

## **Évaluation de la qualité des ressources en eau près de la décharge urbaine non contrôlée d'Akouédo par le calcul des risques cancérigènes et des indices de pollution, Côte d'Ivoire**

**Naminata SANGARE<sup>1</sup>, Koffi Marcellin YAO<sup>2\*</sup>, Edith Kwa-Koffi KOUASSI<sup>1</sup>,  
N'guessan Louis Berenger KOUASSI<sup>3</sup>, Métongo Bernard SORO<sup>2</sup> et Aka Marcel KOUASSI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *UFR Sciences de la Structure, des Matières et Technologies de l'Université Félix Houphouët-Boigny,  
Laboratoire de Chimie Physique, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Centre de Recherches Océanologiques (CRO), Département Environnement, 29 rue des Pêcheurs,  
BP V 18 Abidjan, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> *UFR Sciences Biologiques de l'Université Peleforo Gon Coulibaly, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire*

---

\* Correspondance, courriel : [markcelklindr@gmail.com](mailto:markcelklindr@gmail.com)

### **Résumé**

L'influence de la décharge d'Akouédo sur la contamination des eaux environnantes par les éléments traces métalliques (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe et Co) et les risques sanitaires pour l'Homme ont été évalués respectivement à partir des indices de pollution de décharge (LWPI : Landfill Water Pollution Index) et de risque (HI : Hazard Index) de Juin 2013 à Janvier 2014. Au total 89 échantillons d'eau ont été collectés dans le lixiviat, dans 4 puits, dans une baie de la lagune Ebrié recevant le lixiviat de la décharge (baie de M'Badon) et dans une autre baie non exposée au lixiviat, la lagune Anna. Les résultats ont montré que les eaux souterraines situées dans la vallée en aval de la décharge sont significativement influencées par le lixiviat avec des valeurs de LWPI supérieures à 5. Les eaux de la baie de M'Badon sont modérément contaminées par la décharge, indiqué par des valeurs de LWPI allant de 1,01 à 1,64. Les valeurs moyennes de HI par ingestion des eaux de lixiviat, de la baie de M'Badon, de puits et de la lagune Anna ont été toutes supérieures à la limite suggérée par USEPA (HI = 1). Ces résultats suggèrent un risque élevé de contamination chronique pour les humains. Les métaux Pb, Co et Cd ont été les contributeurs majeurs au risque non cancérigène par ingestion de ces eaux. Des études supplémentaires doivent être menées pour comprendre les sources de pollution métalliques de la lagune Anna.

**Mots-clés :** *métaux lourds, lagune Ebrié, décharge urbaine, Abidjan, Côte d'Ivoire.*

### **Abstract**

**Assessment of water resources quality near the uncontrolled urban landfill of Akouédo using carcinogenic risk and water pollution index, Côte d'Ivoire**

Water samples of leachates, pits and M'Badon Bay (Ebrié lagoon, Côte d'Ivoire) were collected from Akouédo Landfill area and a baseline site, Anna Lagoon, over June 2013 - January 2014 to assess water resources pollution by trace metals Cd, Pb, Cu, Zn, Fe and Co. The landfill water pollution index (LWPI) was calculated to examine the influence of the landfill on water resources, and metal health risks to humans were

evaluated through the examination of the hazard index (HI). The results showed that the Akouédo landfill impacted significantly groundwater in the valley downstream with LWPI values above 5. M'Badon Bay waters were moderately impacted by the landfill, indicated by LWPI values between 1.01 - 1.64. Average ingestion HI of leachate, M'Badon Bay, groundwater and Anna Lagoon waters exceeded the limit level of 1 suggested by USEPA. This result suggests a high risk of chronic contamination of the studied metals by the population through ingestion of water resources near the Akouédo Landfill. Metals Pb, Cd and Co were found to be the major contributors of non-carcinogenic risks. Further studies are needed to understand trace metal contamination sources in Anna Lagoon.

**Keywords :** *heavy metals, Ebrié lagoon, urban landfill, Abidjan, Côte d'Ivoire.*

## 1. Introduction

L'impact des déchets municipaux sur l'environnement a suscité une attention particulière ces dernières décennies en Afrique de l'Ouest [1]. Le lixiviat produit à partir des déchets peut contenir une quantité importante de polluants chimiques dont les éléments traces métalliques, et contaminer les eaux de surfaces et souterraines à proximité des décharges. L'Homme s'expose aux métaux par contact direct ou par consommation d'eaux contaminées et des produits de la pêche [2]. L'exposition à long terme à ces polluants peut causer des risques de santé aux animaux et à l'Homme pouvant aller jusqu'à des formes sévères de cancer [3 - 5]. Par conséquent, il est très important d'évaluer la qualité des eaux et les risques de santé de l'Homme aux environs des décharges municipales non contrôlées. Ces dernières années, des méthodes d'évaluation du risque ont été développées pour déterminer l'impact des métaux sur la santé de l'Homme [3, 6 - 8]. Cette approche permet de déterminer la probabilité à courir un risque de santé pour l'Homme exposé à des polluants chimiques durant des années [9, 10]. Elle est basée sur la détermination des indices de risque non cancérogène (HI) et cancérogène (CR). En plus de l'évaluation du risque, la qualité des eaux relative à la contamination des éléments traces métalliques est souvent évaluée en utilisant l'indice de modification de la qualité de l'eau (WQI), qui est appelé indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI) pour une eau située près d'une décharge [11].

La décharge incontrôlée d'Akouédo, l'unique décharge de la ville Abidjan (Côte d'Ivoire) qui compte près de 5 millions d'habitants, est à l'origine de nombreuses nuisances causées tant au niveau des populations riveraines du village d'Akouédo qu'au niveau de la lagune Ebrié. Le lixiviat draine une vallée et s'écoule dans la lagune Ebrié à travers la baie de M'Badon. Des études antérieures ont rapporté une pollution métallique et organique des sols dans les environs de la décharge et fait l'hypothèse d'un risque de contamination de la nappe phréatique et des eaux de la lagune Ebrié par le lixiviat de la décharge [12 - 16]. Par ailleurs, les études menées en lagune Ebrié ont essentiellement porté sur la détermination du niveau de contamination métallique des eaux et des sédiments dans les baies de Cocody, Banco, Biétri, Milliardaires, Marcory et d'Abou-Abou [17 - 19]. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence de la décharge d'Akouédo sur la contamination des ressources en eau par les éléments traces métalliques et de déterminer les risques de santé liés à l'utilisation de ces eaux. Pour atteindre cet objectif, un total de 89 échantillons d'eaux souterraines, de lagune et de lixiviat a été collecté sur 6 mois de Juin 2013 à Janvier 2014. Les éléments traces métalliques Cd, Pb, Cu, Zn, Fe et Co ont été analysés par spectrophotomètre d'absorption atomique, et les indices de pollution métallique et de risques cancérogènes des eaux ont été calculés et examinés.

## 2. Matériel et méthodes

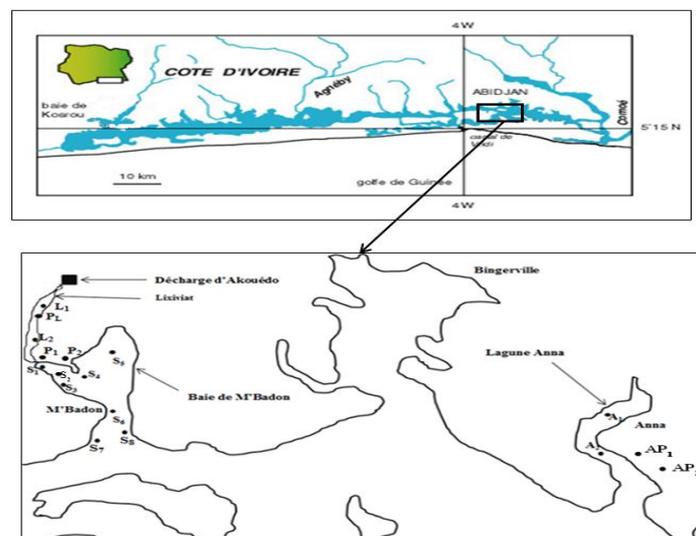
### 2-1. Présentation des sites d'étude

#### 2-1-1. Décharge d'Akouédo

La décharge d'Akouédo est située dans la partie Est d'Abidjan, à 18 km du centre-ville, de longitude Ouest  $3^{\circ}56$  et de latitude Nord  $5^{\circ}21$  sur l'axe Abidjan-Bingerville (**Figure 1**). C'est l'unique décharge de la ville d'Abidjan. Elle a été construite en 1965. C'est une décharge sauvage immense et unique, constituée par un ravin naturel qui s'étend du nord au sud, sur 153 hectares de surface et 25 mètres de profondeur en moyenne. Cette décharge reçoit approximativement 800000 tonnes de déchets par an dont les deux tiers sont des ordures ménagères et le tiers des déchets industriels, hospitaliers et certains déchets dangereux. Ce site n'a pas été aménagé avant d'être transformé en décharge. De ce fait, les rejets urbains sont déposés à même le sol. Elle ne comprend pas de système de drainage. Par conséquent, les lixiviats sont véhiculés de manière archaïque de la décharge à la lagune, dans la baie de M'Badon située à 1,5 km de la décharge, par le biais de canalisations disposées sous les tas d'ordures. Aujourd'hui, le site est entouré par plusieurs maisons d'habitation.

#### 2-1-2. Baie de M'Badon et lagune Anna

La baie de M'Badon est l'une des multiples baies du système lagunaire Ebrié (**Figure 1**). Elle est située entre  $3^{\circ}89$  et  $3^{\circ}90$  de longitude Ouest à la latitude Nord de  $5^{\circ}34$  et à 73 m au-dessus du niveau de la mer. Avec une longueur et une largeur moyennes respectives de 2,3 km et 1,70 km, la baie de M'Badon couvre un périmètre de 8 km et une surface de  $3,91 \text{ km}^2$ . Sa profondeur moyenne est de 2,5 m, son volume est de  $9,8.10^6 \text{ m}^3$  et son bassin versant est estimé à  $78000 \text{ km}^2$ . Proche de l'océan atlantique, cette baie est fortement soumise aux influences marines en saison sèche (Décembre-Avril et Août), à une crue du fleuve Comoé de Septembre à Novembre, et aux eaux de pluies de Mai à Juillet. Les activités anthropiques sont dominées par la pratique de l'agriculture (champs de gombos, manioc, tomate, maïs, etc.), la pêche et l'urbanisation. La lagune Anna est une lagune semi fermée située à plus de 6 km de la baie de M'Badon de longitude Ouest  $3^{\circ}52$  et de latitude Nord  $5^{\circ}19$  dans la commune de Bingerville. Les activités anthropiques sont dominées par la pêche, le commerce et par la présence d'une scierie au bord de la lagune.



**Figure 1 :** Situation géographique des sites et stations d'échantillonnage

## 2-2. Prélèvement des échantillons et méthodes d'analyse

L'échantillonnage des eaux souterraines, de surface et de lixiviat a été effectué de Juin 2013 à Janvier 2014 de l'écoulement du lixiviat à la lagune (**Figure 1**). Les stations L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> ont été sélectionnées dans la vallée, à 0,3 km et 0,7 km respectivement de la décharge. Les puits situés non loin de la lagune et de l'écoulement du lixiviat ont été aussi échantillonnés (P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>). Un troisième puits (P<sub>1</sub>) a été également échantillonné au niveau de la vallée drainée par le lixiviat. La baie de M'Badon qui reçoit l'eau de lixiviat a fait l'objet de 8 stations de prélèvements (S<sub>1</sub> à S<sub>8</sub>). Les stations S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> et S<sub>6</sub> sont situées non loin du déversoir du lixiviat. La station S<sub>4</sub> est située dans une zone confinée de la baie. La station S<sub>5</sub> reçoit les rejets de la population de M'Badon. Les stations S<sub>7</sub> et S<sub>8</sub> sont situées à l'entrée de la baie et reçoivent les eaux du fleuve Comoé pendant la saison des crues et les eaux marines principalement pendant la saison sèche. Ce choix s'est opéré en tenant compte des apports d'eau dans la baie de M'Badon, mais également de l'occupation du sol sur son bassin versant. Les stations A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub>, situées dans la lagune Anna, ont été prises comme stations de référence pour les eaux de lagune et les stations AP<sub>1</sub> et AP<sub>2</sub> pour les eaux de puits. Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide d'une bouteille Niskin et recueillis dans les flacons en polyéthylène tout en prenant soin de les rincer deux fois avec l'échantillon. Les flacons ont été conservés immédiatement au frais (4°C) et à l'abri de la lumière, dans une glacière sur le terrain pour éviter toute réaction photochimique ou biologique. Au laboratoire, tous les échantillons d'eau ont été directement conservés dans des congélateurs à des températures inférieures à 4°C. Le pH a été mesuré le même jour à l'aide d'un multi paramètre de type HANNA HI 9828. Les échantillons d'eau ont été filtrés à travers des papiers filtres Whatmann GFC de 0,45 µm, acidifiés avec de l'acide nitrique (2 %) et stockés dans des bouteilles en polyéthylène jusqu'à l'analyse. Le dosage de ces métaux Cd, Co, Cu, Fe, Pb, Ni et Zn a été effectué par absorption atomique (SpectrAA100 Varian spectrophotometer, Japan). Chaque échantillon a été analysé en triple. Les limites de détection des éléments traces métalliques Cd (0,01 µg / L), Co (0,01 µg / L), Cu (0,02 µg / L), Fe (0,01 µg / L), Pb (0,06 µg / L), Ni (0,02 µg / L), Zn (0,05 µg / L)

## 2-3. Calcul des indices de pollution des eaux

### 2-3-1. Indice de pollution des eaux par la décharge LWPI

L'indice de la qualité de l'eau (WQI : de l'Anglais Water Quality Index) est utilisé pour déterminer l'influence d'une décharge sur la qualité de l'eau. La nouvelle formulation de cet indice est l'indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI de l'Anglais Landfill Water Pollution Index). LWPI est calculé suivant **l'Équation (1)**:

$$LWPI = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i * S_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

où,  $w_i$  est le poids du  $i^{ème}$  polluant du lixiviat,  $n$  est le nombre de polluants analysés dans le lixiviat, et  $S_i$  est le poids du sous-indice du  $i^{ème}$  polluant du lixiviat.

$S_i$  est donné par **l'Équation (2)**:

$$S_i = \frac{C_{pi}}{C_{bi}} \quad (2)$$

$C_{pi}$  est la concentration du  $i^{ème}$  paramètre dans chaque échantillon d'eau polluée et  $C_{bi}$  est la concentration du  $i^{ème}$  paramètre de l'échantillon en amont des eaux polluées (référence).

Pour le pH,  $S_i$  est calculé en plaçant au dénominateur la valeur la plus petite du pH :

$$S_i = \frac{C_p}{C_b} \quad \text{si} \quad C_b < C_p \tag{3}$$

$$S_i = \frac{C_b}{C_p} \quad \text{si} \quad C_p < C_b \tag{4}$$

Les valeurs des poids  $W_i$  des éléments métalliques d'une décharge ont été calculées pour huit (8) paramètres selon le Ministère de la Régulation de l'Environnement concernant les décharges en Pologne (Regulation of Minister of Environment concerning landfill 2013) [20]. La régulation des valeurs du poids pour analyser ces paramètres résulte des travaux et des analyses pris en considération par plusieurs auteurs [21 - 29]. Le poids (de) trois (3) est affecté aux ETM parce qu'il n'y a pas fréquemment des problèmes de pollution métallique des eaux dus aux décharges [21, 24]. Le poids 2 est affecté au pH car les faibles valeurs du pH peuvent provenir d'autres sources de pollution et non de la décharge (effluents domestiques, les engrais, les cours d'eau etc.). L'interprétation des valeurs de LWPI est donnée dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1 : Classification de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI) [11]**

LWPI	Interpretation
$LWPI \leq 0,77$	Eau non polluée
$0,77 < LWPI \leq 1,53$	Eau modérément polluée, subissant un faible impact de la décharge
$1,53 < LWPI \leq 3,83$	Eau polluée avec un impact visible de la décharge
$LWPI > 3,83$	Eau fortement polluée, fort impact de la décharge

### 2-3-2. Évaluation des risques cancérigènes et non cancérigènes

Le risque est défini comme le processus d'estimation d'apparition d'un évènement et la probabilité d'avoir des effets néfastes sur la santé de l'Homme pendant un temps ou période donné [30]. L'évaluation du risque sur la santé de l'Homme se fait suivant quatre étapes dont l'identification du risque, l'évaluation de la toxicité (dose-réponse), l'exposition, et la caractérisation du risque. L'estimation de la dose ou quantité prise par un être humain afin d'être contaminé est déterminée par la Dose Journalière Chronique (DJC) (ou CDI : Chronic Daily Intake de l'Anglais). La DJC détermine la quantité de substance chimique ingérée ( $DJC_i$ ), ou absorbée par la peau ( $DJC_d$ ) par kilogramme de la masse par personne par jour ( $mg \cdot kg^{-1} \cdot j^{-1}$ ) selon **les Équations (5 et 6)** suivantes :

$$DJC_i = \frac{C * IR * ED * EF}{BW * AT} \tag{5}$$

$$DJC_d = \frac{C * SA * Kp * ET * ED * EF * CF}{BW * AT} \tag{6}$$

Le **Tableau 2** suivant donne les valeurs des différents paramètres pour le calcul des risques.

**Tableau 2 : Paramètres caractérisant les valeurs de la dose journalière chronique (DJC) USEPA 2004 [8]**

Paramètres	Description	Unité	Valeurs
C	Concentration du metal	$\mu\text{g.L}^{-1}$	
IR	Taux d'ingestion	L / j	2,2
EF	Fréquence d'exposition	j / ans	365
ED	Durée d'exposition	Ans	30
BW	Poids par personne	Kg	60,7
AT	Temps moyen ou minimal	Jours	20476
SA	Surface de l'environnement	$\text{cm}^2$	15000-20000
CF	Facteur conversion	$\text{L} / \text{cm}^3$	0,001
ET	Temps d'exposition	h / j	0,58
$K_p$	Coefficient de perméabilité	cm / h	0,001
$K_p(\text{Cd}, \text{Cu}, \text{Fe})$			0,004
$K_p(\text{Co}, \text{Pb})$			0,004
$K_p(\text{Zn})$			0,0006

*La caractérisation du risque se fait séparément selon les effets cancérigènes et non cancérigènes et inclue la discussion des facteurs qui résultent de la surestimation et de la sous-estimation du risque.*

### **Risque non cancérigène**

Le risque potentiel non cancérigène d'exposition aux contaminants (QD) est évalué par le rapport des doses d'exposition aux contaminants calculées selon les voies d'exposition (DJC) (ingestion, dermatologique, inhalation) sur la dose de référence (RfD) :

$$QD = DJC / RfD \quad (7)$$

QD (ou hazard quotient, HQ, en anglais) est le quotient de danger. Cet indice donne une indication du niveau de risque de santé dû à une exposition à un polluant donné. DJC est la dose journalière chronique ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ ) et RfD ( $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ ) est la dose journalière d'un polluant qui ne cause aucun risque de santé à une population humaine exposée durant toute une vie. Lorsque QD est supérieur à 1 (unité), les populations exposées aux polluants peuvent avoir des problèmes de santé. Pour déterminer l'ensemble des effets potentiels non cancérigène dû à plus d'un paramètre chimique, les valeurs de QD pour chaque élément chimique sont additionnées et exprimées par HI [6].

$$HI = QD_1 + QD_2 + \dots + QD_n \quad (8)$$

Si HI est inférieur à 1 ( $HI < 1$ ), alors il n'y a pas de risque de contamination chronique pour ce site; Si HI est supérieur à 1 comme conséquence de la somme des QD, il serait approprié de prendre les QD de chaque métal séparément.

**Tableau 3 : Indice de toxicité de chaque élément trace métallique [8, 31, 32]**

Eléments	SF(mg.kg <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>		RfD (µg.kg <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> )	
	Oral	Derma	Oral	Derma
Cd	6500	NA	0,5	0,025
Pb	8,5	NA	1,4	0,42
Cu	NA	NA	40	8
Zn	NA	NA	300	60
Fe	NA	NA	700	140
Co	NA	NA	0,3	0,06

SF = facteur de pente (slope factor de l'Anglais) [6, 33]. SF évalue la probabilité d'un individu à développer un cancer après exposition à un polluant chimique durant une période de sa vie [34]. NA = non applicable; RfD = Dose de référence; Derma : dermatologique.

**Risque cancérigène**

Le risque cancérigène (CR) est estimé par la probabilité pour un individu de développer un cancer après un long temps de vie (en général 30 ans) comme résultat de l'exposition au potentiel cancérigène. De façon linéaire, l'Équation (9) de la faible dose du risque cancérigène est utilisée pour chaque mode d'exposition [6] :

$$CR (mg .kg^{-1} .j^{-1}) = DJC * SF \tag{9}$$

DJC est la dose journalière chronique (mg.kg<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>) et SF (mg.kg<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup> est le facteur de pente. Si un site possède de multiples contaminants cancérigènes, les valeurs des risques de cancer pour chaque polluant et chaque mode d'exposition sont additionnées et comparées avec les risques acceptés. Les risques cancérigènes de l'ordre de 1.10<sup>-6</sup> à 1.10<sup>-4</sup> sont typiquement jugés acceptables par USEPA 1990, 1991a et 1991b [35 - 37]. Selon [33], le CR doit être inférieur à 1.10<sup>-6</sup>.

**3. Résultats et discussion**

**3-1. Indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI)**

L'indice de pollution des eaux par la décharge LWPI a été déterminé dans les puits proches de la décharge et dans la baie de M'Badon (Tableaux 4 et 5). Les valeurs de LWPI ont varié de 1,73 à 5,09 dans les puits (Tableau 4). Un gradient décroissant a été observé dans l'ordre P<sub>L</sub> > P<sub>1</sub> > P<sub>2</sub>, indiquant une atténuation de l'influence du lixiviat sur les eaux de puits au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la vallée. Les valeurs de LWPI des puits P<sub>1</sub> (1,73) et P<sub>2</sub> (3,11) se sont situées dans la plage des valeurs pour des eaux polluées et subissant l'influence d'une décharge (1,534 < LPWI < 3,835). Le puits P<sub>L</sub> situé dans la vallée a affiché un LWPI de 5, indiquant que ses eaux sont fortement polluées et subissent un impact significatif de la décharge. Les valeurs des sous indices W<sub>i</sub>S<sub>i</sub> donnent une idée de la contribution individuelle des paramètres intervenant dans le calcul de LWPI. Les éléments traces métalliques (ETM) Ni et Zn ont été les contribuant majeurs de LWPI pour les eaux du puits P<sub>L</sub>, suivi de Co, Pb et Cu respectivement (Tableau 4). Au niveau du puits P<sub>2</sub>, les ETM Ni, Pb et Co ont été responsables de la valeur élevée de LWPI. Enfin, les ETM Cu et Pb ont contribué significativement à la valeur élevée de LWPI enregistrée pour les eaux du puits P<sub>1</sub>. Des travaux effectués par [11] en Pologne ont montré également une forte contamination des eaux de puits situées près de la décharge de Hryniewezen avec des valeurs de LWPI comprises entre 0,52 et 98,25.

**Tableau 4 : Indice de pollution des eaux de puits par la décharge (LWPI)**

	$W_iS_i$ pH	$W_iS_i$ Pb	$W_iS_i$ Cu	$W_iS_i$ Cd	$W_iS_i$ Zn	$W_iS_i$ Ni	$W_iS_i$ Co	$W_iS_i$ Fe	LWPI
P <sub>1</sub>	2,34	19,10	24,03	1,50	3,08	8,11	7,28	6,02	3,11
P <sub>2</sub>	2,31	12,55	4,48	0,78	2,88	10,11	6,60		1,73
P <sub>L</sub>	1,50	12,21	9,69	5,68	33,80	35,21	16,20	2,89	5,09

$W_iS_i$ : sous indices indiquant la contribution individuelle des paramètres au LWPI

Les valeurs de LWPI obtenues pour les eaux de la baie de M'Badon ont varié de 1,01 à 1,64 (**Tableau 5**). Les stations S<sub>1</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub> et S<sub>8</sub> ont enregistré des valeurs de LWPI comprises entre  $1,01 < LWPI < 1,46$ , ce qui montre que les eaux collectées à ces stations sont modérément polluées et subissent un faible impact de la décharge ( $0,77 < LWPI \leq 1,53$ ). Les autres stations S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> et S<sub>7</sub> ont affiché des valeurs LWPI de 1,55 et 1,64. Ces valeurs suggèrent que les eaux de ces stations sont polluées et subissent un impact significatif du lixiviat ( $1,53 < LWPI \leq 3,83$ ). Dans l'ensemble, les sous indices  $W_iS_i$  indiquent que les ETM Fe et Co ont contribué majoritairement aux valeurs élevées de LWPI des eaux lagunaires, suivi parfois du Ni, du Pb, et du Cd. La station S<sub>1</sub> située au déversoir du lixiviat a enregistré la plus faible valeur de LWPI. Ce résultat pourrait s'expliquer par une floculation / adsorption des éléments métalliques dans la vase à la station S<sub>1</sub>. Les autres stations proches du déversoir du lixiviat (S<sub>2</sub> et S<sub>3</sub>) ont enregistré les valeurs LWPI les plus élevées, confirmant l'influence du lixiviat sur les eaux de la lagune. Par contre, la valeur LWPI enregistrée à la station S<sub>7</sub> éloignée du lixiviat ne serait pas le fait de l'influence du lixiviat, mais plutôt des rejets du quartier M'Badon. La distribution spatiale de LWPI dans les eaux de puits et lagunaires montre que la décharge d'Akouédo influence significativement la contamination métallique des eaux environnantes et que cette influence s'atténue progressivement avec l'éloignement de la décharge.

**Tableau 5 : Indice de pollution (LWPI) des eaux lagunaires de la baie de M'Badon par la décharge**

	$W_iS_i$ pH	$W_iS_i$ Pb	$W_iS_i$ Cu	$W_iS_i$ Cd	$W_iS_i$ Zn	$W_iS_i$ Ni	$W_iS_i$ Co	$W_iS_i$ Fe	LWPI
S <sub>1</sub>	2,12	2,79	1,95	2,72	2,88	1,26	2,13	7,40	1,01
S <sub>2</sub>	2,09	3,29	0,68	3,58	2,94	3,11	8,22	13,79	1,64
S <sub>3</sub>	2,04	3,65	0,74	3,45	3,96	2,62	5,25	13,94	1,55
S <sub>4</sub>	2,10	2,8	2,16	4,10	4,74	4,26	5,91	7,49	1,46
S <sub>5</sub>	2,07	1,14	0,69	3,81	2,76	2,87	5,37	9,49	1,23
S <sub>6</sub>	2,08	1,14	1,13	4,25	2,81	2,78	6,30	6,96	1,19
S <sub>7</sub>	2,08	3,79	0,43	3,70	1,97	4,59	6,18	12,84	1,55
S <sub>8</sub>	2,12	1,91	0,26	3,35	2,66	5,25	5,37	11,33	1,31

$W_iS_i$ : sous indices indiquant la contribution individuelle des paramètres au LWPI

### 3-2. Evaluation du risque non cancérigène et du risque cancérigène

Les résultats de l'évaluation du risque non cancérigène dans les eaux par voie dermatologique (QD<sub>d</sub>) et par ingestion (QD<sub>i</sub>) dans le lixiviat, la baie de M'Badon, la lagune Anna et les puits sont donnés dans les **Tableaux 6 et 7**. Les valeurs QD<sub>i</sub> pour les ETM Fe, Cu et Zn de même que les valeurs de QD<sub>d</sub> de tous les ETM étudiés sont inférieures à 1 dans tous les échantillons. Par contre, dans la baie de M'Badon, les ETM Pb, Co et Cd ont donné des valeurs QD<sub>i</sub> respectives de 5,99 ; 6,02 ; 3,53. De même, les QD<sub>i</sub> obtenues pour ces

trois ETM dans la lagune Anna ont été de 9,37 (Pb); 2,97 (Co) et 3,30 (Cd). Toutes ces valeurs sont supérieures à la limite suggérée par USEPA ( $QD < 1$ ). Ces résultats démontrent que les ETM Pb, Co et Cd peuvent causer des effets néfastes par ingestion de l'eau contaminée et qu'il n'y a pas de risque de santé par exposition dermatologique de la population. Les moyennes de HI par ingestion respectivement obtenues dans le lixiviat (17,51), la baie de M'Badon (16,79), les puits (13,90 et 9,01) et la lagune Anna (16,16) (*Tableaux 6 et 7*) sont supérieures à la limite suggérée par USEPA ( $HI = 1$ ). Cela suggère un risque de contamination chronique, donc des problèmes de santé pour la population. Par ailleurs, les valeurs de HI dermatologiques ont été de 1,15 dans le lixiviat, 1,12 dans la baie de M'Badon, 0,85 et 0,62 dans les puits et 0,99 dans la lagune Anna (*Tableaux 6 et 7*). Ce résultat indique un risque de la santé de la population par contact prolongé de la peau pour les eaux du lixiviat et de la baie de M'Badon.

**Tableau 6 : Risques non cancérigènes(QD) des eaux lagunaires et du lixiviat**

	Baie de M'Badon		Lagune Anna		Lixiviat	
	QD <sub>i</sub>	QD <sub>d</sub>	QD <sub>i</sub>	QD <sub>d</sub>	QD <sub>i</sub>	QD <sub>d</sub>
Fe	$2,28.10^{-2}$	$4.10^{-4}$	0,01	$1,30.10^{-4}$	0,18	$3,5.10^{-3}$
Cu	0,10	$1,97.10^{-3}$	0,35	0,01	0,19	$3,8.10^{-3}$
Cd	3,53	0,27	3,30	0,25	4,53	0,35
Zn	$2,55.10^{-3}$	$3.10^{-5}$	$2,29.10^{-3}$	$2,72.10^{-5}$	0,03	$4.10^{-4}$
Pb	5,99	0,32	9,37	0,49	7,62	0,40
Co	6,02	0,48	2,9	0,24	4,96	0,39
HI	16,79	1,12	16,16	0,99	17,51	1,15

*QD<sub>i</sub>*: Quotient de danger par ingestion; *QD<sub>d</sub>*: Quotient de danger par contact dermatologique

**Tableau 7 : Risques non cancérigènes des eaux de puits**

	Puits M'Badon		Puits Anna	
	QD <sub>i</sub>	QD <sub>d</sub>	QD <sub>i</sub>	QD <sub>d</sub>
Fe	0,01	$1,8.10^{-4}$	$4,29.10^{-3}$	$8,49.10^{-5}$
Cu	0,28	0,01	0,06	$1,22.10^{-3}$
Cd	1,81	0,14	4,75	0,36
Zn	$1,93.10^{-3}$	$0,2.10^{-4}$	$1,77.10^{-3}$	$2,11.10^{-5}$
Pb	8,76	0,46	2,92	0,15
Co	3,09	0,24	1,28	0,10
HI	13,90	0,85	9,01	0,62

*QD<sub>i</sub>*: Quotient de danger par ingestion; *QD<sub>d</sub>*: Quotient de danger par contact dermatologique

Les ETM Pb, Cd et Co ont été les contribuant majeurs au risque non cancérigène par ingestion des eaux par les habitants avec des pourcentages respectives 32,41 - 63,02 %, 13,02 - 52,72 %, et 14,21 - 35,85 %. Des résultats similaires ont été rapportés par [38] pour ces ETM Pb, Cd et Co dans les eaux de surface proches de divers secteurs d'activités au Pakistan comme étant les contribuant majeurs au risque non cancérigène. Etant donné que les métaux Pb, Cd et Co ont affiché des QD<sub>i</sub> supérieurs à l'unité, et que le Pb et le Cd sont reconnus comme cancérigènes, nous avons jugé nécessaire d'évaluer le risque cancérigène (CR) associé aux ETM Cd et Pb. Les résultats des CR sont donnés dans les *Tableaux 8 et 9*.

**Tableau 8 : Risques cancérigènes (CR) des eaux de surface**

	CR Lixiviat	CR M'Badon	CR Anna
Cd	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Pb	1,26	1,17	1,54

**Tableau 9 : Risques cancérigènes (CR) des eaux souterraines**

	CR Puits M'Badon	CR Puits Anna
Cd	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
Pb	1,44	0,48

Les valeurs de CR obtenues sont supérieures à celles jugées acceptables ( $10^{-6} < CR < 10^{-4}$ ). Il y a donc probabilité pour un individu de développer le cancer par ingestion après un certain temps de sa vie.

#### 4. Conclusion

L'examen des indices de risques non cancérigènes et cancérigènes et de l'indice de pollution des eaux lagunaires et souterraines montre que la décharge d'Akouédo constitue une source de pollution métallique de ces eaux. Les eaux souterraines situées dans la vallée en aval de la décharge sont fortement polluées tandis que les eaux souterraines en dehors de la vallée sont modérément contaminées et subissent un impact significatif de la décharge en fonction de leur proximité du déversoir du lixiviat. Les eaux de la baie de M'Badon sont modérément contaminées par la décharge indiquée par les valeurs de  $1,01 < LWPI \leq 1,64$ . Les métaux Pb, Co et Cd ont été les contributeurs majeurs du risque non cancérigène par ingestion de ces eaux par les habitants. Les résultats de cette étude suggèrent qu'il est possible qu'un individu développe le cancer par ingestion des eaux de puits et de lagunes aux environs de la décharge d'Akouédo après un certain temps de sa vie.

#### Remerciements

*Les auteurs tiennent à remercier le Centre de Recherche Océanographique (CRO) pour son aide précieuse et son soutien financier lors des prélèvements et des analyses.*

#### Références

- [1] - I. S. AKOTAYON, U. A. MBATA, G.A. OLALUDE, *J Appl. Sci Environ Sanit.*, 6 (2) (2011) 155 - 163.
- [2] - P. CHAKRABORTY, D. RAMTEKE, S. D. GADI, and P. BARDHAN, *Mar. Pollut. Bull.*, 106 (1) (2016) 274 - 282.
- [3] - F. LIANG, S. YANG and C. SUN, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 87 (2011) 404 - 408.
- [4] - M. DOGAN, A. U. DOGAN, C. CELEBI and Y. I. BARIS, *Indoor Built Environ.*, 14 (6) (2005) 533 - 536.
- [5] - M. COSTA and C. B. KLEIN, *Crit. Rev. Toxicol.*, 36 (2006) 155 - 163.
- [6] - USEPA (US Environmental Protection Agency), "Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol 1. Human Health Evaluation Manual. Part A (interim final) EPA / 540 / 1-89 / 002." Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, (1989).

- [7] - USEPA (US Environmental Protection Agency), “*Recommendation of the technical review workgroup for an interim approach to assessing risks associated with adult exposure to lead in soil. Technical Review Workgroup for Lead*, (US Environmental Protection Agency), (1996).
- [8] - USEPA. (US Environmental Protection Agency), “*Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. 1, Human Health Evaluation Manual. Part E (supplemental guidance for dermal risk assessment)*, EPA/540/R/99/005.” Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, DC, USA, (2004).
- [9] - E. WEISLO, D. LOVEN, R. KUCHARSKI and J. SZDZUJ, *Chemosphere*, 47 (5) (2002) 507-515, Doi : 10.1016/S0045-6535(01)003°1-0
- [10] - Y. L. LI, Y. G. LIU, J. L. LIU, G. M. ZENG and X. LI, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 81 (1) (2008) 36-41, Doi : 10.1007/s00128-008-9447-0
- [11] - I. A. TALALAJ, *Environmental Monitoring Assessment*, 186 (2014) 3673 - 3683.
- [12] - G. KOUADIO, B. DONGUI et A. TROKOUREY, *Revue Scientifique Technologique*, 1 (2000) 33 - 41.
- [13] - I. K. KOUAME, D. L. GONE, I. SAVANE, E. A. KOUASSI, K. KOFFI, B. T. A. GOULA et M. DIALLO, *Afrique Science*, 2 (1) (2006) 39 - 56.
- [14] - I. K. KOUAME, B. DIBI, K. KOFFI, I. SAVANE and I. SANDU, *International Journal of Conservation Science*, (2010) 149 - 160.
- [15] - O. A. ADJIRI, D. L. GONE, I. K. KOUAME, B. KAMAGATE, and J. BIEMI, *International. Journal of Biological and Chemical Science*, 2 (4) (2008) 401 - 410.
- [16] - A. E. KOUASSI, K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, I. K. KOUAME, N. SORO, et J. BIEMI, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, 19 (2014) 63 - 74.
- [17] - N. L. B KOUASSI, K. M YAO, and A. TROKOUREY, *Environmental Forensics*, 16 (1) (2015) 96 - 108.
- [18] - K. M. YAO, B. S. METONGO, A. TROKOUREY, and Y. BOKRA, *European Journal of Scientific Research*, 34 (2) (2009) 280 - 289.
- [19] - I. BAKARY, K. M. YAO, O. A. ETCHIAN, B. S. METONGO, A. TROKOUREY, and Y. BOKRA, *Environ. Monit. Assess*, 187 (762) (2015) 1 - 11, DOI 10.1007/s10661-015-4976-6
- [20] - Regulation of Minister of Environment concerning the landfills 2013. “*Journal of laws from 30.04.2013*”, (2013) 523.
- [21] - T. H. CHRISTENSEN, P. KJELDEN, P. L. BJERG, D. L. JENSEN, J. B. CHRISTENSEN, A. BAUN, H. J. VALBRECHTSEN and G. HERON, «*Biogeochemistry of landfill leachate plumes*». *Applied Geochemistry*, 16 (2001) 659 - 718.
- [22] - S. MOR, K. RAVINDRA, R. P. DAHIVA and A. CHANDRA, *Environmental and Monitoring Assessment*, 118 (2006) 435 - 456.
- [23] - A. JONES LEE and G. F. LEE, “*4<sup>th</sup> Sardinia International Landfill Symposium, Italy*”, (1993).
- [24] - P. J. FLYHAMMAR, *Journal of Environmental Quality*, 24 (1995) 612 - 621.
- [25] - P. KJELDEN, M. A. BARLAZ, A. P. ROOKER, A. LEDIN and T. CHRISTENSEN, *Critical Reviews In Environmental Sciences and Technology*, 32 (4) (2002) 297 - 336.
- [26] - J. K. OYGARD, A. MAGE and E. GJENGEDAL, *Water Research*, 38 (2004) 2851 - 2858.
- [27] - C. B. OMAN and C. JNESTEDT, *Waste Management*, 28 (2008) 1876 - 1891.
- [28] - M. VASANTHAVIGAR, K. SRINIVASAMOORTHY, K. VIJAYARAGAVAN, R. RAJIV GANTHI, and S. VASUDEVAN, *Environmental Monitoring and Assessment*, 171 (2010) 595 - 609.
- [29] - S. K. M. CUMAR and B. NAGARAJA, *Environmental Monitoring and Assessment*, 178 (2011) 499 - 505.
- [30] - R. O. KOLLURU, S. M. BARTELL, R. M. PITBLADO and R. S. STRICOFF, “*Mc Graw-Hill*”, (1996).
- [31] - B. WU, D. Y. ZHAO, H. Y. JIA, Y. ZHANG, X. X. ZHANG and S. P. CHENG, *Bull Environ. Contam. Toxicol.*, 82 (2009) 405 - 409.
- [32] - S. LI and Q. ZHANG, *Journal of Hazardous Materials*, 181(2010) 1051 - 1058.
- [33] - USEPA, “*Risk-Based Concentration Table*”. (United States Environmental Protection Agency), Available at <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index.htm> (accessed March 13, 2011), (2010).

- [34] - USEPA, "*Regional Screening Level (RSL) Summary Table : November 2011*", (2011), Available at : <http://www.epa.gov/regshwmd/risk/human/Index.htm>
- [35] - USEPA (US Environmental Protection Agency), "*National oil and hazardous substances pollution contingency plan, 40 CFR part 300.*" Washington, DC : (US Environmental Protection Agency), (1990).
- [36] - USEPA (US Environmental Protection Agency), "*Role of the baseline risk assessment in superfund remedy selection decisions Office of Solid Waste and Emergency Response*", OSWER directive 9355.0-30, (1991b).
- [37] - J. IQBAL AND M. H. SHAH, "*Human and Ecological Risk Assessment*", 19 (2013) 1539-1543, DOI : 10.1080/10807039.2012.716681