des eaux de surface. Dans les effluents d'eaux usées, les concentrations métalliques ont dépassé la norme recommandée par US EPA sauf pour Cd et Pb.

Mots clés : Métaux, pollution, effluents, estuaire, marée, Lagune Ebrié

1. Introduction

Située au bas du bassin versant du Gourou et le long du boulevard lagunaire où le trafic routier est intense, la baie de Cocody à l'instar de l'écosystème lagunaire Ebrié, est riche en produits de pêche [1]. Elle est soumise et en permanence, à des perturbations diverses dues aux activités anthropiques croissantes. En effet, les eaux usées des

quartiers surpeuplés d'Abidjan (Plateau, Cocody, Adjamé et Abobo) sont quotidiennement déversées dans la baie par l'intermédiaire de gros caniveaux souterrains et à ciel ouvert. Ces rejets, face au faible renouvellement des masses d'eaux, intensifient la dégradation de la qualité des eaux lagunaires. La baie de Cocody subit également l'influence d'eaux marines et continentales par le biais du canal de Vridi et de l'embouchure du fleuve Comoé, respectivement [2]. Malgré sa petite surface, la baie de Cocody est d'un grand intérêt touristique et environnemental. Cependant, elle est menacée par différents facteurs perturbateurs (bruit, rejets liquides, déchets solides, remblayage, etc.) qui la fragilisent de plus en plus fort tous les jours. Les effluents liquides sont déversés dans la baie sans traitement préalable [3, 4]. Ces eaux usées peuvent contenir d'importantes quantités de substances chimiques notamment les métaux toxiques [5]. Ces métaux, au regard de leur non biodégradabilité, bioaccumulation et toxicité, peuvent à des concentrations élevées ou non, être dangereux pour la faune, la flore et l'homme [6-8]. Les travaux antérieurs sur la contamination métallique des eaux en lagune ont émis l'hypothèse selon laquelle les effluents liquides de la ville d'Abidjan sont responsables de l'accumulation des métaux dans la lagune Ebrié [9-13]. Cependant, aucune étude n'a porté sur la charge métallique de ces effluents liquides.

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'impact des effluents liquides sur la contamination métalliques (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, Zn) des eaux de la baie de Cocody. L'étude se focalise aussi sur l'influence de la marée et des paramètres physiques et chimiques (pH, température, salinité, conductivité électrique, potentiel redox d'hydrogène (RHP), et oxygène dissous) sur la concentration des métaux dans les eaux de lagune.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Localisation des stations de prélèvement

L'étude a été réalisée dans la baie de Cocody, en lagune Ebrié, les 21 et 23 décembre 2008. Les prélèvements d'eaux (station STD, en face du Stade Félix Houphouët Boigny, Plateau) ont été faits en surface (0,5 m), à intervalle d'une heure, entre 5 heures du matin et 22 heures. Les effluents liquides ont été prélevés dans cinq (5) caniveaux à ciel ouvert en raison de deux (2) stations par effluent (Figure 1). Cinq (5) effluents liquides (EFL₁ à EFL₅) dont les volumes se déversant dans la baie sont significatifs ont été retenus. Les caractéristiques de ces effluents sont les suivantes :

EFFL₁ : Mélange d'eaux domestiques, d'eaux pluviales, d'eaux vannes, d'eaux de vidange, et d'huile usagées de voitures des quartiers Williamsville et Adjamé,

EFFL₂ : Mélange d'eaux domestiques, d'eaux pluviales, d'eaux vannes, de vidange, et d'huile usagées de voitures d'Abobo, II-Plateau, Williamsville et d'Adjamé 220 logements,

EFFL₃ : Mélange d'eaux domestiques, d'eaux pluviales, et eaux vannes de Cocody II-Plateau,

EFFL₄ : Mélange d'eaux usées hospitaliers, d'eaux pluviales, et eaux vannes de Cocody Danga,

EFFL₅ : Mélange d'eaux domestiques, d'eaux pluviales, et eaux vannes de Cocody Ecole de Police.

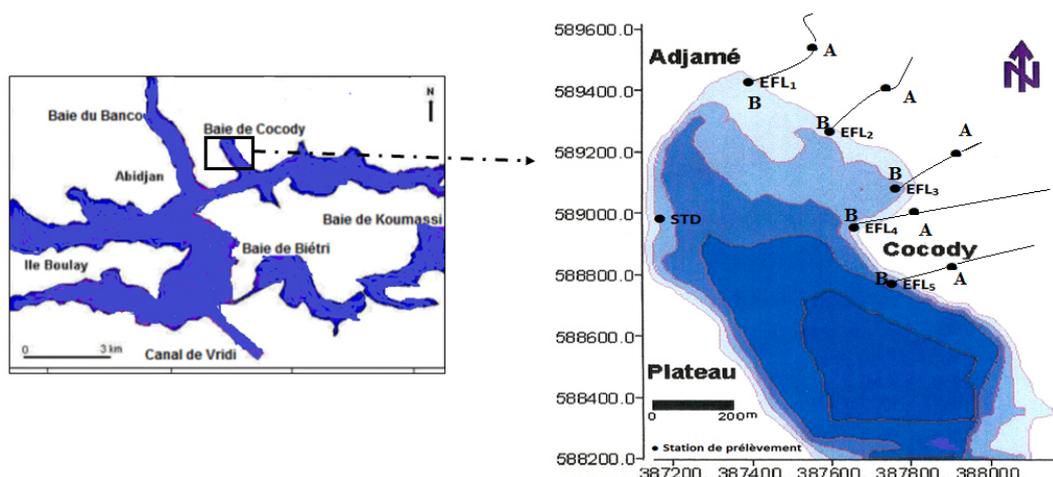


Figure 1 : Localisation des sites d'échantillonnage en baie de Cocody, lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. EFL_i : Effluent numéro i. Chaque effluent a été échantillonné aux points A et B. STD : Station de prélèvement dans la baie de Cocody.

2.2. Echantillonnage

Les échantillons d'eaux de lagune ont été prélevés à 0,5 m de la surface à l'aide d'une bouteille de Niskin de 2 L. Les prélèvements destinés aux analyses physico-chimiques ont été effectués dans des flacons en polyéthylène de volume 1,5 L. Au total, 54 échantillons ont été prélevés pendant ces deux jours dont 36 pour les eaux de lagune et 18 pour les effluents liquides. Le pH des échantillons pour l'analyse des métaux a été ramené à 2 à l'aide d'acide sulfurique de haute pureté analytique (Sigma Aldrich, USA). Le transport au laboratoire des flacons de prélèvement a été effectué dans une glacière à 4°C puis les échantillons ont été conservés au réfrigérateur à (- 20 °C) avant analyse dans les 24 heures.

2.3. Méthodes d'analyse

Sur place, la température de l'eau, le pH, la salinité, le potentiel redox d'hydrogène (RHP), et la conductivité électrique ont été mesurés à l'aide du multi-paramètre portatif type HI-9828. La température de l'air a été mesurée au moyen de l'eau d'un thermomètre et le niveau de l'eau à l'aide d'une règle graduée. Au laboratoire, les eaux ont été analysées pour l'oxygène dissous par la méthode de Winkler [14] et les métaux (Fe, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn) au moyen d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (SpectrAA100, Varian, Japon) à la flamme Air-acétylène. Les limites de détections ont été de 0,007 µg/L pour Fe et 0,003 µg/L pour Cd, Pb, Cr, Zn et Cu.

3. Résultats et discussion

3.1. Paramètres physico-chimiques et marégraphiques

Les résultats des mesures de la température, du pH, de RHP, de la salinité, de la conductivité électrique (C.E), de l'oxygène dissous (O.D) et de l'amplitude de la marée des eaux de surface de la baie de Cocody et des effluents liquides sont représentés sur la Figure 2 et dans le Tableau 1.

La température moyenne des eaux au cours de la période d'échantillonnage se situent entre 26,9°C et 29,8°C (Figure 2). Des résultats équivalents ont été obtenus par [2] dans les eaux lagunaires aux alentours d'Abidjan. Ces températures sont légèrement faibles par rapport à celles de l'air (25,2°C-31,5°C) mais elles suivent la même tendance. La température de l'eau suit l'influence du jeu de marée caractérisée par une température moyenne de 27,91°C pendant le jusant et 29,51°C pendant le flot. Les pics de températures observés à 13 heures sont probablement liés à un déversement ponctuel d'eaux usées domestiques dans la lagune. Au niveau des rejets liquides, les températures varient entre 27,7°C et 31,9°C (Tableau 1); cette variation peut être expliquée par le refroidissement progressif au contact de l'air, étant donné que les eaux usées sont drainées dans des caniveaux à ciel ouvert à l'entrée de la baie.

Les eaux de la baie de Cocody sont de nature alcaline. En effet, le pH moyen pour toute la période d'étude est de 7,09 (extrêmes : 6,75 à 9 heures et 7,82 à 21 heures). Le pic (pH = 7,82) observé à 21 heures, pendant le jusant, est probablement lié à une entrée massive d'eaux résiduaire dans la lagune. Pour ce paramètre, le pH moyen est élevé pendant le flot (pH = 7,04) et faible pendant le jusant (pH = 6,98). Aux points de prélèvement, la moyenne de pH est de 6,67 pour l'effluent liquide EFL₁ (extrêmes : 6,61 et 6,72), 6,84 pour l'effluent liquide EFL₂ (extrêmes : 6,82 et 6,87), 7,1 pour l'effluent liquide EFL₃ (extrêmes : 7,09 et 7,11), 5,35 l'effluent liquide EFL₄ et 7,35 pour l'effluent liquide EFL₅ (extrêmes : 7,23 et 7,47) (Tableau 1). Pendant le mois de décembre, les eaux lagunaires sont caractérisées par une prépondérance d'eaux marines dont le pH tourne autour de 8. Les faibles valeurs de pH de la baie de Cocody sont imputables aux rejets domestiques liquides caractérisés par des pH acides (Tableau 1).

Le potentiel redox d'hydrogène des eaux de surface de la baie oscille entre 0,7 et 24,9 mV. Ces valeurs se situent dans le même ordre de grandeurs que celles obtenues dans les effluents liquides (2,3 à 23,24 mV) (Tableau 1). La courbe de tendance montre une évolution contraire à celle du pH. Ceci est confirmé par les valeurs moyennes de RHP élevées pendant le jusant (11,1 mV) et faibles pendant le flot (6,3 mV). D'une manière générale, dans les systèmes aqueux, le potentiel redox (ou disponibilité en électrons) affecte les états d'oxydation des éléments (H, C, N, O, S, Fe...). Lorsque les concentrations en oxygène augmentent, le milieu devient moins réducteur, ce qui se traduit par une augmentation du potentiel redox.

L'évolution horaire de la salinité des eaux de surface confirme l'influence des eaux marines sur les eaux la baie de Cocody. La salinité moyenne est élevée pendant le flot (10,91) et bas pendant le jusant (8,73). La salinité des eaux de la baie de Cocody est la résultante de l'influence des eaux de précipitations et des apports océaniques et fluviaux (crue et étiage des fleuves et des rivières forestières). La salinité des effluents liquides prélevés au niveau des cinq points d'observations oscille entre 0 et 16,7, autour d'une moyenne de 2,43 (Tableau 1). Ces valeurs sont inférieures à la salinité des eaux de la baie. L'évolution de la conductivité suit celle de la salinité, ce qui indique une forte corrélation entre ces deux paramètres (Figure 2).

La concentration en oxygène dissous des eaux de surface de la baie de Cocody varie de 0 à 3,7 mg/L, autour d'une moyenne de 1,56 mg/L. Cette faible teneur en oxygène dissous peut provoquer une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments. De façon cyclique, de fin novembre à janvier, chaque année, des mortalités massives de poissons sont observées dans la baie de Cocody. Ceci pourrait s'expliquer par une faible concentration d'oxygène dissous dans la colonne d'eau. En effet, les concentrations d'oxygène dissous ont varié entre 0 et 2,7 mg/L entre 5 heures et 15 heures, pendant les deux jours consécutifs des campagnes d'échantillonnages de cette étude.

Les variations de l'oxygène dissous sont aussi liées au rythme des marées. En témoignent, les pics observés à 15, 17, et 20 heures pendant le flot, qui pourraient être la conséquence de l'oxygénation des eaux par l'eau de mer ; par contre, le pic observé à 10 heures pendant le jusant pourrait être lié à l'activité photosynthétique et à l'oxygène

atmosphérique. La teneur en oxygène dissous dans les effluents liquides est très faible (0,75 mg/L), ce qui est dû aux micro-organismes qui utilisent l'oxygène dissous comme source d'énergie pour dégrader la matière organique. La variation temporelle de l'amplitude de la marée en baie de Cocody est irrégulière (Figure 2). Cette marée est asymétrique et dure 13 heures. Le jusant qui atteint son maximum à 11 heures avec une amplitude de 29 cm, dure 7 heures alors que le flot, maximum à 17 heures (25,7 cm), dure 6 heures. Les résultats de cette étude diffèrent de ceux de [2], qui ont trouvé des courants de marée d'une durée de 12 heures où le jusant et le flot ont la même durée (6 heures) dans la baie de Cocody.

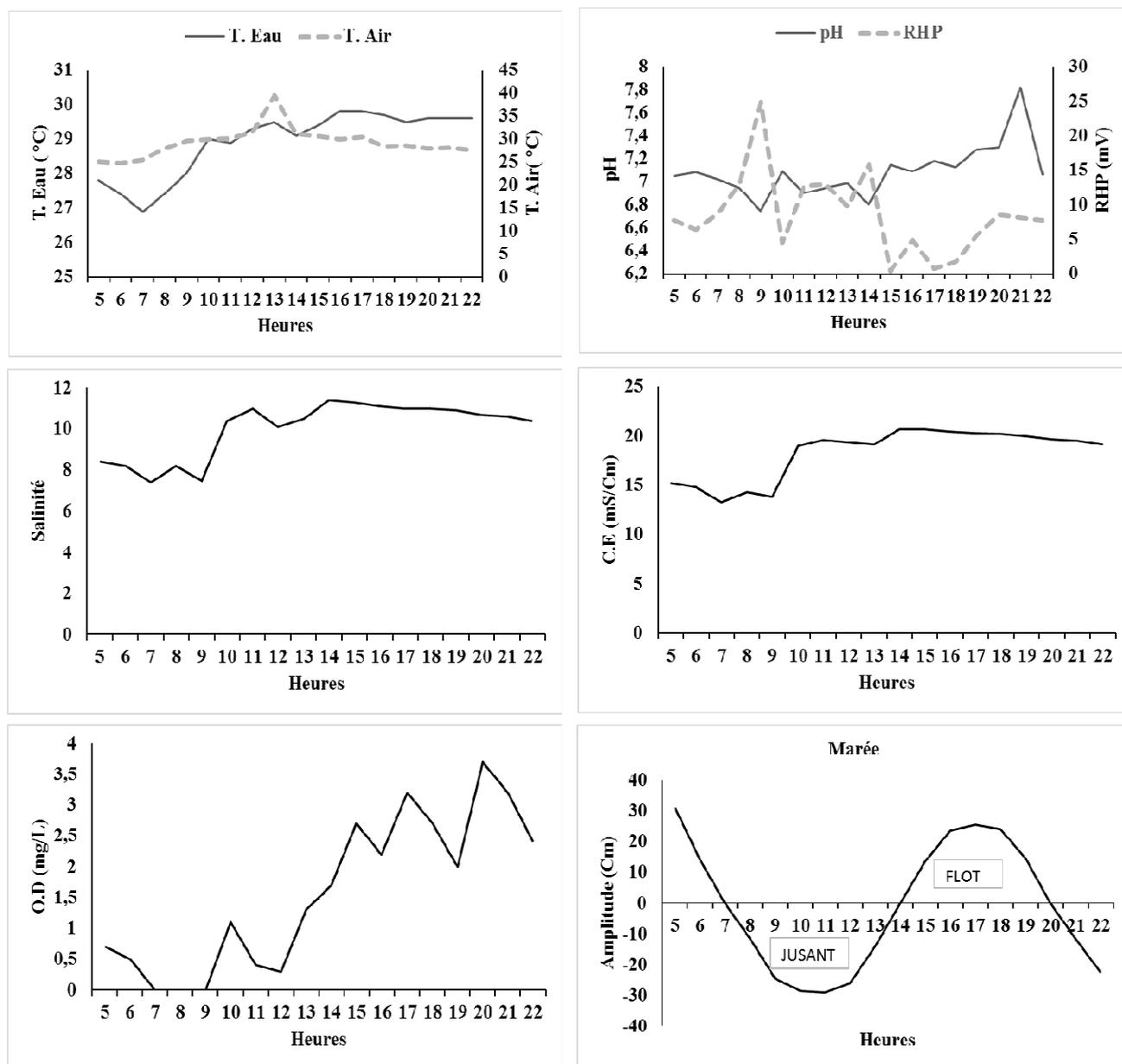


Figure 2 : Evolution horaire de quelques paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la baie de Cocody. T. Eau : température de l'eau ; T. Air : température de l'air ; RHP : potentiel redox d'hydrogène ; C.E : conductivité électrique ; O.D : oxygène dissous.

3.2. Concentrations de métaux lourds dans les eaux et effluents liquides

Le tableau 2 montre les valeurs extrêmes, moyennes et écart-types (µg/L) des métaux étudiés. Les concentrations totales des métaux dans la baie de Cocody ont varié entre 5-172 µg/L pour Fe, 79-91 µg/L pour Cu, 30-47 µg/L pour Cd, <0.005-96 µg/L pour Pb, 5-132 µg/L pour Cr, et 36-376 µg/L pour Zn.

Au niveau des effluents liquides, les concentrations totales des métaux ont varié de 1064 à 1875 µg/L pour Fe, 71 à 145 µg/L pour Cu, 20 à 69 µg/L pour Cd, 7 à 222 µg/L pour Cr, 144 à 592 µg/L pour Zn. Les concentrations totales

de Pb des effluents ont été inférieures à la limite de détection, ce qui indique que le plomb est fortement retenu par adsorption ou floculation et déposition le long de son trajet dans les effluents.

Tableau 1 : Valeurs moyennes de quelques paramètres physiques et chimiques des effluents liquides de la Baie de Cocody

Effluents liquides	pH	RHP (mV)	Salinité	T. EFL (°C)	C.E (mS/cm)	O.D (mg/L)	N.P
EFL _{1A}	6,72	27,7	3,2	27,7	6,24	0	4
EFL _{1B}	6,61	25,7	16,7	31,9	12,73	0	4
EFL _{2A}	6,82	17,3	0,5	29,9	1,5	0	4
EFL _{2B}	6,87	15,7	0,5	30,2	1,51	0	4
EFL _{3A}	7,11	3,3	0,3	30,4	1,24	0	4
EFL _{3B}	7,09	4,3	0,3	30,3	1,19	0	4
EFL _{4B}	5,35	96,5	0	29,3	0,22	2,4	2
EFL _{5A}	7,23	2,3	0,2	31,2	0,95	0	4
EFL _{5B}	7,47	16,4	0,2	31,5	0,93	0	4
Moyenne	6,81	23,24	2,43	30,27	2,95	0,27	
Ecart-type	0,57	27,34	5,13	1,19	2,55	0,75	

T. EFL : température effluents liquides ; RHP : potentiel redox d'hydrogène ; C.E : conductivité électrique ; O.D : oxygène dissous ; N.P : nombre de prélèvement

Les concentrations des métaux lourds étudiés dans l'eau ont été comparées à celles obtenues dans les effluents liquides. Les rapports de concentrations métalliques effluents liquides/eau de lagune sont consignés dans le tableau 3. Ces rapports varient de 20,87 à 37,82 pour Fe, de 1,53 à 6,3 pour Zn, de 0,48 à 2,6 pour Cd, de 0,24 à 2,16 pour Cr, et de 0,84 à 1,71 pour Cu. Ces valeurs montrent que les effluents liquides domestiques sont des sources significatives de métaux dans la baie de Cocody. Le classement par ordre décroissant de contamination en métaux étudiés des eaux de surface de la baie est le suivant: Cr > Zn > Cu > Fe > Cd > Pb. Par contre, dans les effluents liquides, cet ordre s'établit comme suit : Fe > Zn > Cu > Cr > Cd > Pb. Des résultats similaires ont été obtenus par [15],[16] ont rapporté qu'aux Etats-Unis (U.S.A), les sources domestiques sont responsables à un tiers (1/3) des charges en cuivre et zinc dans les stations de traitement d'eaux usées. Par ailleurs la somme des rapports de concentrations métalliques ($\sum R$) a permis de classer les sites d'effluents du plus contaminés au moins contaminés : EFL₂ ($\sum R = 8,50$) ; EFL₅ ($\sum R = 8,11$) ; EFL₁ ($\sum R = 7,72$) ; EFL₃ ($\sum R = 6,66$) ; et EFL₄ ($\sum R = 6,01$). Cette différence de concentrations entre ces effluents révèle une diversité de sources de contaminants dans les effluents. En effet, les effluents de cette étude correspondent à des caniveaux à ciel ouverts, construits pour les eaux de pluies. Malheureusement, ces caniveaux sont devenus le dépotoir de toutes sorte de déchets : eaux vannes, eaux résiduaires, et toutes sorte de déchets solides.

Tableau 2 : Valeurs extrêmes, moyennes et écart-types ($\mu\text{g/L}$) des métaux lourds étudiés dans les eaux et effluents liquides de la baie de Cocody

Paramètres	Fe	Cu	Cd	Pb	Cr	Zn
Eaux de lagune (n= 36)						
Min.	50	79	30	ILD	5	36
Max.	172	91	47	96	132	376
Moy.	51	85	42	27	103	94
Ecart-type	42	3	5	28	70	83
Effluents liquides (n= 18)						
Min.	1064	71	20	ILD	7	144
Max.	1875	145	69	ILD	222	592
Moy.	1600	93	47	ILD	83	319
Ecart-type	289	20	28	ILD	70	147

Min. : valeur minimale ; Max. : valeur maximale ; Moy. : Valeur moyenne ; ILD : inférieur à la limite de détection
 n : nombre d'échantillons

L'influence de la marée sur la concentration des métaux dans la baie de Cocody est représentée par la Figure 3. Les concentrations les plus élevées ont été observées pendant la marée haute pour Pb (flot : 27 µg/L ; jusant : 17 µg/L), Cr (flot : 93 µg/L ; jusant : 62 µg/L), Cu (flot : 87 µg/L ; jusant : 82 µg/L), Fe (flot : 42 µg/L ; jusant : 38 µg/L), et Cd (flot : 42 µg/L ; jusant : 41 µg/L). Par contre, la concentration de Zn a été plus élevée pendant la marée basse (flot : 71 µg/L ; jusant : 98 µg/L). Cependant, aucune différence significative n'a été révélée par l'analyse de la variance (ANOVA, $p < 0,05$). Les concentrations élevées apparentes pendant la marée haute ou basse des métaux dans cette étude peuvent s'expliquer probablement par les interactions entre les eaux et les berges lagunaires d'une part, et d'autre part, des interactions eaux-sédiments. Pendant les hautes marées, les eaux de la lagune débordent jusqu'aux berges, ce qui entraîne un lessivage des berges. Ce lessivage contribue à la contamination des eaux par les métaux adsorbés sur les sols des berges. De plus, les courants de marées induisent un largage des métaux dans la colonne d'eau lors des interactions eaux-sédiments.

Tableau 3 : Valeurs des rapports des concentrations des métaux dans les eaux de caniveaux sur les concentrations des métaux dans les eaux de lagune dans la baie de Cocody

Sites	Fe	Cu	Cd	R (Pb)	R (Cr)	R (Zn)
STD	1	1	1	1	1	1
EFL1A	36,76	1,13	1,6	NC	2,16	2,49
EFL1B	26,47	1	1,14	NC	1,64	2,86
EFL2A	34,73	0,93	1,64	NC	0,99	3,5
EFL2B	34,29	0,84	0,64	NC	1,12	6,3
EFL3A	20,86	1,06	0,79	NC	0,24	5,45
EFL3B	31,92	1,07	0,64	NC	0,24	4,37
EFL4A	24,35	0,98	2,6	NC	0,07	2,02
EFL5A	37,82	1,09	0,48	NC	0,31	2,02
EFL5B	35,18	1,71	0,48	NC	0,51	1,53

NC : non calculé ; R : rapport

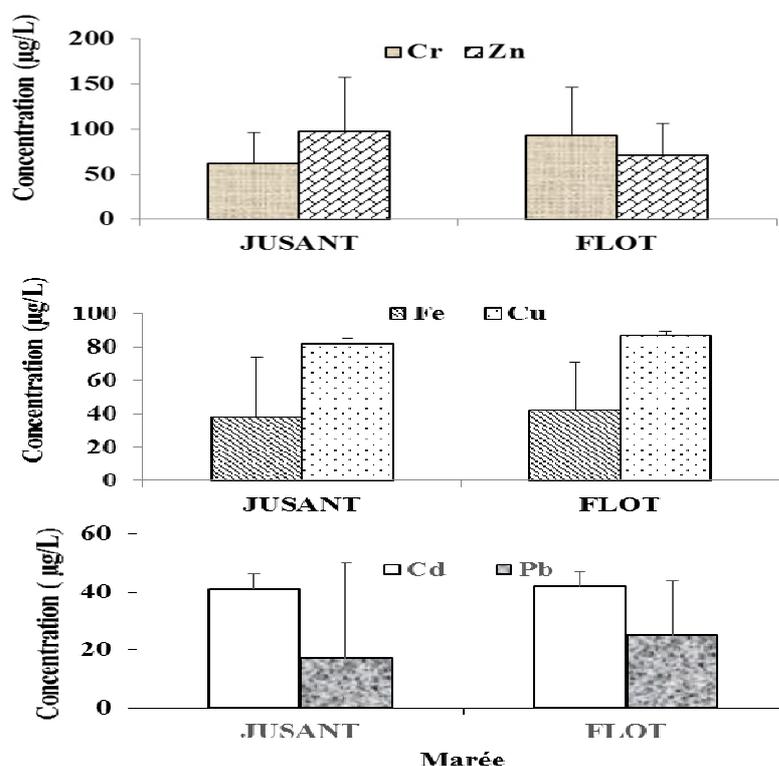


Figure 3 : Variations marégraphiques des concentrations des métaux (Fe, Cu, Cd, Cr, Zn, Pb) dans les eaux de surface de la baie de Cocody

3.2. Corrélation entre paramètres physico-chimiques et métaux lourds

L'influence des paramètres physique et chimique sur la concentration des métaux dans les eaux de la baie de Cocody a été déterminée par le calcul des corrélations de Pearson. Les résultats sont représentés dans les Tableaux 4 (Flot) et 5 (Jusant). Pendant la marée haute, une corrélation inverse significative ($p < 0.05$) a été observée entre le pH et Cu ($R^2 = -0.69$), entre la salinité et Cd ($R^2 = -0.78$), entre RHP et Fe ($R^2 = -0.76$), entre la température et Cr ($R^2 = -0.73$), et entre la salinité et Cr ($R^2 = -0.66$). Pendant la marée basse, une corrélation inverse significative ($p < 0.05$) a été observée entre la salinité et Cu ($R^2 = -0.79$). La corrélation inverse du pH et de la salinité avec les métaux peut être liée aux processus de complexations et de floculations qui ont lieu dans la baie, sous l'effet de l'augmentation de la force ionique induite par l'élévation de pH et de salinité. Cette observation est corroborée par les travaux de [17] qui ont rapporté une augmentation de concentration des métaux lourds dans les sédiments de l'estuaire Godavary (Inde). La corrélation inverse entre la température et la concentration de Cr dans cette étude pourrait être le fait d'une coïncidence. En effet, il est de plus en plus rapporté une augmentation des métaux dans la colonne d'eau par lixiviation et migration sous l'influence du réchauffement globale [18].

Tableau 4 : Matrice de corrélations de Pearson entre les paramètres physico-chimiques et métaux lourds des eaux de surface de la baie de Cocody (Flot).

	pH	RHP	Sal	T ° Eau	Cond	T ° Air	Fe	Cu	Cd	Pb	Cr	Zn
pH	1											
RHP	-0,44	1										
Sal	-0,51	-0,20	1									
T ° Eau	-0,64	0,31	0,32	1								
Cond	-0,88*	0,06	0,83*	0,60	1							
T ° Air	-0,76*	0,37	0,45	0,95*	0,73*	1						
Fe	0,53	-0,76*	-0,24	-0,09	-0,32	-0,24	1					
Cu	-0,69*	0,75*	0,15	0,41	0,42	0,45	-0,87*	1				
Cd	0,43	-0,22	-0,78*	-0,49	-0,60	-0,51	0,39	-0,35	1			
Pb	0,39	-0,51	-0,32	-0,35	-0,31	-0,33	0,36	-0,35	0,76*	1		
Cr	0,50	0,10	-0,66*	-0,73*	-0,72*	-0,83*	-0,01	-0,07	0,46	-0,02	1	
Zn	0,28	-0,28	-0,07	-0,12	-0,20	-0,30	-0,02	0,21	0,07	0,35	0,19	1

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

Tableau 5 : Matrice de corrélations de Pearson entre les paramètres physico-chimiques et métaux lourds des eaux de surface de la baie de Cocody (Jusant)

	pH	RHP	Sal	T ° Eau	Cond	T ° Air	Fe	Cu	Cd	Pb	Cr	Zn
pH	1											
RHP	-1,00	1										
Sal	-0,23	0,20	1									
T ° Eau	-0,37	0,40	-0,76*	1								
Cond	-0,39	0,36	0,96*	-0,55	1							
T ° Air	-0,46	0,44	-0,48	0,74*	-0,33	1						
Fe	-0,08	0,13	-0,41	0,30	-0,43	0,15	1					
Cu	0,02	0,01	-0,79*	0,60	-0,81*	0,31	0,26	1				
Cd	-0,08	0,14	-0,52	0,41	-0,53	-0,06	0,44	0,78*	1			
Pb	0,22	-0,20	-0,38	0,15	-0,43	-0,11	0,56	0,38	0,23	1		
Cr	0,43	-0,45	-0,10	-0,14	-0,14	-0,22	-0,67	0,04	-0,22	-0,25	1	
Zn	-0,48	0,46	0,08	0,14	0,13	0,32	0,38	-0,11	-0,31	0,52	-0,36	1

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

3.3. Concentrations métalliques des eaux, effluents liquides et valeurs normatives

Les concentrations métalliques des eaux et effluents liquides de différentes localités du monde et valeurs guides sont données dans le Tableau 6. La concentration de Fe des eaux de la baie de Cocody, est environ 26 fois plus faible que

celle de la lagune du Ghana, et est également inférieure à la limite de la norme française. Les concentrations de Cu, Pb, et Zn sont inférieures aux limites de l'OMS. Les fortes teneurs de Cu, Pb, et Zn observées dans les eaux pourraient être imputables aux sources anthropogéniques. Seules les concentrations de Cd et Cr sont supérieures à la limite de la norme française. Cependant, la concentration en Cd (42 µg/L) est du même ordre de grandeur que celle trouvée à Benin city au Nigeria (43 µg/L) (Tableau 6). Quant à la teneur de Zn, elle excède la limite fixée par l'OMS. La concentration de Fe (1600 µg/L) des effluents de la baie de Cocody est supérieure à celle de l'effluent de New York (600 µg/L) et à la limite fixée par USEPA (1000 µg/L). La concentration de Cu (93 µg/L) à la norme US EPA (Tableau 6). La concentration de Cd (42 µg/L) des effluents de la baie de Cocody est au-dessous de la valeur 50 µg/L recommandée par US EPA dans les effluents domestiques.

La concentration moyenne de Zn (319µg/L) dans les effluents d'eaux usées qui se déversent dans la baie de Cocody est supérieure à la valeur (100 µg/L) recommandée par US EPA dans les effluents domestiques. Nos résultats ont montré qu'en baie de Cocody, les concentrations des métaux à l'exception de Pb et Cr sont inférieures à celles des effluents liquides. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'une fois dans l'eau, les concentrations des métaux subissent une dilution. De plus, une fraction sédimente ou s'accumule dans des organismes aquatiques.

Tableau 6 : Concentrations métalliques (µg /L) des eaux et effluents de quelques localités dans le monde

Site ou Norme	Echan.	Fe	Cu	Cd	Pb	Cr	Zn	Références
Baie de Cocody	Eau	51	85	42	27	103	94	Présente étude
Lagune Ghana		1320	158	-	57	-	160	[19]
Benin City, Nigeria		-	152	43	110	72	128	[20]
Norme OMS		-	2000	3	10	50	3000	[21]
Norme française		1000	1000	5	50	50	5000	[22]
Baie de Cocody	Effl. liquide	1600	93	47	ILD	83	319	Présente étude
New York		600	63	0,6	5	3	-	[23]
Dar es Salaam (Tanzanie)		-	10	40	270	130	40	[24]
Benin City, Nigeria		-	194	72	125	79	174	[20]
Norme USA		1000	50	50	50	50	100	[25]

Echan. : Echantillon ; Effl. : Effluent

Conclusion

Les eaux de la baie de Cocody (Lagune Ebrié, Côte d'Ivoire) sont menacées par la pollution par les métaux, due aux effluents d'eaux usées qui s'y déversent. Les concentrations totales des métaux dans l'eau ont varié en µg/L, de 5 à 172 pour Fe, 79 à 91 pour Cu, 30 à 47 pour Cd, 0 à 96 pour Pb, 5 à 132 pour Cr, et 36 à 376 pour Zn. Des six métaux (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, Zn) étudiés, Cd et Cr ont des concentrations qui dépassent les limites des normes françaises et de l'OMS des eaux de surface. Dans les effluents liquides, à l'exception de Cd et Pb tous les métaux ont des concentrations qui dépassent la norme recommandée par US EPA. Les rapports de concentrations métalliques (Effluents liquides/Eau) ont été dans l'intervalle 20,86-37,82 pour Fe, 1,53-6,3 pour Zn, 0,8-1,7 pour Cu, 0,5-2,6 pour Cd, et 0,5-2 pour Cr. Ce qui montre que les eaux de caniveaux sont des sources de pollution majeures en métaux lourds de la baie de Cocody. Les concentrations des métaux lourds dans les eaux de la lagune dépendent aussi des interactions eaux de lagune - berges et eaux de lagune- sédiments induites par les marées. Les variations de certains paramètres physiques et chimiques étudiés sont liées au rythme des marées. Des mesures doivent être prises par les autorités pour traiter les eaux usées avant leur rejet dans la lagune Ebrié.

Remerciement. Les auteurs remercient Dr Bamba Siaka Barthélémy, Directeur du Centre de Recherches Océanologiques (CRO) pour avoir mis les moyens techniques à notre disposition pour l'accomplissement de ce travail.

Bibliographie

1. Scheren P.A.G.M., Kroeze, C., Janssen F.J.J.G., Hordijk L., Ptasiński K. J., *J Mar Syst.*, 44 (2004) 1.

2. Monde S., Coulibaly A.S., Wango T.E., Aka K., *Rev. Paralia* 4 (2011) 1.
3. Soro G., Metongo S.B., Soro N., Ahoussi K.E., Kouamé K.F., Zade S.G.P., Soro T., *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 3 (2009) 1408.
4. Marchand M., Martin J.L., *Journal. Ivoir. Océanol.*, 1 (1985) 33.
5. Sörme L., Lagerkvist R., *Sci Total Environ.*, 298, (2002) 131.
6. Ochieng E. Z, Lalah J. O., Wandiga S. O., *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 79 (2007) 570.
7. Nhari F., Sbaa M., Vassel J. L., Fekhaoui M., El Morhit M., *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (2014) 1477
8. El fadeli S., Bouhouch R., El abbassi A., Chaik M., Aboussad A., Chabaa L., Lekouch N., Hurrell R. F., Zimmermann M.B., Sedki A., *J. Mater. Environ. Sci.*, 5 (2014) 225
9. Yao K.M., Soro M.B., Trokourey A., Bokra Y., *Aurop. Jour.Sci.Res.*, 34 (2009) 280.
10. Kouassi N.L.B., Yao K.M., Trokourey A., Soro M.B., *Bull. Chem. Soc. Ethiop.*, 28 (2014) 245.
11. Kouassi N.L.B., Yao K.M., Trokourey A., Soro M.B. *Environ Forensics*, 16 (2015) 96-108.
12. Affian K., Robin M., Maanan M., Digbehi B., Djagoua E.V., Kouame F., *Environ. Monit. Assess.*, 159 (2009) 531.
13. Coulibaly, S., Atse, B.C., Soumailla S., Kouadio, J.K., N'Guessan, J.K., 2012. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 88 (2012) 571.
14. Rodier J., 7^e édition, *Dunod, Paris*, (1996) 1350.
15. Gray S.R., Becker N.S.C B., *Urban Water*, 4 (2002) 331.
16. Davis J.A., *Jacknow J., Jour. Wat. Pollut. Contr.* 47 (1975) 2292.
17. Chakraborty P., Seranya J., Raghunadh Babu P. V., Karri S., Thyadi P., Yao K. M., Brij M.S., *Chem. Geol.*, 322 (2012) 172.
18. Antcibor I., Eschenbach, A., Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Bolshiyarov, D., Pfeiffer, E.M., *Biogeosci.*, 11 (2014) 1.
19. Tay C.K., Asma R., Biney C.A., *Wes. Afri. Jour. Appl. Ecol.*, 16 (2009) 75.
20. Oguzie F.A., Okhagbuzo G.A., *Afri. Jour. Biotechnol.*, 9 (2010) 319.
21. World Health Organization, Vol. 2 (2nd ed.). Geneva, (1996) 31–388.
22. Norme française, *JORF.*, 17 (2007), <http://nosobase.chu-lyon.fr/Reglementation/2007/Arrete/110107bis.pdf>
23. Takashi A., Franklin L.B., Harold L. L., *McGRAW Hill, NY, U.S.A* (2007).
24. Kihampa C., *Inter. Jour Envir Sci.*, 3 (2013) 1407.
25. US EPA., Appendix C, N.J.A.C., 7(1994)14A-11. www.state.nj.us/dep/dwq/7_14a/sub12rule.pdf

(2015) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>