



POLLUTION PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES DES EAUX DE SURFACE EN PÉRIODE DE HAUTES EAUX DE LA RÉGION DE BONOUA (SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

POLLUTION BY TRACE METALS OF THE SURFACE WATER OF BONOUA AREA IN HIGH WATER TIME (SOUTHEAST OF IVORY COAST)

TOHOURI P.¹, SORO G.¹, AHOUSI KOUASSI E.¹, ADJA MIESSAN G.², AKE GABRIEL E.¹, BIEMI J.¹

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Unité de Formation et de Recherches des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM). Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire)

²Département des Sciences et Technologies, École Normale Supérieure d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 08 BP 10 Abidjan 08.

privatohouri@gmail.com

RÉSUMÉ

Les populations de certaines localités de la région de Bonoua qui ne disposent plus d'ouvrages d'hydrauliques villageoises pour des raisons de pannes mécaniques ont recours aux eaux de surface pour leur alimentation. Mais, ces eaux sont confrontées à la pollution anthropique due aux activités agricoles, aux rejets des eaux usées industrielles et domestiques. En effet, ces activités génèrent d'importantes quantités de substances polluantes dont les éléments traces métalliques (ETM) qui ont une répercussion néfaste sur la qualité des eaux et par la suite sur la santé humaine. La présente étude vise à évaluer le niveau de pollution par les éléments traces métalliques (Cd, Mn, Pb, Cu, Al, Fe et Zn) en période de hautes eaux des eaux de surface de la région de Bonoua afin d'estimer les risques sanitaires auxquels sont exposées les populations. Pour y arriver, 14 échantillons d'eau ont été prélevés et analysés par spectrométrie d'émission avec Plasma à Couplage Inductif (ICP). Les données obtenues sont comparées aux valeurs normatives de l'OMS pour les eaux de

boisson. Les résultats montrent que les concentrations en plomb sont inférieures à la limite de détection de l'appareil de mesure. Les concentrations moyennes en Cuivre, Zinc et Aluminium sont conformes aux normes de potabilité de l'OMS. Les concentrations moyennes en Cd, Mn et Fe sont respectivement de 15 µg/L, 236 µg/L et 809 µg/L. Elles sont largement supérieures aux normes OMS. L'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de ces ETM dans les eaux montrent que seuls le Cd et le Fe présentent des risques d'intoxication chez les populations et en particulier chez les enfants.

Cette étude montre que les eaux de surface de la région de Bonoua sont sous l'influence des activités anthropogéniques qui représentent des risques sanitaires pour les populations, singulièrement pour les enfants.

Mots clés : Pollution, Eaux de surface, Éléments traces métalliques, Région de Bonoua, Risques sanitaires

ABSTRACT

The populations of some localities of Bonoua region that no longer have village water works for reasons of mechanical breakdowns use surface water for food. But these waters are confronted with anthropogenic pollution from agricultural activities, to discharges of industrial and domestic wastewater. Indeed, these activities generate magnitudes of amounts of polluting substances whose metallic trace elements (ETM) that negatively affect water quality and subsequently human health. This study aims to assess the level of pollution by trace metals (Cd, Mn, Pb, Cu, Al, Fe and Zn) in times of high water surface water of Bonoua Region to estimate risk sanitation to which people are exposed. To get there, 14 water samples were taken and analyzed by emission spectrometry with Inductively Coupled Plasma (ICP). The data obtained are compared with the WHO standard values for drinking water. The results show that the lead concentrations below the detection limit of the measuring apparatus. The average concentrations of Copper, Zinc and Aluminium conform to WHO drinking water standards. The average concentrations of Cd, Mn and Fe were respectively 15 µg/L, 236 µg/L and 809 µg/L. They are much higher than WHO standards. The assessment of health risks associated with the presence of these ETM in waters show that only Cd and Fe at risk of poisoning in the population and especially among children.

This study shows that the surface water of the Bonoua region are under the influence of anthropogenic activities which pose health risks for people, particularly for children.

Keywords: Pollution, Surface water, traces metal elements, Bonoua Region, Health Risks

INTRODUCTION

Les éléments traces métalliques (ETM) sont des polluants engendrés par la plupart du temps par l'activité humaine (Diaby et *al.*, 2016). Ils ont un impacts toxicologique sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme (Waseen et *al.*, 2014). En raison de leur toxicité et de leur accumulation dans l'environnement aquatique, la pollution des écosystèmes aquatiques par les ETM demeure un problème d'actualité et fait l'objet d'une attention particulière dans plusieurs pays à travers le monde. C'est le cas en Turquie (Kargin et *al.*, 2001), au Nigeria (Ololade et Ajayi, 2009), en Iran (Fatemeh et *al.*, 2012), au Maroc (Makhoukh, 2011), au Togo (Ahouidi et *al.*, 2015), en Tunisie (Ayari, 20012), etc. En Côte d'Ivoire, cette thématique a attiré l'attention de certains chercheurs car, elle constitue l'un des aspects de la pollution le plus menaçant pour les écosystèmes aquatiques. Ainsi, une étude menée par Ahoussi et *al.* (2010) sur les eaux souterraines des nappes phréatiques du Quaternaire de la ville d'Abidjan a montré de fortes teneurs en éléments traces métalliques tels que Pb, Zn, Mn et Zn dans les eaux de la ville. Ces teneurs sont largement supérieures à la valeur guide de l'OMS pour une eau de boisson. Aussi, les études réalisées par Coulibaly et *al.* (2008) sur la lagune Ebrié ont relevé de fortes teneurs en ETM dans les sédiments de surface de cette lagune. L'étude réalisée par Kablan (2011) sur les eaux de lagune Ono a montré de fortes teneurs moyennes en Ni (69 µg/l), Cd (57 µg/l), Fe (940 µg/l), As (38 µg/l) et Cr (970 µg/l) supérieures aux normes OMS pour les eaux de boisson. De même les sédiments de surface de cette lagune sont contaminés par As, Ni, Cd et Cr, avec des indices de contamination supérieurs à 1. Dans la même dynamique, Ahoussi et *al.* (2012) ont réalisé une étude de caractérisation des ETM dans les eaux du village d'Abia Koumassi. Les résultats ont montré la présence des éléments traces métalliques tels que Ni, Cd, Mn, et Fe à des teneurs relativement supérieures à celles préconisées par l'OMS pour une eau de Boisson. Au niveau des sédiments de la lagune Ebrié, les travaux de Soro et *al.* (2009) ont révélé la présence de fortes teneurs en ETM (Zn, Cu, Co et Cd). Tout récemment, les travaux de Traoré (2016) relatives au niveau de contamination métallique des eaux et des sédiments des lagunes Aghien et Potou ont mis en évidence dans les eaux de fortes teneurs en fer supérieures à la norme de potabilité de l'OMS. Par ailleurs, les sédiments de surface de ces plans d'eau lagunaires sont contaminés par le fer, le cuivre et le mercure.

Selon les différentes études, la pollution métallique des écosystèmes aquatiques est due aux activités anthropiques, en majorité industrielles, agricoles et domestiques.

La région de Bonoua est une zone où les activités agricoles s'exercent à l'échelle industrielle avec l'utilisation de grandes quantités de fertilisants riches en métaux lourds. De plus, les eaux usées domestiques et des industries exerçant dans la zone sont déversées dans le milieu naturel sans traitement préalable. Cette situation constitue une menace de pollution potentielle pour les eaux de surface consommées par les populations. En outre, dans leurs interactions, les eaux de surface pourraient contaminer les eaux souterraines. Pourtant, ces dernières sont exploitées pour pallier le déficit en eau potable de la ville d'Abidjan. Cette étude vise à évaluer le niveau de pollution par les éléments traces métalliques (Cd, Mn, Zn, Fe, Al, Pb et Cu) des eaux de surface de la région de Bonoua afin d'estimer les risques sanitaires auxquels sont exposées les populations qui les utilisent pour la consommation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire et recoupe les territoires des départements de Grand-Bassam, Alépé, Adiaké et Aboisso. Elle couvre une superficie de 2165 Km². Comprise entre les longitudes 3°12' et 3°45' Ouest et les latitudes 5°07' et 5°33' Nord, elle est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord par l'affleurement du socle cristallin, à l'Ouest par la lagune Potou et la rivière La Mé, à l'Est par la lagune Aby et la rivière Bia (Figure 1).

La végétation très hétérogène de la région, passe des forêts denses humides sempervirentes à une végétation actuelle de type savane (Leneuf, 1959 ; Guillaumet et al., 1971). Dans l'ensemble, cette végétation est abondamment transformée par des cultures industrielles (cacaoyers, caféiers, palmiers à huile, ananas, bananeraies et hévéa) et des cultures vivrières (manioc, igname, banane plantain, etc.).

Pollution par les éléments traces métalliques des eaux de surface en période de hautes eaux de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

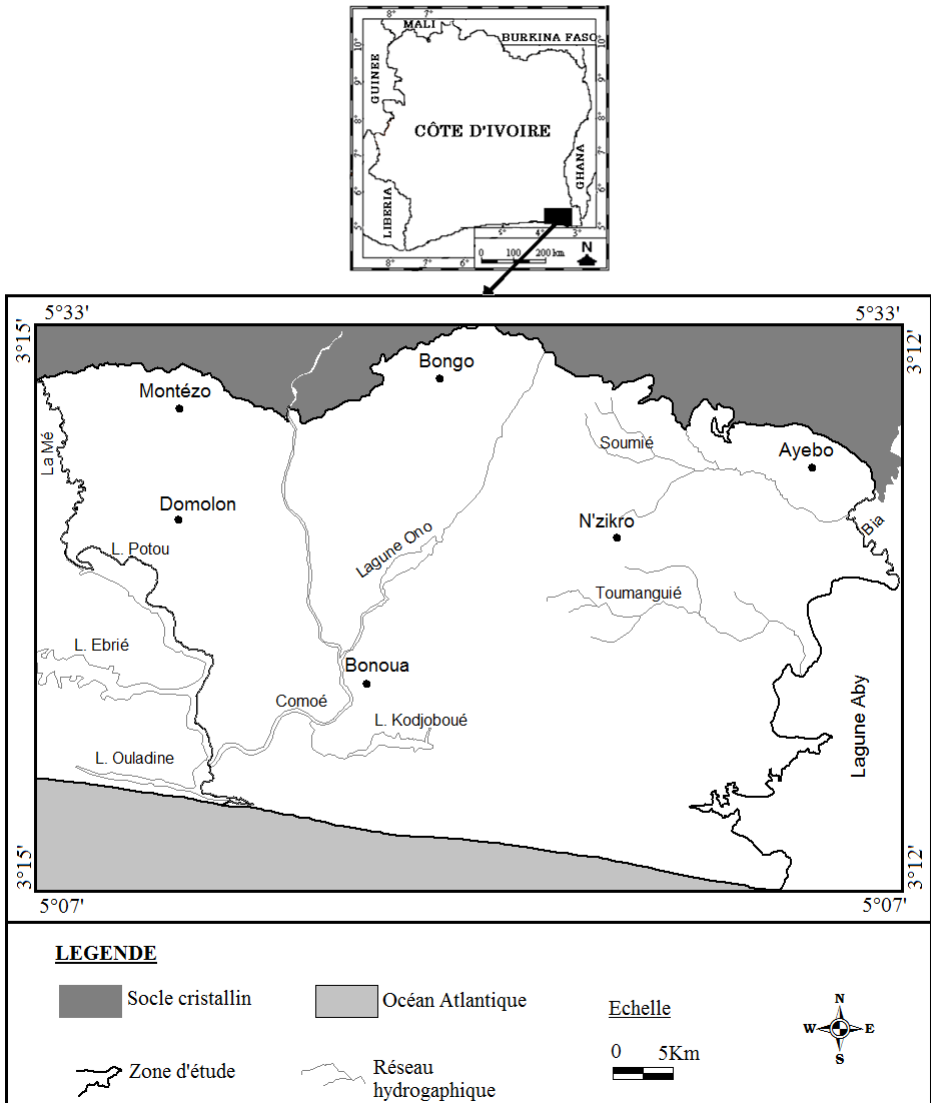


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Sur le plan hydrographique, la zone d'étude est drainée par le fleuve Comoé et les rivières Bia, Mé, Soumié et Toumanguié. Ils débouchent tous sur les différentes lagunes.

Les différentes lagunes qui complètent le réseau hydrographique de la zone d'étude sont les lagunes Ouladine, Potou, Ebbrié, Aby, Kodjobboué, Hébé, Aghein et Ono.

Matériel et données

Cette étude est basée sur l'analyse des éléments traces métalliques (ETM) des eaux de surface de la région de Bonoua. Les ETM dosés dans les échantillons d'eau sont : le cadmium (Cd), le manganèse (Mn), l'Aluminium (Al), le Fer (Fe), le Zinc (Zn), le Plomb (Pb) et le Cuivre (Cu). Ces données d'ETM sont obtenues par des analyses en laboratoire des échantillons d'eau prélevés.

Le matériel mobilisé pour acquérir ces données se compose :

- de bouteilles en polyéthylène de 1 litre utilisées pour recueillir les échantillons d'eau prélevés sur chaque site ;
- d'une glacière réglée à la température de 4°C pour la conservation et le transport des échantillons d'eau au laboratoire d'analyse.

Le prélèvement de quatorze (14) échantillons des eaux de surface s'est déroulé dans le mois de juillet 2014. C'est la période de hautes eaux ou période humide qui correspond à la saison des pluies dans cette région. La figure 2 montre les différentes stations d'échantillonnage des eaux. Les bouteilles de prélèvement d'échantillons d'eau d'une capacité de 1 litre (bouteilles en polyéthylène) ont été préalablement lavées à l'eau distillée. Avant leur remplissage, elles sont rincées avec l'eau à prélever et remplies à ras-bord. Enfin, elles sont vissées par un bouchon pour éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère ambiante. Les échantillons d'eau ont été stockés et conservés dans une glacière à 4°C et ensuite transportés au laboratoire d'analyses chimiques de l'Institut National Polytechnique de Yamoussoukro. Les ETM ont été dosés par spectrométrie d'émission avec plasma à couplage inductif (ICP), avec une limite de détection de ($< 1 \mu\text{g/L}$).

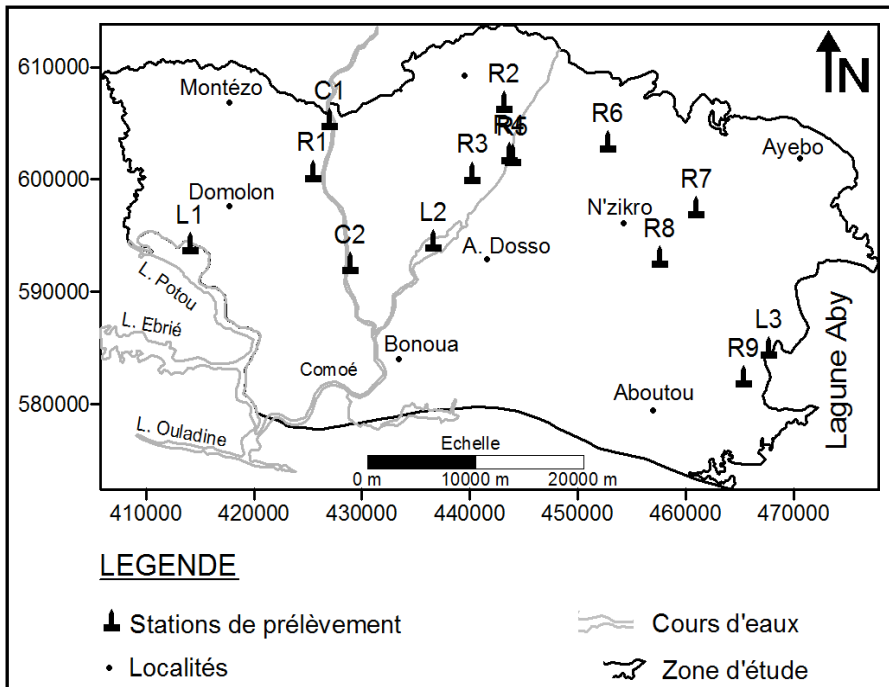


Figure 2 : Carte de localisation des stations de prélèvements des eaux de surface

METHODOLOGIE

Analyse statistique

Les données des ETM obtenues des analyses en laboratoire ont été traitées. Ce traitement a permis de faire l'analyse descriptive des données basée sur la détermination des valeurs extrêmes (minima et maxima), de la moyenne, de l'écart type, du coefficient de variation et de l'erreur standard à la moyenne. L'état de pollution des eaux de surface par les éléments traces métalliques a été mis en évidence en comparant les valeurs moyennes des ETM aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2011) pour l'eau de boisson.

Évaluation des risques sanitaires (ERS) liés à la consommation des eaux de surface polluées par les éléments traces métalliques

L'ERS est une méthode qui permet d'estimer par calcul les risques pour la santé aux quels est soumise une population exposée à une pollution particulière d'origine industrielle ou naturelle. L'évaluation des risques sanitaires liés à la consommation de l'eau polluée par les éléments traces suit quatre principales étapes (ASTEE, 2006 ; ADEME, 2007) :

Identification du danger des substances chimiques

Cette étape permet de sélectionner les substances à prendre en compte dans l'évaluation quantitative du risque sanitaire et d'identifier les effets qui peuvent en dériver : effet aigu, sub-chronique, chronique, effet à seuil, effet sans seuil. Dans le cadre de cette étude, les éléments traces métalliques retenus sont le Fer, le Cadmium, le Zinc, le Cuivre, l'Aluminium et le Manganèse à cause de leur présence en quantité évaluable et de la connaissance de leurs effets épidémiologiques sur l'homme.

Estimation de la relation dose - effet

Cette étape permet d'estimer le risque en fonction de la dose. Elle permet de définir des valeurs toxicologiques de référence (VTR) ou Dose de Référence (RfD) qui traduisent le lien entre la dose de la substance toxique et l'occurrence ou la sévérité de l'effet étudié dans la population. Dans le cadre de cette étude, les VTR utilisées sont celles publiées par l'Institut National de l'Environnement et des Risques (INERIS, 2005a ; 2005b ; 2005c ; 2012 ; 2014) pour les effets chroniques à seuil et issues des bases de données de cinq organismes reconnus : Office Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA), Institut national de la santé public et de l'environnement des Pays-Bas (RIVM), United Environmental Protection Agency (US-EPA), Agency for Toxic substances and Disease Registry (ATSDR) et European Food Safety Authority (EFSA). Ces VTR choisies sont celles des études les plus récentes dont les valeurs sont les plus faibles possibles, c'est-à-dire les plus protectrices de la santé humaine. Les valeurs des VTR sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Valeurs toxicologiques de références des ETM pour des effets avec seuil (INERIS, 2005a ; 2005b ; 2005c ; 2012 ; 2014)

Éléments traces métalliques	Sources	Voie d'exposition	Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)
Cadmium	EFSA	Orale chronique	0,36 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
Aluminium	ATSDR	Orale chronique	2000 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
Fer	ATSDR	Orale chronique	0,8 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
Cuivre	RIVM	Orale chronique	140 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
Manganèse	US-EPA	Orale chronique	140 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$
Zinc	ATSDR	Orale chronique	300 $\mu\text{g.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$

Évaluation de l'exposition

Cette étape consiste à déterminer les voies de passage de la substance étudiée de la source vers le récepteur humain, ainsi qu'à estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition. Ceci aboutit au calcul de la Dose Journalière d'Exposition (DJE).

Les scénarios d'exposition où l'individu est le plus exposé (hypothèse maximaliste) seront utilisés. De ce fait, nous envisageons les scénarios d'exposition suivants :

- la consommation moyenne en eau de boisson est estimée à 2 l par jour (soit 2 kg/j) pour les adultes et à 1,5 litre par jour (soit 1,5kg/j) pour les enfants (Volatier, 2000). Il sera considéré que l'individu consomme cette quantité d'eau 7 jours/7 jours.
- le poids corporel moyen des enfants de 0 à 15 ans est de 28 kg et celui d'un adulte est conventionnellement égale à 70 kg selon US-EPA (ASTEE, 2003 ; 2006).

La dose journalière d'exposition aux polluants par la consommation de l'eau polluée est déterminée par l'équation 1 :

$$\text{DJE} = C \times Q \times \frac{F}{P} \quad (1)$$

Où DJE : Dose journalière d'exposition liée à la consommation de l'eau polluée ($\mu\text{g/kg/j}$) ;

C : Concentration d'exposition relative à l'eau polluée exprimée en $\mu\text{g}/\text{kg}$;

Q : Quantité de l'eau consommée par jour, exprimée en kg/j ;

F : Fréquence ou taux d'exposition (sans unité) : l'eau est consommée $7\text{j}/7\text{j}$ d'où $F=1$;

P : Poids corporel de la cible (kg).

Caractérisation du risque

Cette étape permet une estimation de l'incidence et de la gravité des effets indésirables susceptibles de se produire dans une population humaine en raison de l'exposition à l'ensemble des substances. La caractérisation du risque pour les effets à seuil est exprimée par le quotient de danger (QD). Ce paramètre est calculé pour la voie d'exposition orale (consommation de l'eau) de la manière suivante (Eq.2) :

$$QD = \frac{DJE}{RfD} \quad (2)$$

Où :

DJE : Dose Journalière d'Exposition ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$)

RfD : Dose de Référence ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$) ou VTR

Si $QD < 1$ la survenue d'un effet toxique est peu probable

Si $QD > 1$ l'apparition d'un effet toxique ne peut pas être exclu

Cette formule s'applique à chaque substance prise individuellement et ne renseigne pas sur l'effet résultant de l'exposition à un mélange de substances.

RÉSULTATS

Le tableau 2 présente les paramètres statistiques des ETM analysés dans les eaux superficielles en période de hautes eaux.

Tableau 2 : Statistiques élémentaires des ETM des eaux de surface de la région de Bonoua en période de hautes eaux (juillet 2014)

Éléments Métalliques	Traces	Min.	Moy \pm ESM	Max.	Écart type	CV (%)	Norme OMS
Zn ($\mu\text{g/L}$)		0	42 ± 23	241	83	196	< 5000
Cu ($\mu\text{g/L}$)		0	13 ± 10	127	35	267	< 1000
Pb ($\mu\text{g/L}$)		< 1	-	< 1	-	-	< 50
Cd ($\mu\text{g/L}$)		0	15 ± 8	71	27	176	< 5
Mn ($\mu\text{g/L}$)		8	236 ± 56	661	201	85	< 50
Al ($\mu\text{g/L}$)		1	65 ± 17	210	62	97	< 200
Fe ($\mu\text{g/L}$)		65	809 ± 247	3290	890	110	< 300

ESM : Erreur standard à la moyenne ; CV : Coefficient de variation

Plomb (Pb)

Les teneurs en plomb enregistrées dans les eaux de surface sont toutes inférieures à la limite de détection de l'appareil de mesure (1 $\mu\text{g/L}$).

Zinc (Zn)

Les teneurs en Zinc varient de 0 $\mu\text{g/L}$ aux stations R5 et R8 à 241 $\mu\text{g/L}$ à la station R2, avec une moyenne de 42 ± 23 $\mu\text{g/L}$. Les teneurs en zinc observées dans les eaux de surface sont toutes inférieures à la norme OMS de 5000 $\mu\text{g/L}$ (figure 3).

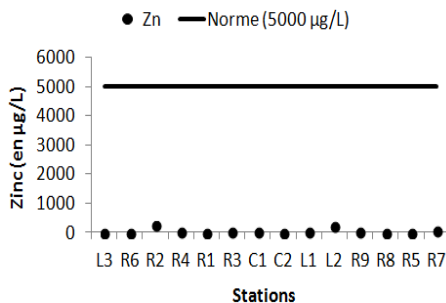


Figure 3 : Variation spatiale des teneurs en zinc

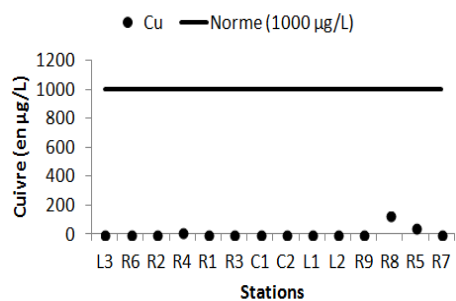


Figure 4 : Variation spatiale des teneurs en cuivre

Cuivre (Cu)

Les teneurs en cuivre varient de 0 µg/L pour 79 % des stations à 127 µg/L à la station R8, avec une moyenne de 13 ± 10 µg/L. Toutes les teneurs en cuivre observées dans les eaux de surface sont conformes à la norme de 1000 µg/L (figure 4) pour les eaux de boisson.

Cadmium (Cd)

Les teneurs en cadmium évoluent de 0 µg/L pour 50 % des stations à 71 µg/L à la station L3, avec une moyenne de 15 ± 8 µg/L. Les teneurs de cinq stations (L3, L2, R9, R8 et R7), soit 36 % sont supérieures à la norme de 5 µg/L. Alors que 64 % des stations enregistrent des teneurs inférieures à cette norme (figure 5).

Manganèse (Mn)

Les teneurs en manganèse observées dans les eaux de surface varient de 8 µg/L à la station R6 à 661 µg/L à la station L2, avec une moyenne de 236 ± 56 µg/L. Les stations R6, R8 et R5 soit 21 % enregistrent respectivement des teneurs de 8 µg/L, 31 µg/L et 16 µg/L conformes à la norme de potabilité des eaux de consommation de 50 µg/L. Par contre, onze (11) stations, soit 79 % enregistrent des teneurs en manganèse supérieures à cette norme (figure 6).

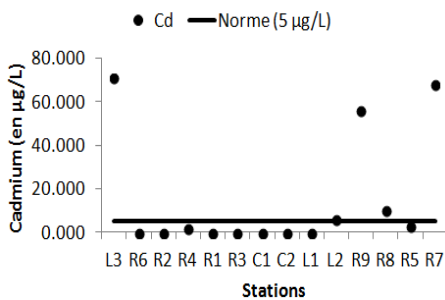


Figure 5 : Variation spatiale des teneurs en cadmium

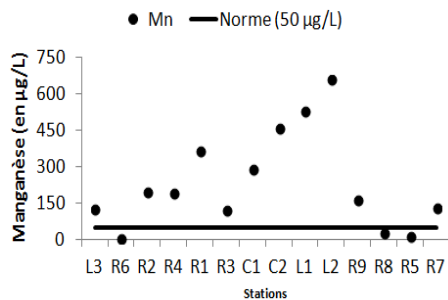


Figure 6 : Variation spatiale des teneurs en manganèse

Aluminium (Al)

Les teneurs en aluminium des eaux de surface fluctuent de 1 µg/L à la station R6 à 210 µg/L à la station L2, avec une teneur moyenne de 65 ± 17 µg/L. Seule la teneur de 210 µg/L enregistrée à la station L2 est supérieure à la norme de 200 µg/L, et le reste des stations soit 93 % présentent des teneurs en aluminium inférieures à la norme (figure 7).

Fer (Fe)

Dans les eaux de surface, les teneurs en fer oscillent entre 65 µg/L à la station R7 et 3290 µg/L à la station C1, avec une valeur moyenne de 809 ± 247 µg/L. la figure 8 montre que six (6) stations, soit 43 % enregistrent des teneurs en fer inférieures à la norme de 300 µg/L pour les eaux de boisson. Par contre, 57 % des stations mentionnent des teneurs supérieures à cette norme.

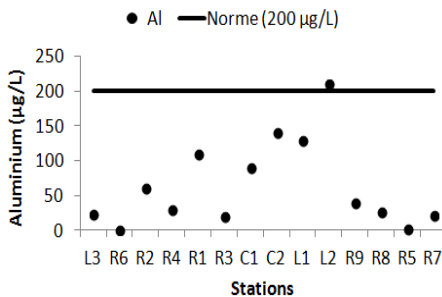


Figure 7 : Variation spatiale des teneurs en aluminium

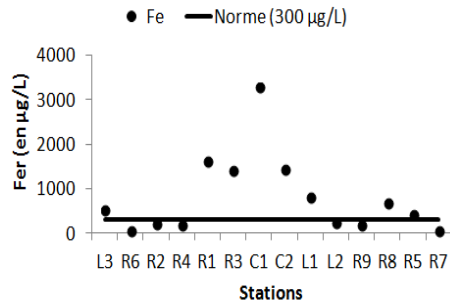


Figure 8 : Variation spatiale des teneurs en fer

En somme, la moyenne des différentes teneurs en ETM se répartit comme suit $Fe > Mn > Al > Zn > Cd > Cu > Pb$.

On admet qu'un CV inférieur à 50 % témoigne d'une certaine homogénéité dans l'amplitude des teneurs observées entre valeurs minimales et maximales traduisant une faible variation autour de la moyenne. Par contre, un CV supérieur à 50 % indique une grande déviation par rapport à la moyenne de l'ensemble des observations. Dans cette étude, le CV est très élevé pour tous les ETM.

Évaluation des risques sanitaires liés à la consommation des eaux de surface de la région de Bonoua

Les résultats de l'évaluation de l'exposition au Zn, Cu, Cd, Mn, Al et Fe liée à la consommation des eaux de surface en période de hautes eaux ainsi que les quotients de danger (QD) correspondants chez les adultes et les enfants sont représentés respectivement par les figures 9a et 9b.

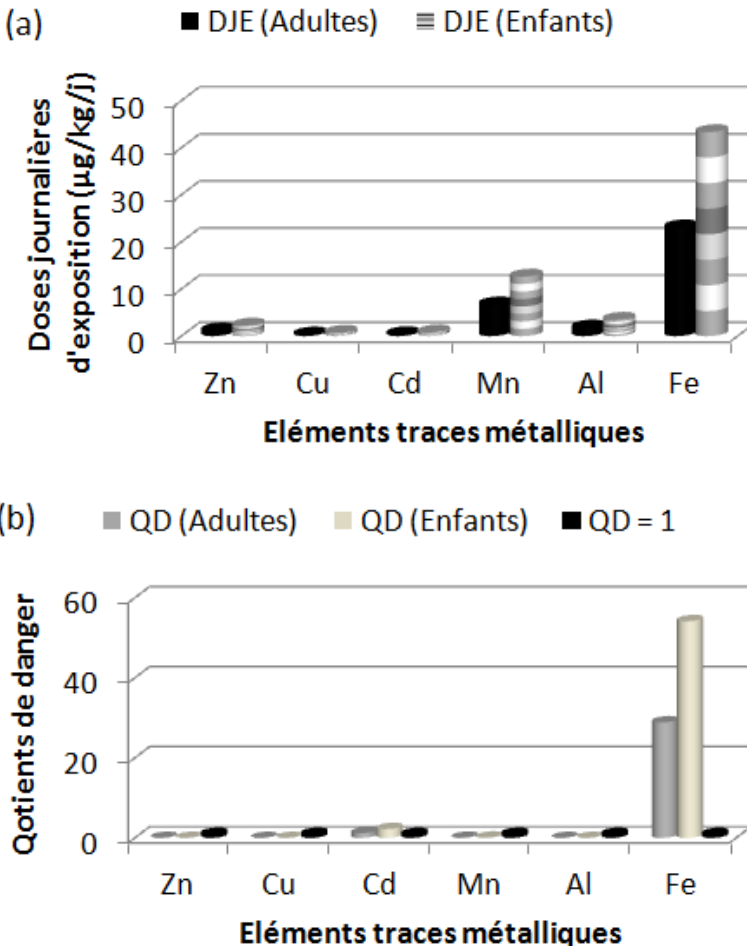


Figure 9 : Doses journalières d'exposition (a) et quotients de danger (b) chez les adultes et les enfants liés à la consommation des eaux de surface en période de hautes eaux

La figure 9a montre que les doses journalières d'exposition aux ETM chez les adultes et les enfants sont les plus élevées pour le Fe (23,114 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les adultes et 43,339 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants). Ensuite, viennent le Mn (6,743 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les adultes et 12,643 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants), l'Al (1,857 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les adultes et 3,482 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants), le Zn (1,200 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les adultes et 2,250 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants), le Cd (0,429 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ et 0,804 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants) et le Cu (0,371 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les adultes et 0,696 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{j}$ pour les enfants). Cependant, les doses journalières d'exposition chez les enfants sont les plus élevées que celles des adultes. L'ordre d'exposition aux ETM chez les adultes et les enfants est le suivant : DJE (Fe) > DJE (Mn) > DJE (Al) > DJE (Zn) > DJE (Cd) > DJE (Cu).

Les quotients de danger (figure 9b) correspondants à ces doses journalières d'exposition révèlent que les QD chez les adultes et les enfants pour le Fe (QD = 28,893 pour les adultes et QD = 54,174 pour les enfants) et le Cd (QD = 1,190 pour les adultes et QD = 2,232 pour les enfants) sont supérieurs à QD = 1. Par ailleurs, les quotients de danger pour le Mn (QD = 0,048 pour les adultes et QD = 0,090 pour les enfants), Al (QD = 0,001 pour les adultes et QD = 0,002 pour les enfants), Zn (QD = 0,004 pour les adultes et QD = 0,008 pour les enfants) et Cu (QD = 0,003 pour les adultes et 0,005 pour les enfants) sont largement supérieurs à QD = 1. De façon générale les QD chez les enfants sont supérieurs à ceux des adultes. Les quotients de danger sont classés selon l'ordre suivant : DQ (Fe) > QD (Cd) >> QD (Mn) >> QD (Al) >> QD (Zn) >> QD (Cu).

DISCUSSION

Les résultats ont montré que les teneurs en Pb sont inférieures à la limite de détection de l'appareil de mesure. Par conséquent ces teneurs sont considérées comme nulles (Debieche, 2002). Les eaux superficielles de la région de Bonoua sont donc potables à l'égard de cet élément métallique. Ce résultat concorde avec celui de Chaoui (2013) qui a montré que les teneurs en plomb des eaux de surface de l'Oued au voisinage de la mine abandonnée de Zeïda sont inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé.

Les teneurs moyennes des autres ETM sont respectivement de 42 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour le zinc, de 13 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour le cuivre, de 15 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour le cadmium, de 236 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour le manganèse, de 65 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour l'aluminium et de 809 $\mu\text{g}/\text{L}$ pour le fer. En fonction des différentes teneurs moyennes des ETM, on distingue deux groupes : le premier groupe concerne les ETM dont les teneurs moyennes sont inférieures aux normes OMS pour les eaux de boissons. Il s'agit du zinc, du

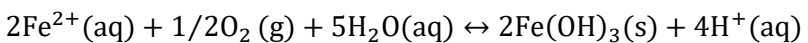
cuivre et de l'aluminium. Le deuxième groupe prend en compte les ETM dont les teneurs moyennes sont au-delà des normes OMS. Il s'agit du cadmium, du manganèse et du fer. En effet, des proportions de 36 % ; 79 % et 57 % des eaux de surface sont respectivement polluées par le cadmium, le manganèse et le fer. Les teneurs moyennes en Cd, Zn et Cu observées dans les eaux de surface de la région de Bonoua sont supérieures à celles des eaux lagunaires d'Aghien et de Potou qui sont respectivement de 0,22 µg/L, 0,33 µg/L et 3,81 µg/L en lagune Aghien et de 0,60 µg/L, 0,30 µg/L et 1,85 µg/L en lagune Potou (Traoré, 2016). Mais, les teneurs moyennes en fer et en Plomb de ces eaux sont supérieures à celles des eaux de surface de la région de Bonoua.

Les fortes teneurs de manganèse, de fer et de cadmium observées dans les eaux de surface de la région de Bonoua auraient pour origines les lixiviats des décharges sauvages rencontrées par endroits aux abords des cours d'eaux, des intrants utilisés dans la zone d'étude (engrais chimiques, insecticides ou fongicides), des eaux usées des industries rejetées dans la nature sans traitement préalable et des formations géologiques de la zone. En effet, selon Dufour et al. (1994), la nature sableuse, pauvre en humus et en argile des sols de la basse Côte d'Ivoire ainsi que la violence des précipitations intensifient le lessivage des polluants agricoles vers les eaux superficielles. De plus, les travaux d'Aulin et al. (1997) in Berthé (2006) ont montré que les décharges des ordures sont 5 à 127 fois plus importantes en ETM que les sols.

La consommation des eaux de surface de la région de Bonoua polluées par le cadmium, le fer et le manganèse peut entraîner chez les adultes et enfants la survenue des effets toxiques provenant du cadmium et du fer. Ceci est attesté par les forts quotients de danger observé pour le cadmium (QD = 1,190 > 1 pour les adultes et QD = 2,232 > 1 pour les enfants) et le fer (QD = 28,893 > 1 pour les adultes ; QD = 54,174 > 1 pour les enfants). Les quotients de danger issus de la consommation des eaux superficielles pour les enfants sont tous supérieurs à ceux des adultes malgré la faible consommation journalière d'eau chez ces derniers (1,5 l pour enfant contre 2 l pour adulte) d'après notre scénario. Le risque élevé à la survenance d'effets toxiques liés au cadmium et au fer chez les enfants serait dû à leur faible poids corporel et de leur fragilité sur le plan physiologique, étant donné que les contaminants sont facilement absorbés dans leur organisme (RCAP, 1996). Les travaux de Tanouayi et al. (2015) sur la contamination métallique des eaux de surface et souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoé-Kpogame (Sud-Togo) ont montré que les enfants sont les plus exposés aux effets toxiques de Cd, Pb et de Cu que les adultes. Ce qui corrobore nos résultats. Dans la région de Bonoua, les populations rurales utilisent les eaux de surface comme eau de boisson sans

aucun traitement préalable tout en ignorant les effets des éléments traces métalliques sur la santé de l'homme. En effet, le cadmium est l'élément trace le plus toxique pour l'homme (Testud, 2005). Le cadmium n'est pas un élément essentiel au métabolisme chez l'homme car il n'a aucune fonction connue dans le corps humain (Miquel, 2001). Les effets toxiques du cadmium sont nombreux, mais les principales atteintes de l'organisme suite à une exposition prolongée chez l'homme sont des maladies des reins et des os, accompagnées par des vomissements, des diarrhées, des maux de tête, des frissons, des douleurs musculaires et des nausées (Lallogo, 1992). Son excrétion par la voie rénale dépasse rarement les 0,5 µg/j (Wilson et al., 1993). D'après les travaux de Chaoui (2013), des effets semblables ont été apparus lors de la propagation d'une endémie « Itai-Itai » au Japon en 1950 où les eaux avaient été contaminées par le cadmium et entraînées des atteintes rénales très importantes, associées avec une ostéoporose (déminéralisation et fragilisation des os) et des symptômes d'ostéomalacie (déminéralisation et fragilisation des os). En outre, le cadmium est aussi considéré comme un élément carcinogène (Waalkes, 2000), ainsi le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le cadmium exposé à l'homme par inhalation dans la première catégorie « cancérogène pour l'homme ».

Le fer est un élément essentiel à la nutrition ; il entre dans la composition des cytochromes, des porphyrines et des métalloenzymes. Les besoins nutritionnels en fer varient selon le sexe et l'âge des personnes ; les enfants en bas âge ou plus âgés et les femmes en âge de procréer sont les plus exposés à des carences en fer. Cependant, l'ingestion de grandes quantités de fer produit une hématochromatose qui se manifeste par une fatigue chronique, une coloration foncée de la peau ou mélanodermie, ainsi qu'une atteinte du foie, du pancréas, des articulations, des os, des glandes endocrines ou du cœur (Macherou et al., 2015). Lorsque les eaux riches en fer sont exposées à l'air libre, l'ion ferreux (Fe^{2+}) est oxydé en ion ferrique (Fe^{3+}) selon la réaction suivante (Younger, 1995) :



Il résulte de la précipitation spontanée de l'hydroxyde de fer ($2\text{Fe}(\text{OH})_3$), qui donne à l'eau une coloration rouge/brune (Davies, 1974). Cette coloration a été observée au niveau des eaux de la rivière d'Ingrakon et des eaux de la Comoé durant la campagne de prélèvements des échantillons d'eau.

CONCLUSION

L'objectif assigné à cette étude était d'évaluer le niveau de pollution des eaux de surface par le Cuivre, le Manganèse, le fer, le Plomb, le Cadmium, le Zinc et l'Aluminium en période de hautes eaux afin d'estimer les risques sanitaires encourus par les populations à la suite de la consommation de ces eaux. La comparaison des teneurs de ces éléments traces métalliques avec les valeurs normatives de l'OMS pour les eaux de boisson a révélé que les concentrations en Plomb sont toutes inférieures à la limite de détection de l'appareil de mesure. Les concentrations moyennes en Zinc, Cuivre et Aluminium sont conformes aux normes OMS pour les eaux de consommation. Par ailleurs, 36 % ; 79 % et 57 % des eaux étudiées sont respectivement polluées par le Cadmium, le Manganèse et le Fer. Ainsi, la consommation de ces eaux par les populations les expose aux risques d'intoxication par le Cadmium et le Fer dont les quotients de danger sont supérieurs à 1 chez les enfants comme chez les adultes. Les résultats de cette étude mettent en relief un problème de santé publique liée à la consommation des eaux de surface polluées par les éléments traces métalliques issus des activités anthropiques. Ces eaux méritent donc un traitement très poussé avant toute consommation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME/SYPREA/FP2E/INERIS. (2007). Méthodologie d'évaluation quantitative des risques sanitaires relatifs aux substances chimiques, convention 03 75 C 0093 et 06 75 C 0071, 45 p.
- AHOUDI, H., GNANDI, K., TANOUAYI, G., OURO-SAMA, K. (2015). Caractérisation physico-chimique et état de pollution par les éléments traces métalliques des eaux souterraines de Lomé (Sud-Togo) : cas du quartier Agoe Zongo. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°24, pp. 41-56.
- AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., LOKO S., KOUASSI A. M., SORO G. et BIEMI J. (2012). Caractérisation des éléments traces métalliques (Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Hg, As) dans les eaux superficielles de la commune de Marcory, Abidjan Côte d'Ivoire : cas du village d'Abia Koumassi. Géo-Eco-Trop., 36 : 159-174.
- AHOUSSE K. E., SORO N., KOUASSI A. M., SORO G. KOFFI Y. B. & ZADE S. P. 2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des Métaux lourds (Cu²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺ et Pb²⁺) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4, (5): 1753-1765.

- ASTEE. (2003). Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE). Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une UIOM, 60 p.
- ASTEE. (2006). Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE). Guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation, 65p.
- AYARI J. (2012). Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas de la mine de Khanguet Kef Ettout (la région de Nefza). Rapport du colloque international en évaluation environnemental (Montréal), 33p.
- BERTHE C. (2006). Étude de la matière organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 188 p.
- CHAOUI M. (2013). Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et métallique des eaux de surface (Oued Moulouya/Barrage Hassan II) au voisinage de la mine abandonnée Zeïda (Haute Moulouya). Mémoire de Master de l'Université Cadi Ayyad, Marrakech, 98 p.
- COULIBALY A. S., MONDÉ, WOGNIN V. A. & AKA K. 2008. State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, 19, 2: 372-390.
- DEBIECHE T-H. (2002). Évolution de la qualité des eaux (salinité azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse, nord-est algérien. Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté (France), 199 p.
- DIABY V., ARSENE M. A., MIREILLE D., ADOU F. Y. (2016). Problématiques du cadmium en Côte d'Ivoire : Pollution environnementale et risque sanitaire. HAL Id: hal-01294085, 11p.
- DUFOUR P., LEMOALLE J. et ALBARET J.J. (1994). Le système Ebrié dans les typologies lagunaires : in *Environnement et ressources aquatiques de Côte-d'Ivoire*. Tome II-Les milieux lagunaires, Éditions de l'ORSTOM, Paris, pp. 59-90.
- FATEMEH N, AMIRHESAM H., MASOUD M., ABDOREZA K., NEMATOLLAH K. & ALIAKBAR I. 2012. Heavy Metal Distributions in Water of the Aras River, Ardabil, Iran. *Journal of Water Resource and Protection*, 4: 73-78.
- GUILLAUMET J. L., ADJANOHOUN E. (1971). Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM N°50, pp. 163-391.
- INERIS (2005a). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Aluminium et ses dérivés. DRC-02-25590-02DF41.doc. Version N°2-2-janvier 2005, 53 p.
- INERIS (2005b). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Zinc et ses dérivés. DRC-01-25590-00DF259.doc. Version N°2-2-mars 2005, 69 p.

- INERIS (2005c). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cuivre et ses dérivés. DRC-02-25590-02DF54.doc. Version N°1-5-mars 2005, 66 p.
- INERIS (2012). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Manganèse et ses dérivés. DRC-11-117259-10310B. Version N°2-3-juillet 2012, 81 p.
- INERIS (2014). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cadmium et ses dérivés. DRC-11-117259-10308B.doc. Version N°3-avril 2014, 111 p.
- KABLAN M. (2011). Caractérisation de la pollution métallique des hydrosystèmes côtiers de Côte d'Ivoire : analyse de la situation dans la lagune Ono sous-préfecture de Bonoua. Mémoire de DEA des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, Abidjan, 57 p.
- KARGIN F., DÖNMEZ A. et ÇOĞUN H.Y. (2001). Distribution of heavy metals in different tissues of the shrimp *Penaeus semiculatus* and *Metapenaeus monocerus* from the Iskenderun Gulf, Turkey : seasonal variations. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol.66, pp. 102-109.
- LALLOGO H. (1992). Concentration de certains métaux d'importance médicale dans les poisons: cas des poisons de la lagune de Lomé. Mémoire de Technicien Supérieur en Génie Sanitaire (EAM), UL, 36 p.
- LENEUF (1959). L'altération des granites calco-alcalins et des granitoïdes en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Paris, 210 p.
- MACHEROU J., NOREST S. & FERRER L. (2013). Les métaux lourds, quels risques pour la santé ? Disponible sur www.ase-asso.fr (consulté le 13 juillet 2016).
- MAFANY G. T., FANTONG W. Y. and NKENG G. E. (2006). Groundwater quality in Cameroon and its vulnerability to pollution. *Groundwater pollution in Africa*, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 47-55.
- MAKHOUKH M., SBAA M., BERRAHOU A. et VANCLOOSTER M. (2011). Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique SCIENCE* 07(3) (2011) 33-48.
- LOLADE I. A. & AJAYI A. O. 2009. Contamination profile of major rivers alongs the highways in Ondo State, Nigéria. *Journal of Toxicology and Environmental Sciences*, 1, (3): 38-53.
- OMS (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, Fourth Edition; Genève, Suisse, 541 p.
- RCAP (Royal Commission on Aboriginal Peoples) (1996). *Gathering Strength*. Ottawa, Canada Communications Group. 3: 185

- SORO G., METONGO S. B., SORO N., AHOUSSE K. E., KOUAME KOFFI F. ZADE S. G. P. & SORO T. 2009. Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3, (6): 1408-1427.
- TANOYAYI G., GNANDI K., AHOUDI H., OURO-SAMA K. (2015). La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoe-Kpogame (Sud-Togo) : cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°21, pp. 25-40.
- TESTUD F. (2005). *Pathologie toxique professionnelle et environnementale*. 3ème éd, Eska, Paris, 672p.
- TRAORE A. (2016). Impacts de la variabilité climatique et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'Aghien et de Potou (Sud-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 241 p.
- VOLATIER J. L. (2000). Enquête INCAA-Individuelle et Nationale sur les consommations alimentaires. CREDOC, AFSAA.
- WAALKES M. P. (2000). Cadmium carcinogenesis in review. *Journal of inorganic biochemistry*, 79 (1), 241-244.
- WASEEM A., ARSHAD J., IQBAL F., SAJJAD A., ZAHID M. and MURTAZA. G. (2014). Pollution Status of Pakistan: A Retrospective Review on Heavy Metal Contamination of Water, Soil, and Vegetables. *BioMed Research International*. Volume 2014, 29p.
- WILSON J. D., BRAUNWALD E., ISSELBACHER K. J., PETERSDORF R. G., MARTIN J. B., FAUCIA A. et ROOT R. K. (1993). *Principes de médecine interne*. Tome 2, 2182-2185.
- YOUNGER P.L. (1995). Hydrogeochemistry of mine water flowing from abandoned coal workings in country Durham. *Quart. J. Eng. Geol.*, 28: 101-113.