

Évaluation de la capacité de fixation des métaux lourds par les sédiments d'une ferme piscicole en étang

Ali SANOU^{1,2}, Safiatou COULIBALY^{3*} et Boua Célestin ATSE³

¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèses de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

² Ecole Normale Supérieure, Laboratoire des Sciences Physiques Fondamentales et Appliquées (LSPFA), 08 BP 10 Abidjan, Côte d'Ivoire

³ Centre de Recherches Océanologiques, Département Aquaculture, BPV 18, Abidjan, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : safinanga@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité des sédiments d'une ferme piscicole en étang à fixer les métaux lourds et de déterminer leur qualité environnementale. La méthodologie a consisté à prélever des échantillons d'eau et de sédiments d'une ferme située dans le département d'Agboville (Côte d'Ivoire). Ces prélèvements ont permis de déterminer les concentrations d'arsenic (As), de cadmium (Cd), de mercure (Hg) et de plomb (Pb) dans les échantillons à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique. L'analyse a indiqué que les concentrations saisonnières des métaux lourds ont évolué de $0,007 \pm 0,00$ à $0,074 \pm 0,08$ mg/L dans l'eau et de $0,121 \pm 0,00$ à $19,570 \pm 11,23$ mg/kg dans les sédiments avec des valeurs moyennes plus élevées dans les sédiments ($0,147 \pm 0,03$ - $19,155 \pm 8,26$ mg/kg) que dans l'eau ($0,011 \pm 0,00$ - $0,049 \pm 0,06$ mg/L). Les résultats du coefficient d'échange eau-sédiment ont montré que la mobilité des métaux de l'eau vers les sédiments se fait dans l'ordre décroissant suivant : $CE(Hg) > CE(Pb) > CE(As) > CE(Cd)$. Les valeurs de CE ont montré que les sédiments de la ferme ont une forte capacité de fixation des métaux. Par ailleurs, toutes les concentrations de mercure dans les échantillons de sédiments étaient supérieures à la concentration PEC et les concentrations d'arsenic d'au moins 33 % des échantillons étaient comprises entre le TEC et le PEC. Cela traduit la toxicité du mercure et de l'arsenic pour les organismes aquatiques vivant dans les sédiments de la ferme. En outre, cette étude montre que les poissons d'élevage pourraient être contaminés par les sédiments ; traduisant ainsi la nécessité d'un contrôle permanent de la qualité de l'eau et des sédiments de la ferme pour réduire la pollution et la contamination en vue d'assurer une bonne production de poissons.

Mots-clés : *sédiments, métaux lourds, coefficient d'échange, ferme piscicole.*

Abstract

Assessment of heavy metals binding capacity by the sediments of a pond fish farm

The objective of this study is to assess the sediment capacity of a fish farm in a pond to fix heavy metals and determine their environmental quality. The methodology consisted in taking samples of water and sediments from the farm located in the department of Agboville (Côte d'Ivoire). By using an atomic

absorption spectrophotometer, we have been able to determine the concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), mercury (Hg) and lead (Pb) in the samples. Their analysis indicated that seasonal heavy metal concentrations ranged from 0.007 ± 0.00 to 0.074 ± 0.08 mg / L in water and from 0.121 ± 0.00 to 19.570 ± 11.23 mg / kg in sediments with higher average values in sediments (0.147 ± 0.03 - 19.155 ± 8.26 mg / kg) than in water (0.011 ± 0.00 - 0.049 ± 0.06 mg / L). The results of the water-sediment exchange coefficient have shown that the mobility of metals from water to sediments takes place in the following decreasing order: EC (Hg) > EC (Pb) > EC (As) > EC (Cd). EC values have shown that farm sediments have a strong ability to fix metals. In addition, all of the mercury concentrations in the sediment samples were above the PEC concentration and the arsenic concentrations of at least 33 % of the samples were between the TEC and the PEC. This reflects the toxicity of mercury and arsenic to aquatic organisms living in farm sediments. Moreover, this study shows that farmed fish may be contaminated with sediment. So there is a need for constant monitoring of the quality of the farm's water and sediments to reduce pollution and contamination and to ensure good fish production.

Keywords : *sediment, heavy metals, exchange coefficient, fish farm.*

1. Introduction

L'abondance d'utilisation des métaux lourds dans les secteurs industriels, domestiques, agricoles et technologiques a conduit à leur distribution généralisée dans l'environnement [1]. Aujourd'hui, l'augmentation de ces métaux lourds dans l'environnement pose un problème de plus en plus préoccupant. Les écosystèmes aquatiques sont les plus affectés par cette pollution métallique [2]. En effet, en raison de leur toxicité et de leur tendance à s'accumuler dans l'environnement aquatique, les métaux peuvent nuire à la diversité des espèces et endommager des écosystèmes vitaux [3]. Une fois arrivés dans l'environnement aquatique, ils se répartissent entre les différents compartiments de l'environnement aquatique (l'eau, les solides en suspension, les sédiments et le biote) [4, 5]. Les métaux présents dans l'environnement aquatique peuvent exister en phase colloïdale, particulaire et dissoute [6]. Plusieurs processus gouvernent la distribution et la répartition des métaux lourds dans les eaux naturelles. Cependant, l'adsorption, la précipitation et la complexation sont les principaux processus géochimiques responsables des transferts des métaux à l'interface eau - sédiments [7]. Les sédiments sont des puits importants pour les métaux lourds et jouent un rôle important dans l'enrichissement et la remobilisation des métaux dans les systèmes aquatiques [2]. Les métaux liés aux sédiments sont susceptibles d'être libérés dans la colonne d'eau, lors des changements des conditions environnementales telles que le potentiel redox, le pH, la désorption, affectant ainsi le biote aquatique [8]. Les concentrations élevées de ces métaux dans les systèmes aquatiques sont connues pour nuire aux organismes aquatiques. En effet la bioaccumulation des métaux toxiques peut affecter les muscles, le foie, les reins et d'autres tissus des poissons, entraînant une perturbation du métabolisme et une obstruction de la croissance et du développement des poissons [9]. Les dangers pour la santé humaine liés à la pollution des métaux lourds sont nombreuses et certaines incluent des maux de tête, des maladies du foie [10], des systèmes rénal, hématopoïétique, gastro-intestinal [11], la toxicité pour les nerfs et les effets cancérigènes [12]. La mobilité des métaux lourds entre l'eau et les sédiments et leur accumulation dans les sédiments peuvent être évaluées à l'aide du coefficient d'échange eau-sédiment encore appelé coefficient d'accumulation. Ce coefficient d'échange a couramment été utilisé pour étudier la mobilité des métaux de l'eau vers les sédiments [13 - 15]. L'objectif de cette étude est de déterminer la teneur en métaux cadmium (Cd), plomb (Pb), mercure (Hg) et arsenic (As) dans l'eau et les sédiments d'une ferme piscicole afin d'évaluer leur mobilité de l'eau ambiante vers les sédiments de fond en utilisant le coefficient d'échange eau-sédiment et de déterminer leur qualité environnementale.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du milieu d'étude

La ferme piscicole est située à Offoumpo dans le département d'Agboville au Sud-Est de la Côte d'Ivoire entre la longitude 4°27'24" W et la latitude 5°57'14" N (**Figure 1**). Il s'agit d'une ferme continentale dans laquelle le grossissement des poissons *Oréochromis niloticus* se fait en étangs. Les étangs sont de forme rectangulaire de 20 m x 30 m avec une profondeur de 1,20 m. La densité de mise en charge de chaque étang est de 50 à 100 alevins de 2 à 4 cm. Ladite ferme est en système semi-intensif avec une alimentation régulière basée sur un aliment complet (l'aliment granulé flottant extrudé Raanan Fish Feed, importé du Ghana), avec sexage des alevins et sans fertilisation de type organique ou minérale. Elle est bordée par des plantations d'hévéas, de bananiers et de palmiers à huile. Elle est également à proximité d'une route à grande circulation.

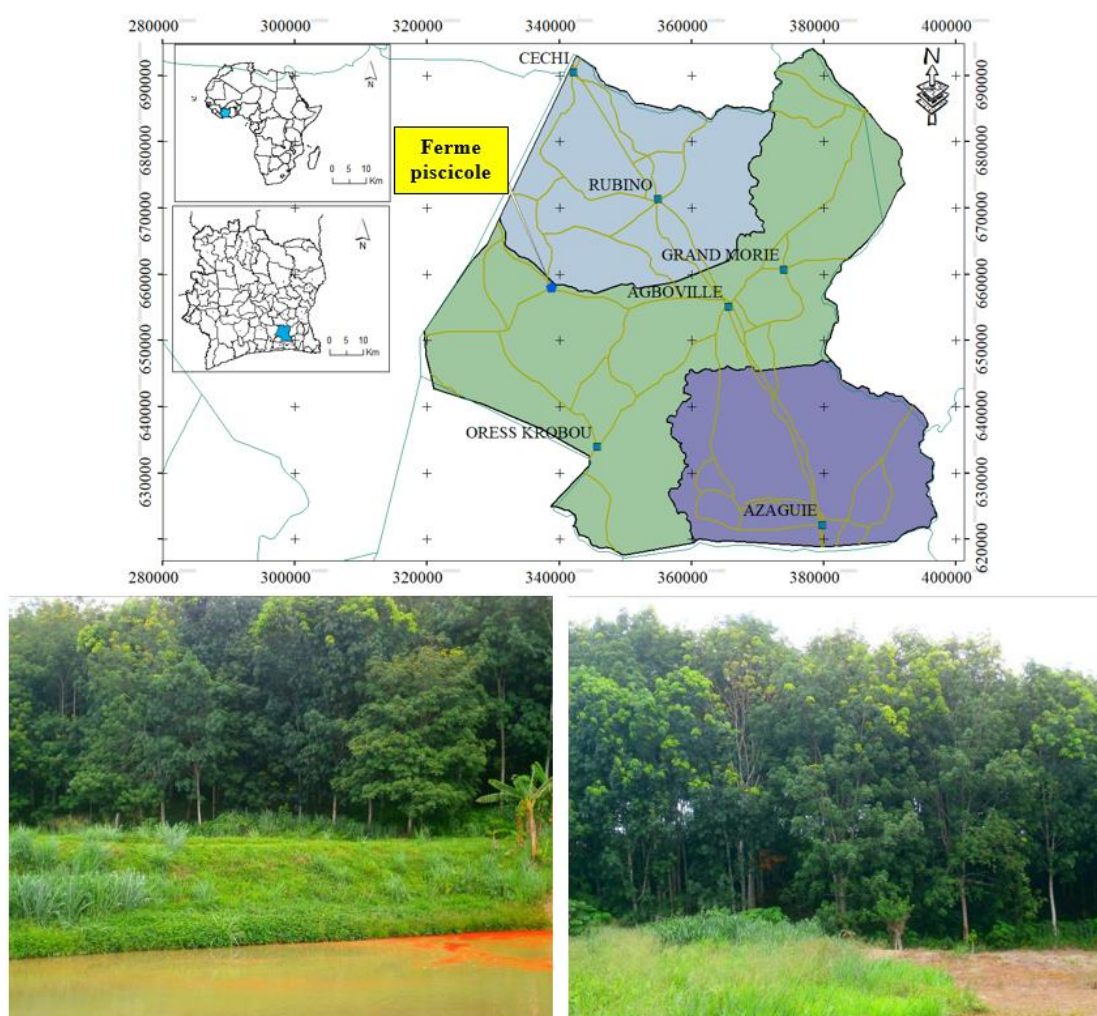


Figure 1 : Ferme piscicole à Offoumpo [16]

2-2. Prélèvement et conservation des échantillons d'eau et de sédiments

Les échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés mensuellement de février à juillet 2017 dans la ferme piscicole d'Offoumpo à Agboville. Le protocole d'analyse utilisé dans ce travail est basé sur la norme NF T90-101 [17, 18].

2-2-1. Échantillons d'eau

L'eau a été prélevée à l'aide de bouteilles en polyéthylène. Chaque bouteille est rincée trois fois avec l'eau de la ferme avant d'être introduite à la profondeur souhaitée. Une fois la bouteille remplie à ras-bord, elle est retirée de l'eau et refermée aussitôt. L'eau a ensuite été filtrée sous vide sur une membrane filtrante et acidifiée à $\text{pH} < 2$ en ajoutant 0,5 mL d'acide chlorhydrique.

2-2-2. Échantillons de sédiments

Le prélèvement a été effectué à l'aide d'une benne Van Veen, d'une surface de 250 cm². La benne est dirigée à l'aide d'une corde, dans l'eau. Lorsqu'elle touche le fond de l'eau, le lancer du messenger déclenche la fermeture des mâchoires et la corde est tirée pour remonter la benne en surface. Les sédiments sont enlevés de la benne, conditionnés dans des emballages en plastiques et conservés dans un congélateur à -20°C [19]. Après séchage à l'étuve à 50 °C pendant 24 heures, les échantillons subissent un pré-tamassage sur un tamis de maille 1 mm afin d'éliminer les débris de roches, les branches, les feuilles et les débris organiques avant d'être tamisé à $< 63 \mu\text{m}$. Afin d'obtenir une masse constante, la fraction fine ($< 63 \mu\text{m}$) est retenue et nouvellement séchée à l'étuve à 60 °C pendant une heure. Elle est conservée individuellement dans des sacs en polyéthylène étiquetés et numérotés de façon indélébile.

2-3. Mesure et analyse des paramètres étudiés

La teneur en métaux lourds dans les échantillons a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique de marque Shimadzu selon [18]. Les dosages du mercure (Hg), du cadmium (Cd), du plomb (Pb) et de l'arsenic (As) dans l'eau et les sédiments collectés ont été effectués par spectrométrie d'absorption atomique aux longueurs d'onde de 283,3 nm ; 228,8 nm ; 253,7 nm et 193,7 nm respectivement.

2-4. Analyse statistique

L'analyse des variances (ANOVA) a été utilisée pour évaluer l'influence des saisons sur les paramètres de pollution mais aussi pour évaluer la différence entre la matrice eau et sédiment. Chaque fois que le résultat du test était significatif, le test de Duncan d'ANOVA a été effectué à $P < 0,05$ soit 5 % pour identifier les groupes qui ont été particulièrement différents les uns des autres. La relation entre les métaux lourds mesurés dans l'eau et les sédiments a été déterminée à l'aide de la matrice de corrélation de Bravais - Pearson. Tous les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1.

2-5. Coefficient d'échange eau-sédiment (CE)

Le coefficient d'échange eau-sédiment encore appelé coefficient d'accumulation permet d'évaluer la capacité des sédiments à fixer ou à accumuler les métaux lourds. Ce coefficient est défini comme le quotient de la concentration en métal dans les sédiments et la concentration du même métal dans l'eau [20] :

$$CE = \frac{C_s}{C_e} \quad (1)$$

C_s étant la concentration du métal dans les sédiments exprimés en mg/kg et C_e la concentration du métal dans l'eau en mg/L. En général, plus le CE est élevé, plus la sorption du métal dans les sédiments est forte [21, 22].

2-6. Évaluation de la qualité environnementale des sédiments

L'accumulation des métaux lourds par les sédiments impacte la qualité de ces derniers. Il convient donc d'évaluer leur qualité environnementale. La qualité environnementale des sédiments peut être évaluée à l'aide des valeurs guides de qualité du sédiment (Sediment Quality Guidelines : SQGs). Ces valeurs servent à interpréter efficacement et à évaluer les effets biologique et écologique de la pollution chimique sur les sédiments [23]. Ces concentrations seuils (TEC et PEC) établis par [24] permettent d'évaluer le niveau de contamination des sédiments [24]. Le TEC (Threshold Effect Concentration) identifie les concentrations des contaminants en dessous desquels les organismes vivants dans les sédiments ne sont pas affectés. Le PEC (Probable Effect Concentration) désigne les concentrations des contaminants au-dessus desquels on observe des effets néfastes sur les organismes vivants dans les sédiments. En outre, si 75 à 100 % des échantillons dépassent le PEC pour l'un des éléments étudiés, alors ce dernier s'avère toxique pour les organismes vivants dans le sédiment [24, 25]. De plus, les concentrations comprises entre le TEC et le PEC peuvent occasionnellement avoir des effets néfastes sur les organismes [8, 24]. Les pourcentages d'échantillons de sédiments compris entre le TEC et le PEC, inférieurs au TEC et supérieurs au PEC ont été calculés à partir des échantillons mensuels collectés durant les six (6) campagnes d'échantillonnage.

3. Résultats

3-1. Variations saisonnières et valeurs moyennes des métaux lourds

Le **Tableau 1** présente les concentrations saisonnières des métaux lourds dans l'eau de la ferme piscicole. De façon générale, tous les métaux lourds dosés dans l'eau de la ferme ont des concentrations inférieures à 1 mg/L aussi bien pendant la saison sèche que pendant la saison des pluies. Les concentrations saisonnières varient entre $0,023 \pm 0,01$ et $0,074 \pm 0,08$ mg/L pour le cadmium ; de $0,009 \pm 0,00$ à $0,014 \pm 0,00$ mg/L pour le mercure ; entre $0,007 \pm 0,00$ et $0,020 \pm 0,03$ mg/L pour le plomb et de $0,043 \pm 0,04$ à $0,044 \pm 0,02$ pour l'arsenic. Les concentrations saisonnières du cadmium et du plomb présentent une différence significative ($p < 0,05$) entre les saisons. Les concentrations sont élevées pendant la saison des pluies pour le cadmium et la saison sèche pour le plomb. Le mercure et l'arsenic ne présentent aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les deux saisons (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Variation saisonnière du cadmium (Cd), du mercure (Hg), du plomb (Pb) et de l'arsenic (As) en mg/L dans l'eau de la ferme de février à juillet 2017

Métaux lourds (mg/L)	Saisons	
	Sèche	Pluies
Cd	$0,023 \pm 0,01^a$	$0,074 \pm 0,08^b$
Hg	$0,014 \pm 0,00$	$0,009 \pm 0,00$
Pb	$0,020 \pm 0,03^b$	$0,007 \pm 0,00^a$
As	$0,044 \pm 0,02$	$0,043 \pm 0,04$

Les valeurs avec les lettres a, b en exposant présentent une différence significative entre les saisons pour un métal donné ($p < 0,05$)

Le **Tableau 2** présente les concentrations saisonnières des métaux lourds dans les sédiments de la ferme piscicole. Les concentrations saisonnières dans les sédiments évoluent comme suit pour les différents métaux lourds : Cd ($0,121 \pm 0,00 - 0,174 \pm 0,01$ mg/kg), Hg ($18,740 \pm 6,62 - 19,570 \pm 11,23$ mg/kg), Pb ($2,087 \pm 0,26 - 8,773 \pm 0,51$ mg/kg) et As ($4,313 \pm 0,56 - 8,990 \pm 2,22$ mg/kg). Le mercure est le métal qui présente des concentrations très élevées par rapport aux autres métaux lourds dosés dans les sédiments. Le test d'ANOVA montre qu'il existe une différence significative ($p < 0,05$) entre la saison sèche et la saison des pluies pour le plomb et l'arsenic. Les concentrations de ces deux métaux lourds sont plus élevées durant la saison sèche. Cependant aucune différence n'a été observée entre les saisons pour le cadmium et le mercure (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Variation saisonnière du cadmium (Cd), du mercure (Hg), du plomb (Pb) et de l'arsenic (As) en mg/kg dans les sédiments de la ferme de février à juillet 2017

Métaux lourds (mg/kg)	Saisons	
	Sèche	Pluies
Cd	$0,174 \pm 0,01$	$0,121 \pm 0,00$
Hg	$19,570 \pm 11,23$	$18,740 \pm 6,62$
Pb	$8,773 \pm 0,51^b$	$2,087 \pm 0,26^a$
As	$8,990 \pm 2,22^b$	$4,313 \pm 0,56^a$

Les valeurs avec les lettres a, b en exposant présentent une différence significative entre les saisons pour un métal donné ($p < 0,05$)

Le **Tableau 3** présente les concentrations moyennes des métaux lourds dans l'eau et les sédiments de la ferme piscicole. Les concentrations moyennes des métaux lourds dans l'eau sont classées dans l'ordre décroissant suivant : Cd > As > Pb > Hg tandis que celles dans les sédiments sont classées comme suit : Hg > As > Pb > Cd. L'analyse statistique réalisée montre une différence significative ($p < 0,05$) entre les valeurs des métaux lourds dans l'eau et celles notées dans les sédiments. Les concentrations de tous les métaux lourds dosés dans les sédiments de la ferme sont très élevées par rapport aux valeurs obtenues dans l'eau (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Valeurs moyennes du Cadmium (Cd), du Mercure (Hg), du Plomb (Pb) et de l'Arsenic (As) des eaux et des sédiments collectés dans la ferme piscicole

Métaux lourds	Matrices	
	Eau (mg/L)	Sédiment (mg/kg)
Cd	$0,049 \pm 0,06^a$	$0,147 \pm 0,03^b$
Hg	$0,011 \pm 0,00^a$	$19,155 \pm 8,26^b$
Pb	$0,013 \pm 0,02^a$	$5,430 \pm 3,68^b$
As	$0,044 \pm 0,02^a$	$6,652 \pm 2,94^b$

Les valeurs avec les lettres a, b en exposant présentent une différence significative entre l'eau et les sédiments ($p < 0,05$).

3-2. Coefficient d'échange eau-sédiments (CE)

La mobilité des métaux lourds (Cd, Hg, Pb et As) dans l'eau vers les sédiments est caractérisée par le coefficient d'échange eau-sédiment. Le **Tableau 4** ci-dessous présente les coefficients d'échange saisonniers et moyens des différents métaux étudiés. Les valeurs saisonnières des coefficients d'échange eau-sédiment oscillent entre 1,64 et 2082,22. Le cadmium présente les coefficients d'échange saisonniers (1,64 - 7,57) et moyen (3) les plus bas. Le mercure a les coefficients d'échange les plus élevés avec des valeurs saisonnières allant de 1397,86 à 2082,22 et une moyenne de 1741,36. Le plomb a un coefficient d'échange compris entre 298,14 et 438,65 avec une moyenne de 417,69. Les coefficients d'échange de l'arsenic sont compris entre 100,30 et 204,32. Le coefficient d'échange moyen de l'arsenic est 151,18. Les coefficients d'échange eau-sédiment des métaux lourds sont classés dans l'ordre décroissant suivant : CE (Hg) > CE (As) > CE (Pb) > CE (Cd) suivant leur ordre de concentration dans les sédiments.

Tableau 4 : Coefficient d'échange eau - sédiment saisonniers et moyens

		Métaux lourds			
		Cd	Hg	Pb	As
	Saison sèche	7,57	1397,86	438,65	204,32
CE (kg/L)	Saison des pluies	1,64	2082,22	298,14	100,30
	Valeur moyenne	3	1741,36	417,69	151,18

3-3. Corrélation linéaire de Bravais - Pearson

La matrice de corrélation entre les métaux lourds de l'eau et des sédiments collectés dans la ferme piscicole est présentée dans le **Tableau 5**. L'analyse de la matrice montre deux groupes de variables corrélés entre eux. Le premier groupe est constitué d'un ensemble de variable dont la corrélation est très fortement significative : le mercure dans l'eau avec le cadmium ($r = 0,87$), le plomb ($r = 0,79$) et l'arsenic ($r = 0,87$) dans les sédiments. Egalement, le plomb dans l'eau est fortement corrélé avec le mercure ($r = 0,78$) dans les sédiments. La matrice de corrélation montre aussi une forte corrélation positive entre le plomb et l'arsenic ($r = 0,89$) dans les sédiments et entre le cadmium et les métaux arsenic ($r = 0,90$) et plomb ($r = 0,98$) dans les sédiments. Le second groupe est constitué d'un ensemble de variables dont la corrélation est faiblement significative. Il s'agit du cadmium dans l'eau avec le cadmium dans les sédiments ($r = - 0,51$).

Tableau 5 : Tableau de coefficient de corrélation linéaire r de Bravais - Pearson entre les métaux lourds des eaux et des sédiments de la ferme

	Cd(e)	Hg(e)	Pb(e)	As(e)	Cd(s)	Hg(s)	Pb(s)	As(s)
Cd(e)	1							
Hg(e)	-0,31	1						
Pb(e)	-0,29	-0,06	1					
As(e)	0,34	-0,03	0,29	1				
Cd(s)	-0,51	0,87	0,32	-0,13	1			
Hg(s)	0,37	-0,31	0,78	0,48	-0,06	1		
Pb(s)	-0,49	0,79	0,39	-0,05	0,98	0,03	1	
As(s)	-0,35	0,87	-0,06	-0,24	0,90	-0,31	0,89	1

3-4. Évaluation de la qualité environnementale des sédiments

La comparaison des concentrations des métaux lourds dans les sédiments par rapport aux TEC et PEC est présentée dans le **Tableau 6**. Les teneurs moyennes en métaux lourds des sédiments de la ferme sont inférieures au TEC et au PEC pour le cadmium, le plomb et l'arsenic. Le mercure a des concentrations supérieures au TEC et au PEC. Les concentrations d'arsenic, de cadmium et de plomb sont inférieures au TEC dans 66,67 % ; 100 % et 100 % des échantillons, respectivement. L'arsenic a des concentrations comprises entre le TEC et le PEC dans 33,33 % des échantillons. Les concentrations du mercure dépassent le PEC dans tous les échantillons (100 %).

Tableau 6 : Comparaison des concentrations métalliques dans les sédiments par rapport aux TEC et PEC

	Métaux lourds			
	Cd	Hg	Pb	As
TEC (mg/kg)	0,99	0,18	35,60	9,79
PEC (mg/kg)	4,98	1,06	128	33,00
Valeurs moyennes (mg/kg)	0,147 ± 0,03	19,155 ± 8,26	5,430 ± 3,68	6,652 ± 2,94
% d'échantillons < TEC	100	0	100	66,67
TEC - PEC	0	0	0	33,33
% d'échantillons > PEC	0	100	0	0

4. Discussion

Les milieux aquatiques constituent l'un des plus grands réservoirs de polluants environnementaux tels que les métaux lourds [26]. Notre étude révèle qu'il y a une différence significative entre les saisons concernant les concentrations du cadmium et du plomb dans l'eau. Cette différence saisonnière peut être attribuée au fait que l'accumulation des métaux lourds est fonction des propriétés physico-chimiques de l'eau, notamment le pH, la température, la salinité, la conductivité et l'oxygène dissous [27, 28]. En effet, les travaux de [29, 30] ont montré qu'une baisse du pH augmente significativement la mobilité des métaux cadmium et plomb. Par ailleurs, les résultats de cette étude montrent que le cadmium et l'arsenic ont des teneurs plus élevées dans l'eau par rapport au mercure et au plomb. Ces fortes concentrations de cadmium et d'arsenic dans les eaux de la ferme seraient dues aux activités agricoles à proximité de la ferme ; avec l'utilisation de produits agrochimiques tels que les herbicides [31] et les pesticides [32]. Ces concentrations élevées de métaux dans l'eau de la ferme piscicole pourrait affecter la survie et la qualité des poissons. En effet, les poissons qui vivent dans les eaux polluées peuvent accumuler des métaux toxiques à des concentrations supérieures à celles rencontrées dans l'eau [3]. Cette étude a indiqué que les sédiments de la ferme contiennent des taux très significativement élevés de métaux lourds (Cd, Pb, Hg, As) en comparaison avec leur concentration dans l'eau. Cela indique que les sédiments absorbent plus les métaux lourds [33]. En effet, les sédiments servent de réservoir à tous les contaminants du milieu aquatique [34, 35] notamment les métaux lourds [14]. Ces grandes quantités de métaux lourds cumulées dans les sédiments représentent un danger pour l'environnement aquatique [20] tels que la mort des organismes benthiques réduisant la disponibilité de nourriture pour les poissons, l'inhibition de la croissance des poissons et la bioaccumulation ainsi que la bioamplification des métaux lourds chez les poissons [36]. En outre, des études ont révélé que les tilapias d'élevage accumulent plus les métaux lourds dans leurs tissus que

les autres poissons [37]. Cela montre le danger que représente la présence de ces métaux pour les poissons de la ferme et pour les consommateurs. En effet, bien que le poisson soit largement consommé par l'homme pour ses propriétés nutritionnelles, l'accumulation de métaux lourds dans leurs tissus peut présenter de graves risques pour la santé humaine [38]. Des variations saisonnières marquées ont été observées pour le Pb et l'As dans les sédiments. De manière générale, les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant la saison sèche. Ces taux élevés de métaux lourds en saison sèche seraient probablement dû au taux élevé de matières en suspension contaminées pendant cette saison. En effet, les matières en suspension sont un vecteur essentiel de transport des métaux lourds [39]. Les faibles concentrations enregistrées durant la saison pluvieuse seraient dues aux phénomènes de dilution qui s'opèrent par des apports de sédiments moins ou non contaminés [40]. La teneur en mercure reste la plus élevée dans les sédiments. En effet, contrairement aux autres métaux, le mercure a tendance à se concentrer et à sédimenter [41]. Le coefficient d'échange eau-sédiment a été utilisé pour évaluer la mobilité des métaux lourds de l'eau vers les sédiments de la ferme ainsi que leur accumulation dans ces sédiments. Ce coefficient est supérieur à 1 ($CE > 1$) pour tous les métaux traduisant ainsi leur mobilité de l'eau vers les sédiments de la ferme [15].

De plus les valeurs élevées des coefficients d'échange enregistrées pour l'ensemble des métaux étudiés (sauf pour le cadmium) indiquent une forte accumulation des métaux contenus dans l'eau ambiante par les sédiments de la ferme. Cela traduit également la très grande mobilité de l'arsenic, du plomb et du mercure de l'eau vers les sédiments [13, 15]. En outre, les valeurs élevées du coefficient d'accumulation confirment que les sédiments de la ferme sont un réservoir de métaux lourds pour la colonne d'eau [14]. En effet, les sédiments sont le réceptacle principal des métaux lourds dans l'environnement aquatique [42] et ils jouent un rôle important dans l'enrichissement et la remobilisation de ces derniers dans les systèmes aquatiques [2, 43]. Toutefois, cette forte capacité de fixation des métaux lourds entraîne une augmentation des niveaux des métaux dans les sédiments [44]. Cela pourrait entraîner la pollution des sédiments et les rendre toxique pour les organismes vivants dans les sédiments. Les faibles valeurs de coefficients d'échange eau-sédiments du cadmium seraient dues aux propriétés physico-chimiques du milieu. En effet, dans les milieux aquatiques, la mobilité et la biodisponibilité du cadmium s'accroissent lorsque le pH, la dureté, la concentration des matières en suspension et la salinité sont faibles [45]. L'analyse de la matrice de corrélation de Bravais - Pearson entre les métaux des compartiments eau et sédiments révèle une corrélation significativement négative entre le cadmium dans l'eau et le cadmium dans les sédiments ($r = -0,51$).

Par conséquent la teneur en cadmium dans l'eau diminue avec son augmentation dans les sédiments. Cependant, une forte corrélation positive est notée entre le cadmium, le plomb et l'arsenic des sédiments avec le mercure dans l'eau ($r = 0,87, 0,79$ et $0,87$ respectivement). De plus, on note une corrélation positive entre le plomb dans l'eau et le mercure dans les sédiments ($r = 0,78$). En effet, la teneur en métaux lourds des eaux dépend de celle des sédiments [46]. En outre, ces résultats montrent l'influence des compartiments eau et sédiments l'un sur l'autre [13]. Les coefficients de corrélation montrent l'existence d'une relation entre les métaux lourds étudiés. En effet, le cadmium présent dans les sédiments présente une forte corrélation positive avec le plomb ($r = 0,98$) et l'arsenic ($r = 0,90$). Le plomb présente également une corrélation positive et significative avec l'arsenic ($r = 0,89$) dans les sédiments. Ces fortes corrélations pourraient traduire une distribution homogène de ces différents métaux [13, 47], une source commune [8], un comportement identique vis-à-vis des différents processus physico-chimiques ou encore l'influence de l'un sur l'autre [47]. Les concentrations métalliques pour chaque échantillon ont été comparées aux valeurs des concentrations TEC et PEC. Pour le PEC, aucun effet négatif n'est à prévoir pour le Cd, le Pb et l'As car aucune valeur ne dépasse le PEC. Cependant, les résultats obtenus indiquent que le mercure contenu dans les sédiments peut avoir des effets

néfastes. Les sédiments de la ferme sont contaminés par le mercure. Ils sont donc potentiellement toxiques pour les poissons qui y vivent. En effet, le mercure est connu pour sa très forte bioconcentration, sa toxicité [48] et est classé comme le métal le plus nocif pour les animaux aquatiques [49]. L'étude a révélé qu'environ 33 % des échantillons de sédiment ont des teneurs en arsenic comprises entre le TEC et le PEC. Ce résultat indique que les concentrations de l'arsenic sont susceptibles d'entraîner des effets néfastes qui devraient se produire fréquemment sur les poissons. En effet, selon [24] les concentrations comprises entre le TEC et le PEC peuvent occasionnellement avoir des effets néfastes sur les organismes.

5. Conclusion

Le but de cette étude était d'évaluer la capacité de fixation des métaux lourds par les sédiments d'une ferme piscicole en étang et de déterminer leur qualité environnementale. L'analyse des eaux et des sédiments de la ferme montre la présence d'éléments traces métalliques (Pb, Hg, Cd et As) dans ces deux compartiments. Le coefficient d'échange eau - sédiments indique que le mercure est le métal le plus absorbé par les sédiments. Les sédiments de la ferme sont contaminés par les métaux lourds, principalement le mercure. La matrice de corrélation de Bravais - Pearson met en relief l'influence de la contamination métallique de l'eau par les sédiments. Les concentrations de mercure dans les échantillons de sédiments sont susceptibles d'entraîner des effets nocifs sur les organismes vivant dans les sédiments tandis que l'arsenic peut occasionnellement avoir des effets néfastes sur les organismes. Ces résultats indiquent les risques élevés de contamination du mercure et de l'arsenic sur les poissons de la ferme piscicole.

Remerciements

Nous remercions l'Académie des sciences, des arts, des cultures d'Afrique et des Diasporas Africaines (ASCAD) pour le financement de cette étude. Nous remercions également le propriétaire de la ferme et le personnel technique pour leur assistance au cours des travaux de recherche.

Références

- [1] - Z. AYDOGAN and U. INCEKARA, Element Pollution, Their Meaning in Literature and Using Organisms to Monitor This Pollution, *LAP LAMBERT Academic Publishing, Turquie*, (2017) 53
- [2] - K. A. RODRIGUE, B. YAO, A. TROKOUREY and A. KOPOIN, Assessment of Heavy Metals Contamination in Sediments of the Vridi Canal (Côte d'Ivoire), *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4 (10) (2016) 65 - 73
- [3] - M. S. ZAKI, A. ZAKARIA, E. I. ABD EL-MONEEN and A. I. NOOR ELDEEN, Effect of cadmium toxicity on Vertebrates, *Electron. Physician*, 8 (2) (2016) 1964 - 1965
- [4] - C. BINEY, A. T. AMUZU, D. CALAMARI, N. KABA, I. L. MBAME, H. NAEVE, P. B. O. OCHUMBA, O. OSIBANJO, V. RADEGONDE and M. A. H. SAAD, Review of Heavy Metals in the African Aquatic Environment, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28 (2) (1994) 134 - 159
- [5] - B.-E. BELABED, A. MEDDOUR, B. SAMRAOUI and H. CHENCHOUNI, Modeling seasonal and spatial contamination of surface waters and upper sediments with trace metal elements across industrialized urban areas of the Seybouse watershed in North Africa, *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 (6) (2017) 19

- [6] - M. M. AL-HEJUJE, N. A. HUSSAIN, and H. T. AL-SAAD, Applied Heavy Metals Pollution Index (HPI) as a Water Pollution Indicator of Shatt Al-Arab River, Basrah-Iraq, *International Journal of Marine Science*, 7 (35) (2017) 353 - 360
- [7] - A. MANCEAU, M. A. MARCUS and N. TAMURA, Quantitative spéciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 49 (1) (2002) 341 - 428
- [8] - A. R. KOUAKOU, Evaluation de la spéciation, de la biodisponibilité et de la toxicité potentielle des métaux cadmium, cuivre, plomb et zinc dans les sédiments du canal de Vridi (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, (2017) 180
- [9] - S. H. JUNEJO, J. A. BAIG, T. G. KAZI and H. I. AFRIDI, Cadmium and lead hazardous impact assessment of pond fish species. *Biological Trace Element Research*, (2019)
- [10] - G. DARKO, D. AZANU, K. N. LOGO, Accumulation of toxic metals in fish raised from sewage-fed aquaculture and estimated health risks associated with their consumption, *Cogent Environmental Science*, 2 (1) (2016) 1 - 12
- [11] - Y. LI, P. BAI, Y. YAN, W. YAN, W. SHI and R. XU, Removal of Zn²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ from aqueous solution by synthetic clinoptilolite. *Microporus and Mesoporus Materials*, 273 (2019) 203 - 221
- [12] - A. Y. KARIKARI, R. ASMAH, W. W. ANKU, S. AMISAH, N. W. AGBO, T. C. TELFER and L. G. ROSS. (2020). Heavy metal concentrations and sediment quality of a cage farm on Lake Volta, Ghana, *Aquaculture Research*, 00 1 - 11
- [13] - S. COULIBALY, Bioaccumulation des métaux lourds et effets biologiques induits chez *Sarotherodon melanotheron rüppell*, 1852 pêché dans la Baie de Bietri en Lagune Ebrié (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2013) 214
- [14] - S. COULIBALY, M. COULIBALY and B. C. ATSE, Contamination à l'arsenic des eaux et des sédiments des zones continentale et maritime de la partie ouest de la Lagune Ebrié (Côte d'Ivoire), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25 (2) (2019) 577 - 585
- [15] - N. M. KOUAMENAN, S. COULIBALY, B. C. ATSE and B. G. GOORE, Seasonal and spatial variations of heavy metals in water and sediments from mainland and maritime areas of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire, Western Africa), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13 (4) (2019) 2374 - 2387
- [16] - A. SANOU, Détermination du niveau de contamination métallique des eaux et des sédiments de trois fermes piscicoles en Côte d'Ivoire, Mémoire de Master, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d'Ivoire), (2018) 100
- [17] - AFNOR, Qualité de l'eau, recueil des normes françaises, Editions AFNOR, Paris, (1997) 46
- [18] - EPA, SW-846 test methods for evaluating solid waste, physical-chemical methods, method 6010 plasma-atomic, (2007) 34
- [19] - UNEP, Manuel d'échantillonnage et d'analyse des sédiments, UNEP (DEPI)/MED WG.321/Inf., (2007) 26
- [20] - J. R. DOJLIDO and B. TABORYSKA, Exchange of heavy metals between sediment and water in the wloclawek reservoir on the vistula river Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation (*Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991*) *IAHS Publ.*, 203 (1991) 315 - 320
- [21] - W. SALOMONS and U. FORSTNER, Trace metal analysis on polluted sediments, Part II: Evaluation of environmental impact, *Environmental Technology Letters*, 1 (1980) 506 - 517
- [22] - M. S. MASOUD, A. E. S. A. ELEWA, A. E. ALI and E. A. MOHAMED, Distribution of some metal concentrations in water and sediments of lake Edku, Egypt, *Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia*, 24 (1) (2005) 21 - 34

- [23] - E. R. LONG and D. D. MACDONALD, Recommended Uses of Empirically Derived, Sediment Quality Guidelines for Marine and Estuarine Ecosystems. Human and Ecological Risk Assessment, *An International Journal*, 4 (5) (1998) 1019 - 1039
- [24] - D. D. MACDONALD, C. G. INGERSOLL and T. A. BERGER, Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Fresh Water Ecosystems, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39 (2000) 20 - 31
- [25] - A. S. COULIBALY, S. MONDE, V. A. WOGNIN and K. AKA, Analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans les baies estuariennes d'Abidjan en Côte d'Ivoire, *Afrique SCIENCE*, 5 (3) (2009) 77 - 96
- [26] - A. H. HAMPOH, A. G. S. EHOUMAN, K. BROU, K. S. TRAORE, M. KONE and A. DEMBELE, Niveau de contamination en polychlorobiphényles (PCB) dans les poissons frais pêchés dans la lagune de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire), *European Scientific Journal*, 10 (27) (2014) 116 - 131
- [27] - M. COULIBALY, Développement de méthodes électrochimiques pour la détection de trace de métaux lourds : application à l'analyse du cuivre, du sélénium et du manganèse dissous dans des milieux complexes, Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2008) 325
- [28] - B. BASYIGIT and S. TEKIN-ÖZAN, Concentrations of Some Heavy Metals in Water, Sediment, and Tissues of Pikeperch (*Sander lucioperca*) from Karataş Lake Related to Physico-Chemical Parameters, Fish Size, and Seasons, *Polish Journal of Environmental Studies*, 22 (3) (2013) 633 - 644
- [29] - R. CHARLATCHKA and P. CAMBIER, Influence of reducing conditions on solubility of trace metals in contaminated soils, *Water, Air, and Soil Pollution*, 118 (144) (2000) 143 - 167
- [30] - P. DUCHAUFOR, Introduction à la science du sol, *Sol, végétation et environnement*, 6e édition, Dunod, Paris, (2001) 331
- [31] - D. S. LILIAN, E. F. WILLIAM, T. J. GABRIELA, A. P. SCHEILA, F. A. J. GABRIEL, L. P. M. JOSE and L. M. MAURICIO, Trace elements and microbiological parameters in farmed Nile tilapia with emphasis on muscle, water, sediment and fee, *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 54 (4) (2019) 237 - 246
- [32] - B. KUMARI, V. KUMA, K. A. SINHA, J. AHSAN, A. K. GHOSH, H. WANG and G. DEBOECK, Toxicology of arsenic in fish and aquatic systems, *Environmental Chemistry Letters*, 15 (1) (2016) 43 - 64
- [33] - K. R. KLAKE, K. V. NARTEY, K. L. DOAMEKPOR and A. K. EDOR, Correlation between Heavy Metals in Fish and Sediment in Sakumo and Kpeshie Lagoons, Ghana, *Journal of Environmental Protection*, 3 (2012) 1070 - 1077
- [34] - F. E. EKPO, N. N. AGU and U. I. UDOAKPAN Influence of heavy metals concentration in three common fish sediment and water collected within quarry environment Akamkpa L.G. area, cross river state Nigeria, *European Journal of Toxicological Sciences*, (2013) 1 - 11
- [35] - A. MAURYA, T. NEGI and R. K. NEGI, Seasonal assessment of heavy metal pollution in water and sediment of fish pond at Bhagwanpur, Roorkee (U.K.), India. *Asian Journal of Animal Sciences*, 12 (2018) 16 - 22
- [36] - J. KHAYATZADEH. and E. ABBASI, The Effects of Heavy Metals on Aquatic Animals. *The 1st International Applied Geological Congress*, Department of Geology, Islamic Azad University - Mashad Branch, Iran, 26-28 April (2010) 688 - 694
- [37] - D. JIANG, Z. HU, F. LIU, R. ZHANG, B. DUO, J. FU, Y. CUI and M. LI, Heavy metals levels in fish from aquaculture farms and risk assessment in Lhasa, Tibetan Autonomous Region of China, *Ecotoxicology*, 23 (4) (2014) 577 - 583
- [38] - L. VILIZZI and A. S. TARKAN, Bioaccumulation of metals in common carp (*Cyprinus carpio* L.) from water bodies of Anatolia (Turkey): a review with implications for fisheries and human food consumption. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (4) (2016) 1 - 24

- [39] - K. AFFIAN, B. KADIO, E. V. DJAGOUA, Z. B. DIGBEHI, S. MONDE, A. V. WOGNIN, K. D. ADONIS and A. MOBIO, Flux de la matière en suspension du fleuve Comoé dans la zone littorale ivoirienne, *Sciences et Médecine, Revue CAMES – Série A*, 06 (2008) 88 - 93
- [40] - K. N. KEUMEAN, S. B. BAMBA, G. SORO, N. SORO, B. METONGA and J. BIEMI, Concentration en métaux lourds des sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé à Grand-Bassam (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *Journal of Applied Biosciences*, 61 (2013) 4530 - 4539
- [41] - H. MARLIES, Caractérisation de la contamination des berges des rivières Saint-François et Massa Wippi par des hydrocarbures pétroliers et métaux lourds, Sud du Québec, Canada, Mémoire de Maitrise, Université du Québec, (2009) 69
- [42] - A. R. KOUAKOU, L. B. K. N'GUESSAN, B. K. YAO, A. TROKOUREY and K. ADOUBY, Heavy metals in sediments and their transfer to edible mollusc, *Journal of Applied Sciences*, 16 (11) (2016) 534 - 541
- [43] - Z. YAO and P. GAO, Heavy Metal Research in Lacustrine Sediment: A Review, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 25 (2007) 444 - 454
- [44] - M. MOHAMMAD and M. MUHAMMAD, Accumulation of Lead (Pb) in Blood Clams. *Anadaragranosa L.* Inhabiting Densely Industrial Area in Sidoarjo. East Java. Indonesia, *3rd International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2015) Singapore*, (2015) 14 - 17
- [45] - F. TAGHEZOUT, Impact environnemental des rejets d'eau le long du littoral occidental algérien, Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie, (2015) 170
- [46] - O-S. KAMILLOU, D. S. HODABALO, G. KISSAO, M. A. KOMLAN and J. B. ESSO, Évaluation et risques sanitaires de la bioaccumulation de métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [Online], 14 (2) (2014) Disponible sur : <http://journals.openedition.org/vertigo/15093>, DOI : 10.4000/vertigo.15093 (Janvier 2020)
- [47] - W. CHOUTI, D. MAMA and F. ALAPINI, Etude des variations spatio-temporelles de la pollution des eaux de la lagune de Porto-Novo (sud Benin), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (4) (2010) 1017 - 1029
- [48] - A. CHAHID, Quantification des éléments traces métalliques (cadmium, plomb et mercure total) de certains produits de la pêche débarqués dans la zone Essaouira - Dakhla : Evaluation des risques sanitaires, Thèse de Doctorat, Université Ibn Zohr - Agadir, Maroc, (2016) 191
- [49] - A. FAHSSI, H. S. A. YAHYA, R. TOUZANI and A. CHAFI, Evaluation spatiotemporelle de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya, *Journal of Materials and Environmental Science*, 7 (7) (2016) 2404 - 2423