



HAL
open science

Etat de la contamination en éléments traces des sédiments du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto (Togo)

Koudjo Adje, Kamilou Ouro-Sama, Hodabalo Dheoulaba Solitoke, Gnon Tanouayi, Sadikou Agbere, Tchaa Ezzo-Essinam Badassan, Housseni Ahoudi, Kissao Gnandi

► To cite this version:

Koudjo Adje, Kamilou Ouro-Sama, Hodabalo Dheoulaba Solitoke, Gnon Tanouayi, Sadikou Agbere, et al.. Etat de la contamination en éléments traces des sédiments du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto (Togo). Environnement, Ingénierie & Développement, A paraître, 85, pp.12-25. 10.46298/eid.2021.7304 . hal-03182947v4

HAL Id: hal-03182947

<https://hal.science/hal-03182947v4>

Submitted on 18 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETAT DE LA CONTAMINATION EN ÉLÉMENTS TRACES DES SÉDIMENTS DU LAC DU BARRAGE HYDROÉLECTRIQUE DE NANGBÉTO (TOGO)

Assessment of trace elements contamination of Nangbeto Lake sediments (Togo)

ADJE Koudjo^{1,2*}, OURO-SAMA Kamilou¹, SOLITOKÉ Hodabalo Dheoulaba¹, TANOUAYI Gnon¹, AGBERE Sadikou¹, BADASSAN Tchaa Ezzo-Essinam¹, AHOUDI Housseni¹, GNANDI Kissao¹

¹ Université de Lomé, Faculté Des Sciences, Laboratoire de Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets, Département de Géologie et Environnement, BP : 1515, Lomé-Togo.

² Ecole Normale Supérieure d'Atakpamé, Département Sciences de la Vie et de la Terre, 200 BP 80, Atakpamé-Togo

*Auteurs correspondants : OURO-SAMA K., ouro_kamilou@yahoo.fr ; ADJE K., adjekoudjo@gmail.com

RESUME

Le Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto qui constitue un déversoir des résidus des intrants agricoles, des effluents urbains et industriels présent dans le bassin du Mono est exposé à toutes formes de pollution. Le but de ce travail est de quantifier les teneurs de sept (7) éléments traces dans les sédiments dudit Lac afin d'évaluer le risque écologique encouru par la biocénose aquatique et partant par l'homme.

Quarante-deux (42) échantillons de sédiments (21 par saison) ont été échantillonnés dans différentes zones du Lac. Les éléments Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, As et Hg ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique de flamme dans ces échantillons minéralisés. Les résultats montrent des teneurs moyennes variant de 0,04mg/kg pour le Hg à 12,15mg/kg pour le Cu en saison pluvieuse et de 0,03 mg/kg pour le Hg à et l'As à 9,14 mg/kg pour le Cu en saison sèche. Toutes ces valeurs sont inférieures aux normes canadiennes de qualité des sédiments. Les plus forts indices de géoaccumulation (Igeo) moyens sont obtenus pour le Hg avec des valeurs inférieures à 2. Les valeurs moyennes de facteur de contamination (FC) sont inférieures à 1. Les indices moyens de contamination (Im) sont inférieurs à 2, seuil d'un début de contamination polymétallique. Le risque écologique (Ri) par rapport à la contamination des sédiments du Lac en éléments traces est faible en toute saison (Ri < 40) et cela conduit à un faible risque de contamination de la biocénose. La présente étude ne porte toutefois que sur les éléments traces métalliques. Elle ne tient compte ni des autres polluants, ni des effets "cocktail" potentiels entre eux. Un travail complémentaire devra donc être poursuivi dans ce sens pour consolider le faible risque enregistré pour la biocénose.

MOTS-CLES : Eléments traces, Lac, Nangbéto, Sédiments, Togo.

ABSTRACT

The Nangbéto hydroelectric dam lake, which is a spillway for agricultural input residues, urban and industrial effluents present in the Mono basin, is exposed to all forms of pollution. The aim of this work is to estimate the content of seven trace elements present in the sediments of the aforementioned lake in order to assess the ecological risk incurred by the aquatic biocenosis and therefore by man.

Forty-two sediment samples (21 per season) are realized in different areas of the Lake. Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, As and Hg are measured out in the sediments by the flame atomic absorption spectrophotometer in these pre-mineralized samples. The results show average contents varying from the lowest level 0.04 mg / kg for Hg to the highest 12.15 mg / kg for Cu in the rainy season and from 0.03 mg / kg for Hg and for As to 9.14 mg/kg for Cu in the dry season. All of these values are below Canadian sediment quality standards. The strongest average geoaccumulation indices (Igeo) are obtained for Hg with values less than 2. The mean values of the contamination factor (FC) are less than 1. The mean indices of contamination (Im) are less than 2, threshold of an onset of polymetallic contamination. The ecological risk (Ri) in relation to the contamination of the sediments of the Lake with trace elements is low in any season (Ri < 40) and this implies a low risk of contamination of the biocenosis. However, the present study only deals with metallic trace elements. It does not take into account other pollutants, nor the potential "cocktail" effects between them. Additional work should therefore be continued in this direction to consolidate the low risk recorded for the biocenosis

KEYWORDS: Trace elements, Lake, Nangbéto, Sediments, Togo.

1. INTRODUCTION

Né de la construction du barrage, le Lac de Nangbéto (Togo) a un réservoir qui couvre une superficie de 180 Km² et hérite de toutes sortes de polluants du fleuve Mono qui l'alimente. Le fleuve Mono, subit des pollutions dont les origines sont diverses : la pollution industrielle (cas du rejet des effluents de la sucrerie d'Anié dans la rivière Anié, affluent du fleuve Mono) ; la pollution agricole par les pesticides et les engrais chimiques (cas des pesticides et engrais utilisés à des fins agricoles dans le bassin du Mono) et la pollution d'origine tellurique (érosion des sols et des roches du bassin) (Dahri et al., 2018). Dans les systèmes aquatiques, l'étude des sédiments tire leur intérêt du fait qu'ils sont indicateurs de contamination du milieu, à cause de leur capacité de fixation des polluants, surtout les éléments traces. En ce sens, ils constituent un réservoir et une source potentielle de contamination pour les eaux. Les sédiments, compartiment d'accumulation pour les polluants métalliques, peuvent également se comporter comme des sources endogènes de contamination, par remise en suspension (crues, bioturbation) ou par évolution de la spéciation des éléments traces, laquelle va également jouer sur leur biodisponibilité (Benguedda-rahah, 2012). Les sédiments sont alors, singulièrement intéressants lorsqu'il s'avère indispensable de prendre des mesures adéquates pour une gestion durable d'un écosystème aquatique (Djeddi et al., 2018). Les éléments traces sont considérés comme des polluants dangereux pour l'environnement aquatique, à cause de leur rémanence et leur tendance à être bioaccumulés dans les organismes aquatiques (Aydin-Onen et al., 2015). Le Lac de Nangbéto via le fleuve Mono étant exposé et étant donné que les sédiments jouent un rôle de réservoir et source endogène de pollution, et vu la dangerosité des éléments traces, la présente étude a pour objectif de contribuer à une gestion durable du Lac de Nangbéto en quantifiant les teneurs de quelques éléments traces dans ses sédiments.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Zone d'étude

Le Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto (Figure 1), est situé à une quarantaine de kilomètres d'Atakpamé et à 160 km de Lomé. Il présente un

réservoir qui occupe une superficie de 180 km². Construit sur le fleuve Mono à 180 km de l'embouchure, le Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto est alimenté par le bassin versant du Mono. Le bassin du Mono, est situé entre les latitudes de 9° 20' Nord à la source et 6° 17' Nord à l'embouchure dans le Golfe du Bénin ; puis entre 0° 41' et 1° 45' de longitude Est. Le fleuve Mono prend sa source dans le massif de Tchaoudjo, dans la région centrale du Togo près de la frontière béninoise dans les monts Alédjo, et s'étire sur environ 528 km de long. Ses principaux affluents sont l'Ogou, l'Atalé et le Noukpoué, sur la rive gauche et sur la rive droite, on retrouve l'Anié, le Yoro, l'Amou et le Chra (UNESCO, 2008).

2.2. Echantillonnage, traitement et analyse des sédiments

Les sédiments de 0 à 5 cm de profondeur, ont été raclés par les plongeurs au fond du Lac à l'aide de récipients en polyéthylène. Vingt et un (21) échantillons de sédiments, sont prélevés en saison pluvieuse (27 juillet 2018) et en saison sèche le (22 mars 2019) aux mêmes sites, mis dans des sachets en polyéthylène, étiquetés, placés dans une glacière puis transportés au laboratoire (Djeddi et al, 2018 ; NF EN ISO 5667-15, 2009). Ces sédiments ont été séchés à l'air libre au laboratoire à l'abri de la poussière, broyés et tamisés au travers à 63 µm (Toure et al. 2018). Ensuite, 2g de sédiment sont minéralisés dans des tubes en téflon à chaud à 120°C par attaque de diacide : l'acide nitrique (HNO₃, 65%) et l'acide chlorhydrique (HCl, 36%) dans les proportions de 1V/3V (AFNOR NF X31-151, 1993) sur une plaque chauffante. Après refroidissement à l'air ambiant, la solution minéralisée est récupérée avec de l'eau distillée, puis filtré dans un tube en polypropylène selon les normes NF ISO 11466 de Juin 1995 et NF X 31-147 de juillet 1996. Les éléments traces (Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, As et Hg), sont dosés dans la solution minéralisée à l'aide d'un Spectromètre d'Absorption Atomique (SAA) à flamme, de marque Thermo Electron Corporation S, séries. Ce spectromètre est couplé à un générateur d'hydrures et de vapeurs froides (Thermo Scientific VP100) pour le dosage de l'As avec flamme et pour le Hg sans flamme. La validité des méthodes analytiques est vérifiée par un contrôle interne via des blancs de procédure et des solutions étalons.

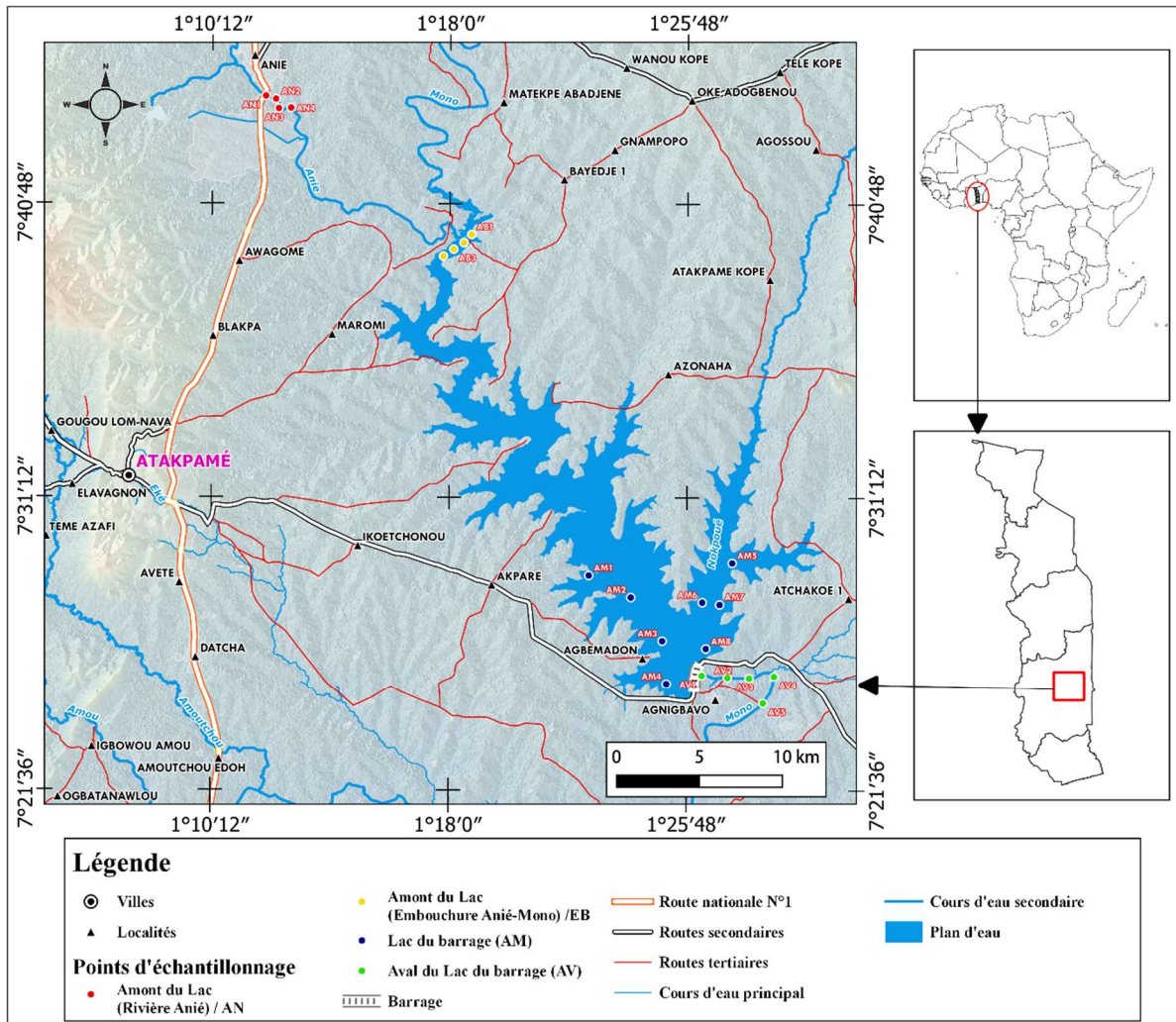


Figure 1. Carte de la zone d'étude montrant les sites de prélèvements des sédiments

Le pH des sédiments est mesuré dans le surnageant d'un mélange de 10 g de sédiments et de 25 ml d'eau distillée après agitation à l'aide d'un agitateur magnétique pendant une minute suivie de 2 heures de repos. Le pH est mesuré selon la norme NFT 90-008 à l'aide d'un pH-mètre de marque Crison BASIC 20+ alors que la conductivité électrique (CE) est déterminée à l'aide d'un multi paramètre de type Knick Portamess selon la norme NF EN 27888.

2.3. Estimation de l'intensité de la contamination

L'indice de géoaccumulation (I_{géo}), les facteurs de contaminations (FC), l'indice moyen de contamination (Im) et l'indice de risque écologique (Ri) ont été utilisé pour évaluer l'intensité de la pollution des sédiments en éléments traces.

2.3.1. Indice de Géo-accumulation (I-géo)

Cet indice, établi par Müller (1969), compare une concentration d'un sédiment donné à une valeur

considérée comme bruit de fond géochimique. Le bruit du fond géochimique dans la présente étude est représenté par des valeurs moyennes de croûte continentale déterminées par Rudnick et Gao (Rudnick et Gao, 2003).

L'indice de géoaccumulation a été calculé selon l'équation suivante :

$$I - \text{géo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5B_n} \right)$$

Où I-géo = Indice de géoaccumulation; log₂ = logarithme de base 2; n = élément considéré; C = concentration mesurée dans l'échantillon; B = fond géochimique; 1.5 = facteur normalisant les fluctuations naturelles du fond géochimique.

Les résultats sont interprétés selon Müller (1969) comme suit : I-géo < 0 (classe 0) : sans contamination ; 0-1 (1) : sans à légère contamination ; 1-2 (2) : Légère à modérée à contamination ; 2-3 (3) : contamination modérée ;

3-4 (4) : Moyen à forte contamination ; 4-5 (5) : Forte contamination et I-géo > 5 (6) traduit une contamination extrême

2.3.2. Facteur de contamination (FC) et indice moyen de contamination (Im)

Le facteur de contamination est déterminé par la formule suivante :

$$FC = \frac{\text{Concentration de l'élément trace dans le sédiment}}{\text{Concentration de références}}$$

Les concentrations de référence utilisées sont celles des normes canadiennes de pollution en éléments traces des sédiments données dans le Tableau 1 (CCME, 2001). Les valeurs des FC ont été interprétés selon Hakanson (1980) où : FC ≤ 1 indique une faible contamination ; 1 ≤ FC < 3 est une contamination modérée ; 3 ≤ FC < 6 est une contamination importante ; et FC ≥ 6 est une très forte contamination.

Tableau 1. Valeurs normes canadiennes de pollution en éléments traces des sédiments

| Eléments traces | C d | P b | Ni | Cu | Cr | A s | Hg |
|-------------------------|------|-----|-----|-------|-------|------|-------|
| SQG (CCME, 2001) | 0, 6 | 3 5 | 1 8 | 35, 7 | 37, 3 | 5, 9 | 0,1 7 |

SQG = Sediment Quality Guidelines

L'indice moyen de contamination (Im) quant à lui a été calculé par la formule suivante :

$$Im = \frac{1}{n} \sum FC$$

Où n est le nombre d'éléments analysés, FC le facteur de contamination.

Il y a contamination à partir de Im > 2 (Nadem et al 2015)

2.3.3. Indice de risque écologique (Ri)

Il est établi par Hakanson (1980). Cet indice est utilisé pour évaluer le risque écologique des sédiments. Il est repris par d'autres auteurs pour déterminer le risque écologique des contaminants tels que les métaux dans le sol et les sédiments (Yi et al. 2011).

$$Ri = \sum_{i=1}^i E_r^i \text{ avec } E_r^i = T_r \times FC$$

Où Ri est l'indice de risque écologique ; Tr est le facteur de la réaction toxique ; FC est le facteur de contamination ; Er est le risque écologique

potentiel de chaque métal. Les facteurs de la réaction toxique (Tr) des éléments traces étudiés (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, et du Ni) selon Hilton et al, (1985) sont respectivement de 10 ; 30 ; 5 ; 2 ; 40 ; 5 ; 6.

L'interprétation des valeurs des risques écologiques des sédiments selon Hakanson (1980) est présentée dans le Tableau 2:

Tableau 2. Caractérisation du risque écologique potentiel (Er) et de l'indice de risque écologique (Ri)

| Valeur d'Er | Risque écologique potentiel | Valeur de Ri | Indice de risque écologique |
|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|
| Er < 40 | Faible | Ri < 95 | Faible |
| 40 ≤ Er < 80 | Modéré | 95 ≤ Ri < 190 | Modéré |
| 80 ≤ Er < 160 | Considérable | 190 ≤ Ri < 380 | Considérable |
| 160 ≤ Er < 320 | Elevé | 380 ≥ Ri | Très élevé |
| 320 ≥ Er | Très élevé | | |

2.4. Analyses statistiques des données

Une Analyse des Composantes Principales (ACP) a été réalisée afin de mettre en évidence les relations entre les paramètres physico-chimiques et les concentrations des éléments traces des sédiments d'une part, et d'autres parts entre les différents sites de prélèvements (Djeddi, et al., 2018). Le test t de Student au seuil de 5% a été utilisé pour comparer la variabilité saisonnière des paramètres physico-chimiques et des concentrations des éléments traces et avec la norme de la qualité. Les relations entre les éléments analysés ont été testées en utilisant le coefficient de Pearson avec un seuil de signification fixé à p < 0,05. Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel STASTICA.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Variabilité saisonnière du pH et de la conductivité des sédiments

Le Tableau 3 présente les valeurs moyennes du pH et de la conductivité.

Tableau 3. Paramètres physico-chimiques des sédiments en saison sèche et en saison pluvieuse

| Paramètres | pH | | CE (µS/cm) | |
|-----------------------|---------------|------|---------------|-------|
| | SP | SS | SP | SS |
| n = 21 | | | | |
| Minimum | 5,5 | 5,5 | 35,6 | 23,3 |
| Maximum | 7,1 | 7,0 | 277 | 160,7 |
| Moyenne | 6,5 | 6,0 | 86,08 | 85,17 |
| Ecart-type | 0,6 | 0,35 | 49,42 | 39,81 |
| CV(%) | 9,58 | 5,93 | 57,41 | 46,74 |
| Test t (t ; p) | 3,05 ; 0,0040 | | 0,07 ; 0,9479 | |

SP : Saison pluvieuse ; SS : Saison sèche ; CV : Coefficient de variation ; n : nombre d'échantillons.

Les valeurs de pH varient entre 5,5 et 7,1, avec une valeur moyenne de $6,5 \pm 0,6$ en saison pluvieuse et de 5,5 à 6,9, avec une moyenne de $6,0 \pm 0,4$ en saison sèche. Il apparaît une différence significative entre les moyennes saisonnières des pH ($t = 3,05$; $p = 0,0040$) avec le pH le plus élevé en saison pluvieuse. L'on note une répartition homogène entre ces valeurs en saison pluvieuse (CV = 9,58%) et en saison sèche (CV = 5,93%). L'analyse des valeurs du pH des sédiments étudiés montre qu'elles ont une tendance acide ($6,5 \pm 0,6$) à neutre en saison pluvieuse à cause de la nature des sols de la région et du socle qui est granitique et gneissique (Lamouroux, 1969). En effet, les pH des sols en Moyen Mono tout comme à Glei, localités toutes situées dans le bassin du Mono, oscillent entre 4,3 et 6,7 ; ainsi, les sédiments qui résultent de ces roches via toutes les formes d'érosions expliqueraient ces valeurs acides de pH. En saison sèche, l'on observe des pH purement acides. Ces valeurs de pH seraient dues, non seulement au caractère acide du sol et de la roche mère comme susmentionné, mais également à l'absence des eaux pluviales qui diluent l'acidité. Aussi la décomposition des plantes aquatiques et litières déposées pendant la saison précédente produirait-elle une fertilisation acidifiante en cette période de forte chaleur par apport d'azote sous forme d'ammonium (Razaie-Boroon et al., 2011). Ces résultats sont contraires aux pH observés dans les sédiments du barrage Béni Haroun, Nord-Est de l'Algérie qui varient de 7,6 à 8,7 (Djeddi, et al., 2018). Ces derniers résultats contraires sont dus à l'influence de la mer, à cause de leurs proximités. Le pH est le facteur le plus important influençant la solubilité et la spéciation du métal et donc sa toxicité (Badawy et al., 2002). Ainsi le pH acide des sédiments de la présente étude influencerait la solubilité des éléments traces (ET) présents. Les conductivités varient de 35,6 à 277 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison pluvieuse et de 23,3 à 160,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison sèche. L'on note une hétérogénéité entre les valeurs de la conductivité en saison pluvieuse (CV = 57,41%) et une homogénéité en saison sèche (CV = 46,74%). Des moyennes saisonnières de $86,08 \pm 49,42$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison pluvieuse et de $85,17 \pm 39,81$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison sèche ne montrent aucune différence significative ($t = 0,07$; $p = 0,9479$). Ces valeurs de conductivité sont typiques de celle des sédiments des eaux douces

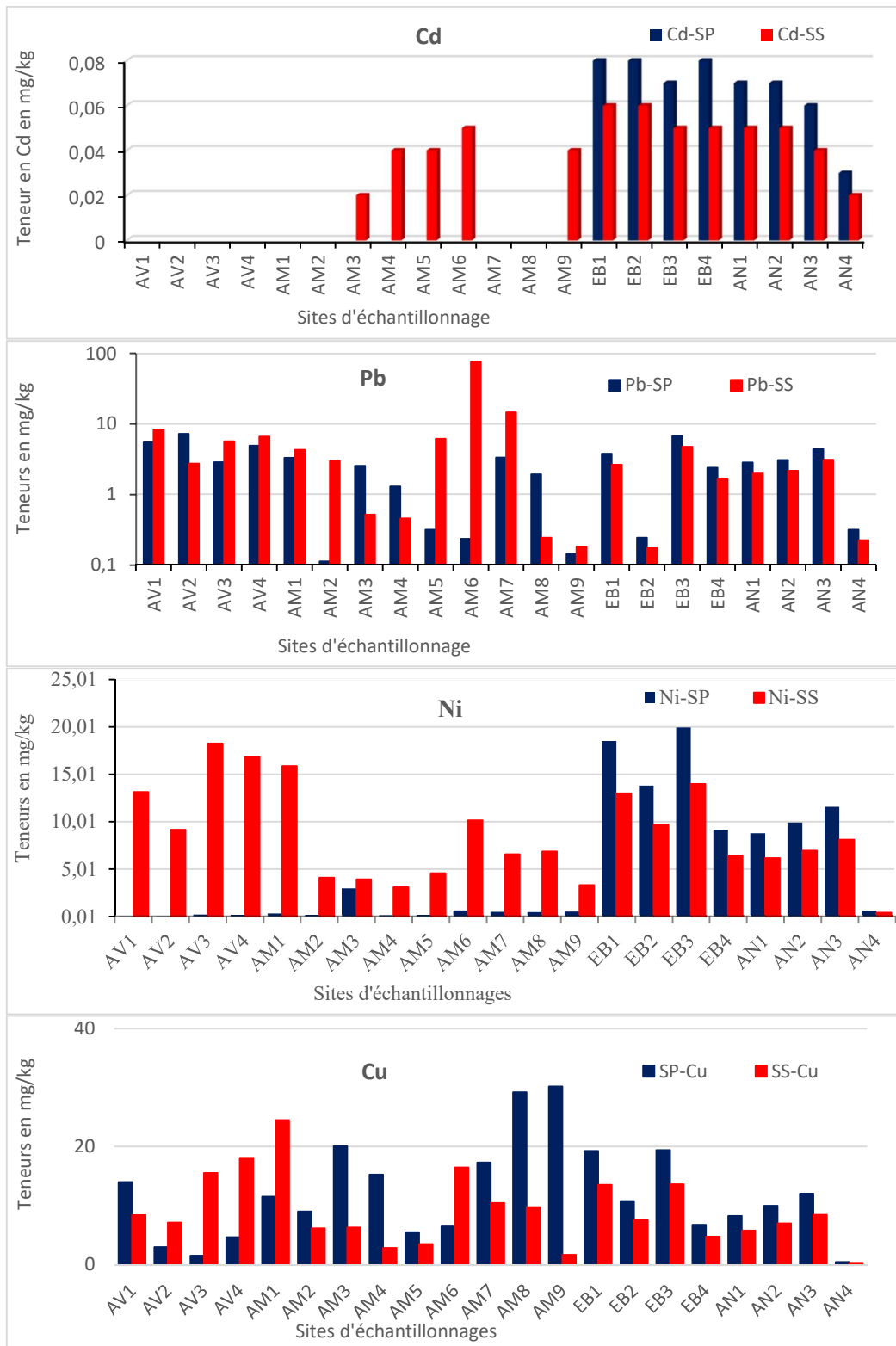
continentales qui varient entre 100 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Elles sont inférieures aux valeurs enregistrées par Djeddi et al, (2018) dans le barrage Béni-Haroun en Algérie. Ces valeurs fortes observées en saison pluvieuse traduisent une minéralisation assez élevée due certainement aux rejets urbains, industriels (sucrierie d'Anié), aux eaux qui ruissellent des champs agricoles où les pesticides et les engrais sont utilisés dans la localité.

3.2. Teneurs en éléments traces dans les sédiments

3.2.1. Distribution saisonnière des éléments traces dans les sédiments

Les concentrations des éléments traces des sédiments (Figure 2) affichent des fluctuations saisonnières irrégulières. Les concentrations du Cd varient de 0,03 à 0,08 mg/kg et de 0,02 à 0,06 mg/kg respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche avec des moyennes respectives de $0,07 \pm 0,02$ mg/Kg et $0,04 \pm 0,01$ mg/kg (Tableau4). Par ailleurs, les teneurs des différents sites en saison pluvieuse comme en saison sèches, sont homogènes (CV = 24,73 ; 28,76%). En saison pluvieuse, les sites, enregistrent des teneurs plus élevées qu'en saison sèche. La variation intersites montre que les sites de l'embouchure Anié-Mono (EB) et de la rivière Anié (AN) en saison pluvieuse, avaient de fortes teneurs alors que les sites du Lac du barrage (AM) et en aval du barrage (AV), avaient des teneurs inférieures à la limite de détection (0,0005 mg/l).

En saison sèche, alors que quelques sites du Lac du barrage (AM) et les sites d'embouchure Anié-Mono (EB) et ceux de la rivière Anié (AN) ont enregistré des teneurs en cadmium, les sites d'aval avaient des teneurs en dessous de détection. Les fortes teneurs du Cd des sites de l'embouchure Anié-Mono et de la rivière Anié en saison pluvieuse et aussi en saison sèche et les valeurs inférieures à la limite de détection en amont et en aval montrent que la zone d'Anié en amont du Lac et de l'embouchure Anié-Mono avec leurs activités anthropiques jouent un rôle prépondérant dans la pollution du Lac en Cd. En effet, l'on note la présence de l'industrie de sucrierie d'Anié et ses vastes champs de cannes à sucre, les apports des effluents des grandes villes traversées par le Mono et des résidus des intrants agricoles.



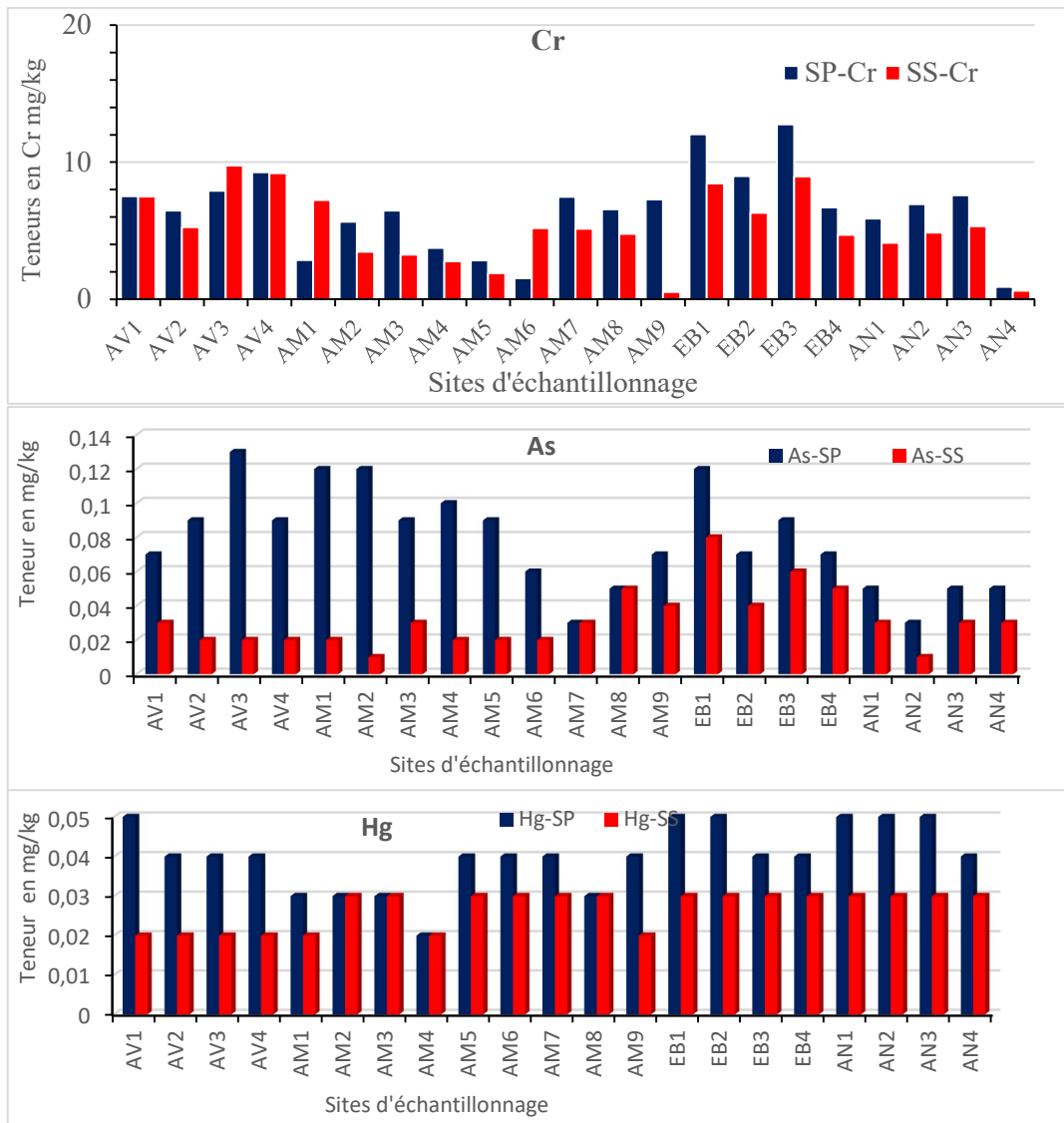


Figure 2. Variations saisonnières des teneurs des éléments traces dans les sédiments des différents sites

Les teneurs en Pb varient de 0,11 à 7,21 mg/kg en saison pluvieuse avec une moyenne de 2,72±2,16 mg/kg (tableau 3). En saison sèche, ces teneurs varient de 0,17 à 76,70 mg/kg avec une moyenne 6,95 ±16,35 mg/kg. Il n'apparaît aucune différence entre les valeurs moyennes en Pb ($p = 0,2472$) (tableau 3). Dans cette figure 2, l'on relève, 57,14% (12/21) des sites de la saison pluvieuse ont des teneurs en Pb supérieures à celles de la saison sèche. Les sites de l'aval (AV) et de la rivière Anié (AN) ont chacun des teneurs plus ou moins homogènes par rapport à ceux du Lac du barrage (AM) qui sont très hétérogènes. Cette dernière zone a enregistré les plus fortes teneurs en saison sèche. L'homogénéité des valeurs des teneurs du Pb des sites de l'aval et de l'amont dans la zone de l'Anié et sans aucune variation particulière exprime l'origine diversifiée de pollution de cet élément. Les teneurs en Ni oscillent entre 0,03 et 19,95 mg/kg et entre 0,43 et 18,27 mg/kg respectivement en

saison pluvieuse et en saison sèche, avec des teneurs moyennes respectives de 4,70±6,61 mg/kg et 8,61±4,96 mg/kg (Tableau 4). Il apparaît une différence significative entre les teneurs moyennes saisonnières ($p = 0,0362$). La figure 2 met en exergue la supériorité des teneurs moyennes en Ni de la saison pluvieuse par rapport à celles de la saison sèche dans la zone rivière Anié (AN) et dans les sites de l'embouchure (EB). Mais dans les zones du Lac (AM) et de l'aval du barrage (AV), ce sont plutôt les teneurs en Ni en saison sèche qui sont largement supérieures à celles de la saison pluvieuse quasi inexistantes. Les teneurs des sites de l'embouchure Anié-Mono et de la rivière d'Anié ont des concentrations plus fortes que celles du Lac et aval en saison pluvieuse. En saison sèche, les teneurs de la zone de l'aval sont supérieures à celles des autres zones. Les teneurs en Cu varient de 0,48 à 30,21 mg/kg en saison pluvieuse et de 0,34 à 24,48 mg/kg en saison

sèche, avec des moyennes saisonnières respectives de $12,15 \pm 8,20$ mg/kg et $9,14 \pm 5,98$ mg/kg. Aucune différence significative ne se dégage entre les teneurs moyennes saisonnières du Cu ($p = 0,1822$). La figure 2 montre que 71,43% (15/21) des sites ont des teneurs moyennes en saison pluvieuse supérieures à celles de la saison sèche. En saison pluvieuse, les fortes concentrations sont observées dans le Lac alors qu'en saison sèche, ce sont des sites de l'aval qui enregistrent des fortes concentrations.

Les teneurs en Cr varient de 0,90 à 12,76 mg/kg en saison pluvieuse alors qu'en saison sèche ces teneurs varient de 0,53 à 9,76 mg/kg. Les teneurs moyennes de la saison pluvieuse et sèche sont respectivement de $6,54 \pm 3,01$ mg/kg et $5,21 \pm 2,65$ mg/kg. Aucune différence significative ne se dégage de ces valeurs moyennes saisonnières ($p = 0,1341$). La figure 2 montre que 80,95 % (17/21) des sites ont des teneurs moyennes en Cr en saison pluvieuse plus fortes que celles de la saison sèche. En saison pluvieuses, ce sont des sites de l'embouchure Anié-Mono qui ont enregistré les plus fortes concentrations moyennes alors qu'en saison sèche ce sont des sites de l'aval qui se distinguent par les plus fortes teneurs.

La supériorité des teneurs moyennes en Ni, Cu, Cr des sites de l'embouchure Anié-Mono et de la rivière d'Anié sur celles du Lac et de l'aval du barrage en saison pluvieuse prouve une fois encore que les Zones de l'amont du Lac (zone d'Anié et de l'embouchure Anié-Mono) sont des zones de sources des polluants pour le Lac. En saison sèche, ces éléments vont être accumulés dans le Lac du

barrage ou en aval. Cela explique parfois des teneurs élevées en aval et dans le Lac en saison sèche par rapport à la zone de la rivière Anié et de l'embouchure Anié-Mono.

Les teneurs en As des sédiments varient de 0,03 à 0,13 mg/kg en saison pluvieuse et de 0,01 à 0,08 mg/kg en saison sèche, avec des moyennes respectives de $0,08 \pm 0,03$ mg/kg et $0,03 \pm 0,02$ mg/kg. Ces teneurs moyennes saisonnières présentent une différence significative ($p = 0,0001$). Les sites ont des teneurs moyennes en As plus élevées en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Les plus fortes teneurs en saison pluvieuse sont localisées dans les zones Aval et dans le Lac alors qu'en saison sèche, c'est la zone de l'embouchure Anié-Mono qui présente les plus fortes teneurs moyennes en As (Figure 2).

Les teneurs en Hg oscillent entre 0,02 et 0,5 mg/kg et entre 0,02 et 0,03 mg/kg respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche. Avec des teneurs moyennes respectives de $0,04 \pm 0,01$ mg/kg et $0,03 \pm 0,00$ mg/kg, il apparaît une différence très significative entre les teneurs moyennes saisonnières ($p = 0,0001$). La figure 2 met en exergue la supériorité des teneurs en Hg de la saison pluvieuse par rapport à celles de la saison sèche.

Les plus fortes teneurs en As en saison pluvieuse dans les zones de l'aval et du Lac, et des fortes teneurs dans la zone de l'embouchure Anié-Mono en saison sèche, montre que cet élément aurait (tout comme le Hg avec des teneurs homogènes pour presque tous les sites) des origines diversifiées (naturelle comme anthropique).

Tableau 4. Teneurs moyennes saisonnières en éléments traces mesurées dans les sédiments

| | Cd | Pb | Ni | Cu | Cr | As | Hg |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Saison pluvieuse (n = 21) | | | | | | | |
| Minimum | 0,03 | 0,11 | 0,03 | 0,48 | 0,90 | 0,03 | 0,02 |
| Maximum | 0,08 | 7,21 | 19,95 | 30,21 | 12,76 | 0,13 | 0,05 |
| Moyenne | 0,07 | 2,72 | 4,70 | 12,15 | 6,54 | 0,08 | 0,04 |
| Ecart-type | 0,02 | 2,16 | 6,61 | 8,20 | 3,01 | 0,03 | 0,01 |
| Saison sèche (n = 21) | | | | | | | |
| Minimum | 0,02 | 0,17 | 0,43 | 0,34 | 0,53 | 0,01 | 0,02 |
| Maximum | 0,06 | 76,70 | 18,27 | 24,48 | 9,76 | 0,08 | 0,03 |
| Moyenne | 0,04 | 6,95 | 8,61 | 9,14 | 5,21 | 0,03 | 0,03 |
| Ecart-type | 0,01 | 16,35 | 4,96 | 5,98 | 2,65 | 0,02 | 0,00 |
| Test t (p) | 0,1287 | 0,2472 | 0,0362 | 0,1822 | 0,1341 | 0,0000 | 0,0000 |
| LD(mg/l) | 0,0005 | 0,01 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,00004 | 0,00006 |

n : Nombre d'échantillons ; *CV* : Coefficient de variation ; *LD* : limites de détection.

Dans l'ensemble, les concentrations des éléments traces des sédiments du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto ont montré globalement des fluctuations spatiales et temporelles parfois moins poussées. Pour l'ensemble des éléments traces étudiés, les teneurs moyennes de la majorité (cinq éléments sur sept) obtenues en saison pluvieuse sont supérieures aux teneurs moyennes obtenues en saison sèche (tableau 4). Cependant, ces supériorités ne sont pas significatives (p -value <0.05). Ces teneurs relativement fortes en saison pluvieuse par rapport la saison sèche, obtenues aussi par Rashed dans le Lac Nasser en Egypte, peuvent s'expliquer par un apport et une sédimentation plus abondante dus aux faibles cours fluviaux en juillet, en saison pluvieuse et aussi à un caractère récent de pollution en ces éléments traces (Rashed, 2001). En outre, le pH plus acide des sédiments, en saison sèche, explique le caractère moins pollué en éléments traces de ces sédiments en cette période, car l'acidité élevée conduit à la solubilité des ET des sédiments entraînant leurs libérations dans les eaux (Smith *et al* 2003).

Les principaux éléments traces connus pour être influencés par le pH sont l'arsenic, le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb et le zinc (Environnement Canada, 2007). Par ailleurs, les résultats de l'ACP et de corrélation ont montré des corrélations entre le pH, le Cd, et le Ni en saison pluvieuse ; cela indique qu'il existe une affinité ou interrelation entre ces paramètres. Les polluants du Lac de Nangbéto, en effet, proviennent des pesticides et engrais utilisés pour la culture du coton, de la canne à sucre, des cultures céréales et aussi des rejets de l'usine de sucrerie d'Anié, des eaux usées des villes d'Atakpamé, de Sokodé, de Sotouboua et d'Anié. En effet, l'on note la présence de vaste domaine de canne à sucre à Anié, des cultures des champs de cotonniers et des cultures vivrières dans le bassin du Mono.

Non seulement les activités sont pratiquées principalement en saison pluvieuse mais c'est également la période de grand drainage des polluants via des eaux de ruissellements vers les affluents du Mono, ensuite du Mono lui-même vers le Lac. C'est ainsi que l'écosystème du Lac de Nangbéto en saison pluvieuse enregistre plus de polluants que la saison sèche appauvrie en apport des polluants. Les deux éléments (Pb et Ni) dont les teneurs moyennes de la saison pluvieuse restent inférieures à celles de la saison sèche sont des polluants dont l'utilisation est très diversifiée, abondante et très lointaine. Ainsi, ces polluants sont

permanents dans le Lac. Leurs teneurs sont diluées en saison pluvieuse par augmentation du niveau d'eau et concentrées en saison sèche par diminution du niveau d'eau. De plus, en saison sèche, le faible écoulement permet une grande sédimentation des sédiments et partant des éléments traces (Ali *et al.*, 2016). Les résultats enregistrés dans cette étude, comparés à d'autres, montrent que les teneurs moyennes en Cd, Pb, Ni, Cu et Cr sont inférieures à celles obtenues dans le Lac Yilong en Chine qui sont respectivement pour ces éléments de 0,76 ; 53,19 ; 81,42 ; 57,13 ; 51,57 mg/kg (Baie *et al.*, 2011); dans la Lagune Ebrié en Côte d'Ivoire qui est pour le Cd, le Ni, et le Cu respectivement de 2,92 ; 105,3 et de 116,49 mg/kg (Wognin *et al.*, 2017) ; dans le Complexe Lac Togo-Lagune d'Aného (Togo) pour l'As et le Hg qui sont de 0,60 et 11,38 mg/kg (Ouro-Sama *et al.*, 2021).

es différences de teneurs observées des éléments traces étudiés entre différentes régions d'étude résultent des types d'activités (agricole, industrielle ou extraction minière) pratiquées dans la zone, de l'intensité et de l'étendue de ces activités. Aussi, la nature pétrographique traversée par les eaux de ruissellement influence ces teneurs. Les zones liées aux extractions minières ont de fortes teneurs en éléments traces que d'autres.

3.2.2. Qualité des sédiments étudiés en rapport aux normes de qualité

La Figure 3 montre que les teneurs de tous les éléments étudiés sont inférieures aux normes canadiennes de qualité (SQG = sediment quality guidelines), ceci aussi bien en saison pluvieuse qu'en saison sèche. L'on déduit de cette évaluation que dans ces sédiments les éléments traces étudiés n'auraient aucun effet néfaste direct sur leur biocénose (CCME, 2001).

Les résultats des valeurs propres, pourcentage de variances totales et cumulées exprimées (Tableau 5) montrent qu'en saison pluvieuse les quatre premiers facteurs donnent 80,86% de la variance cumulée : F1 = 35,90% ; F2 = 19,62% ; F3 = 17,10% ; F4 = 13,05% ; alors qu'en saison sèche ils donnent 84,24% de la variance totale cumulée dont : F1 = 41,53% ; F2 = 17,32% ; F3 = 16,60% ; F4 = 8,80%. Le plan factoriel (F1 x F2) donne 55,53% en saison pluvieuse et 58,84% en saison sèche.

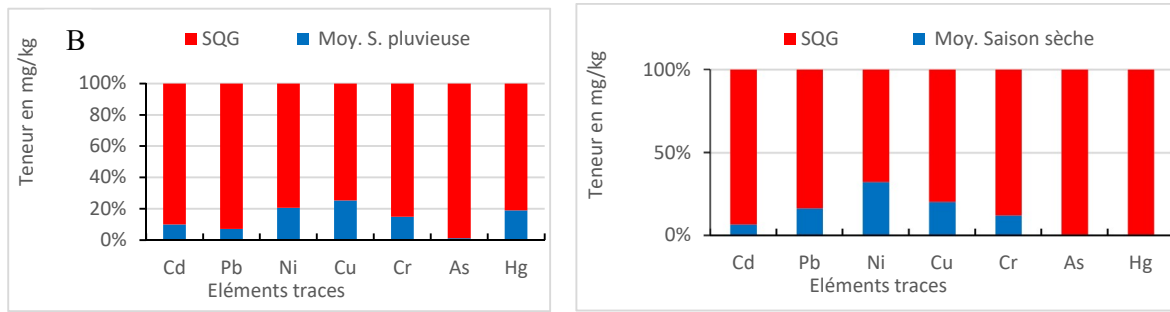


Figure 3. Teneurs moyennes des éléments traces des sédiments en saison pluvieuse (A) et en saison saiche (B) par rapport aux normes canadiennes

3.2.3. Analyse en composantes principales

La projection des variables dans le plan factoriel F1 X F2 est présentée à la Figure 4. En saison pluvieuse (Fig. 4A), l'axe F1 (qui représente 35,90% de la variance totale) est défini négativement par le Cd et positivement par le pH, Ni, Cr et le Hg. L'axe F2 (19,62% de la variance totale) est défini dans sa partie positive par CE puis dans sa partie négative par le pH. En saison sèche (Figure 4B), l'axe F1 (41,53%) est défini dans sa partie positive par le pH et dans sa partie négative par le Cd, Ni, Cu, et le Cr.

L'axe F2 (17,32%) est défini dans sa partie négative par la CE, le Pb et le Hg.

Les Figures 4C et D présentent la projection des sites d'échantillonnages des sédiments dans le plan factoriel F1 X F2. Elle dessine deux types de sédiments en saison pluvieuse (figure 4C). Le premier groupe G1 de sédiments regroupant majoritairement les sites de la zone du Lac (AM) et de l'aval (AV) du barrage est plus contaminé en Cd et en As, moins minéralisé et avec un pH faible.

Tableau 5. Résultats des valeurs propres, pourcentage de variances totales et cumulées

| | Saison pluvieuse | | | | Saison sèche | | | |
|---------------------------|------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F1 | F2 | F3 | F4 |
| Valeurs propres | 3,23 | 1,76 | 1,54 | 1,17 | 3,74 | 1,56 | 1,49 | 0,79 |
| % Variance totale | 35,90 | 19,62 | 17,10 | 13,05 | 41,53 | 17,32 | 16,60 | 8,80 |
| Cumul des valeurs propres | 3,23 | 5,00 | 6,54 | 7,71 | 3,74 | 5,30 | 6,79 | 7,58 |
| % Variance cumulée | 35,90 | 55,53 | 72,63 | 85,67 | 41,53 | 58,84 | 75,44 | 84,24 |

Le deuxième groupe G2 des sédiments est formé des sites de la rivière d'Anié (AN) et d'embouchure Anié-Mono (EB). Les sédiments de ce dernier groupe ont un pH qui est pratiquement neutre, sont plus minéralisés et ont des teneurs élevées en Ni, Cr, Pb et en Hg. En saison sèche (figure 4D), on peut également distinguer deux groupes. Les sédiments

du groupe G1 regroupent les sites de la zone de l'aval (AV) du barrage. Ces sédiments sont acides et plus contaminés en Cd, Ni, Cr et Cu. Le groupe G2 regroupant les sites de la rivière d'Anié (AN) et d'embouchure Anié-Mono (EB) est caractérisé par des sédiments moins acides ayant des teneurs plus élevées en Hg, en Pb et en As.

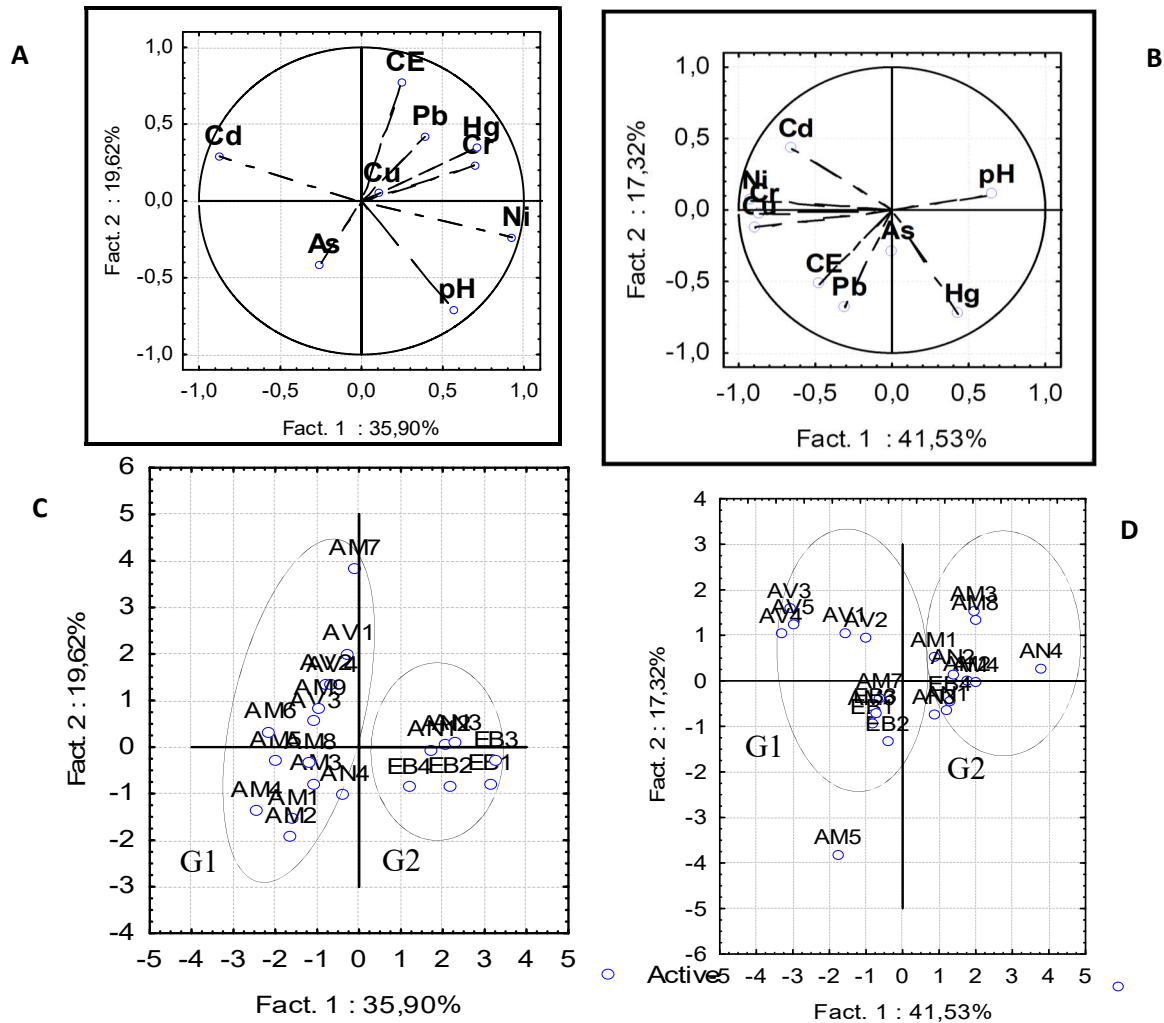


Figure 4. Plan factoriel F1 x F2 des variables (A : saison pluvieuse ; B : saison sèche) et des sites d'échantillonnages (C : saison pluvieuse ; D : saison sèche).

3.3. Evaluation du degré de contamination des sédiments par les éléments traces

3.3.1. Indice de géo-accumulation (Igeo)

Les valeurs d'indices de géo-accumulation des éléments traces des sédiments sont consignées dans le tableau 6.

En saison pluvieuse comme en saison sèche, les valeurs d'Igeo de tous les sites pour les éléments Cd, Ni, Cu, Cr, As sont inférieures à 0 indiquant le caractère de non contamination des sédiments en ces éléments. Quant au Pb, ses valeur d'Igeo moyennes pour les deux saisons indiquent qu'il est sans contamination à légère contamination ($0 \leq I_{geo} < 1$); le Hg pour les deux saisons est modérément contaminé ($1 \leq I_{geo} < 2$). Il ressort que le Hg est l'élément qui a plus contaminé les sédiments, suivi du Pb.

3.3.2. Facteur de contamination (FC) et indice moyen de contamination (Im)

Les valeurs des facteurs de contamination (FC) et indice moyen de contamination (Im) saisonniers des éléments traces des sédiments de chaque site, sont consignées dans le Tableau 7.

Le Tableau 7 montre qu'en saison pluvieuse toutes les valeurs de FC des sédiments de tous les éléments traces sont inférieurs à 1 sauf le Ni ayant enregistré un maximum de 1,11 et une moyenne de 0,26. Donc tous les sédiments sont faiblement contaminés. Les FC en Cd varient de 0,050 à 0,133; ceux du Pb oscillent entre 0,003 et 0,206; les FC du Ni partent de 0,002 à 1,108; ceux du Cu sont cadrés entre 0,013 et 0,846; ceux du Cr varient de 0,024 à 0,342; ceux de l'As restent entre 0,005 et 0,022 et les FC du Hg vont de 0,118 à 0,294.

Tableau 6. Indices saisonniers de géo-accumulation des éléments traces dans les sédiments (I_{geo})

| | Saison pluvieuse | | | | | | | Saison sèche | | | | | | |
|---------------|------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|--------------|
| | Cd | Pb | Ni | Cu | Cr | As | Hg | Cd | Pb | Ni | Cu | Cr | As | Hg |
| Min | -11,57 | -3,37 | -10,71 | -6,34 | -6,98 | -7,28 | 0,76 | -2,17 | -2,75 | -6,87 | -6,84 | -7,75 | -8,86 | 0,81 |
| Max | -10,16 | 2,66 | -1,33 | -0,37 | -3,16 | -5,16 | 2,08 | -0,59 | 6,07 | -1,46 | -0,67 | -3,55 | -5,86 | 1,40 |
| Moyenne | -10,46 | 0,42 | -5,72 | -2,14 | -4,34 | -6,01 | 1,72 | -1,11 | 0,90 | -2,88 | -2,51 | -4,75 | -7,40 | 1,20 |
| Ecart type | 0,47 | 1,97 | 3,03 | 1,42 | 0,94 | 0,61 | 0,34 | 0,51 | 2,28 | 1,20 | 1,36 | 1,13 | 0,76 | 0,28 |
| Val.CT | 0,061 | 0,76 | 33,5 | 26 | 76 | 3,1 | 0,008 | 0,061 | 0,76 | 33,5 | 26 | 76 | 3,1 | 0,008 |

Val.CT : Valeurs des Croûtes terrestres en mg/kg (Rudnick et Gao, 2003)

Tableau 7. FC et Im saisonniers des éléments traces

| | Facteurs de contaminations | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| | Cd | Pb | Ni | Cu | Cr | As | Hg | Im |
| Saison pluvieuse (n = 21) | | | | | | | | |
| Minimum | 0,050 | 0,003 | 0,002 | 0,013 | 0,024 | 0,005 | 0,118 | 0,054 |
| Maximum | 0,133 | 0,206 | 1,108 | 0,846 | 0,342 | 0,022 | 0,294 | 0,365 |
| Moyenne | 0,113 | 0,078 | 0,261 | 0,340 | 0,175 | 0,013 | 0,235 | 0,164 |
| Ecart-type | 0,028 | 0,062 | 0,367 | 0,230 | 0,081 | 0,005 | 0,049 | 0,087 |
| Saison sèche (n = 21) | | | | | | | | |
| Minimum | 0,033 | 0,005 | 0,024 | 0,010 | 0,014 | 0,002 | 0,118 | 0,039 |
| Maximum | 0,100 | 2,191 | 1,015 | 0,686 | 0,262 | 0,014 | 0,176 | 0,517 |
| Moyenne | 0,073 | 0,198 | 0,478 | 0,256 | 0,140 | 0,005 | 0,157 | 0,183 |
| Ecart-type | 0,021 | 0,467 | 0,275 | 0,168 | 0,071 | 0,003 | 0,028 | 0,106 |

En saison sèche, les résultats montrent également que toutes les valeurs de FC des sédiments pour tous les éléments traces sont inférieures à 1, sauf les éléments Pb et Ni ont des facteurs de contaminations maximums respectifs de 2,19 et 1,02. Les moyennes restent toutes inférieures à 1. Tous les sédiments sont donc faiblement contaminés. Les FC en cette saison varient de 0,033 à 0,100 pour le Cd; ceux du Pb vont de 0,005 à 2,191; les FC du Ni oscillent entre 0,024 et 1,015; ceux du Cu se situent entre 0,010 et 0,686; ceux du Cr tendent de 0,014 à 0,262; ceux d'As vont de 0,002 à 0,014 et enfin les FC du Hg fluctuent entre 0,118 et 0,176.

En saison pluvieuse, les Im varient de 0,054 à 0,365, alors qu'en saison sèche, ils varient entre 0,039 et 0,517. Pour toutes les deux saisons, aucun site n'a un Im supérieur à 2 qui est le seuil d'un début de contamination, alors les sédiments étudiés ne souffrent pas de dégradation de qualité métallique.

3.3.3. Indice de risque écologique (Ri)

Les valeurs des facteurs de risque potentiel (ER) et d'indice de risque écologique (Ri) saisonniers des éléments traces des sédiments sont consignées dans le Tableau 8.

Les résultats de l'évaluation de l'indice de risque écologique par rapport à la contamination des sédiments en éléments traces montrent les valeurs des facteurs de risque potentiel (Er) qui varient de la plus faible valeur (0) pour le Cd à la plus forte valeur (6,85) pour l'As en saison pluvieuse et de la plus faible valeur (0) pour le Cd à la plus forte valeur (10,96) pour le Pb en saison sèche. Ces valeurs ont conduit en saison pluvieuse, à la plus forte valeur de Ri à 21,02 alors qu'elle est de 26,52 en saison sèche. Ces facteurs de risque potentiel impliquent des risques écologiques faibles aussi bien en saison pluvieuse qu'en saison sèche (Ri < 40) (Hakason, 1980).

Tableau 8. Facteurs de risque potentiel (ER) et indice de risque écologique (Ri) saisonniers des sédiments

| Statistiques | ER | | | | | | | Ri |
|-------------------|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------|
| | Cd | Pb | Ni | Cu | Cr | As | Hg | |
| | Saison Pluvieuse | | | | | | | |
| Minimum | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 2,57 | 4,01 |
| Maximum | 4,00 | 1,03 | 6,65 | 4,23 | 0,68 | 0,22 | 6,85 | 21,02 |
| Moyenne | 3,38 | 0,39 | 1,57 | 1,70 | 0,35 | 0,13 | 4,88 | 10,31 |
| Ecart-type | 1,75 | 0,31 | 2,20 | 1,15 | 0,16 | 0,05 | 1,47 | 5,32 |
| | Saison sèche | | | | | | | |
| Minimum | 0,00 | 0,02 | 0,14 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 4,71 | 8,17 |
| Maximum | 3,00 | 10,96 | 6,09 | 3,43 | 0,52 | 0,14 | 7,06 | 26,52 |
| Moyenne | 1,36 | 0,99 | 2,87 | 1,28 | 0,28 | 0,05 | 6,27 | 13,11 |
| Ecart-type | 1,20 | 2,34 | 1,65 | 0,84 | 0,14 | 0,03 | 1,14 | 4,06 |

4. CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que les sédiments du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto ont souvent une tendance à l'acidité et sont le plus souvent moyennement minéralisés. La répartition spatiale et saisonnière des teneurs en éléments traces dans les sédiments révèle une distribution hétérogène. De fortes teneurs dans les zones de la rivière Anié et de l'embouchure Anié-Mono ; de fortes teneurs en saison pluvieuse qui résultent des activités anthropiques, des eaux de ruissellement et au lessivage des surfaces agricoles et industrielles. L'évaluation du degré de contamination des sédiments en éléments traces via l'Igéo, les FC, l'indice moyen de contamination (Im) et l'indice de risque écologique (Ri) indiquent un risque écologique faible, aussi bien en saison pluvieuse qu'en saison sèche (Ri < 40). En se limitant à l'étude des éléments traces de la présente étude, la qualité des sédiments du biotope du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto est donc considérée comme acceptable pour la biocénose. Cependant l'étude présente évalue le risque pour chaque polluant pris indépendamment et ne prend pas en compte l'effet "cocktail" lié à la présence d'un mélange de polluants dans les sédiments tels que les HAP, les solvants chlorés, les pesticides ou les résidus pharmaceutiques qui peut conduire à un risque.

5. REMERCIEMENTS

L'étude présente a reçu l'appui financier de la compagnie électrique du Bénin (CEB), à laquelle nous adressons nos profondes gratitude.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR. (1993). Qualité des sols. Sols, sédiments, boues de station d'épuration - Mise en solution d'éléments métalliques en traces (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) par attaques acides. NF X 31-151.
- Ali M. M., Ali M. L., Islam M. S. et Rahman M. Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environment Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5, 27-35, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002>
- Aydin-Onen S., Kucuksezgin F., Kocak F., Açik S. (2015). Assessment of heavy metal contamination in *Hediste diversicolor* (O.F. Müller, 1776), *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758), and surface sediments of Bafa Lake (Eastern Aegean). *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11): <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4047-5>
- Badawy S. H., Helal M. I. D., Chaudri A. M., Lawlor K. and McGrath S. P. (2002). Soil solid phase controls lead activity in soil solution, *J Environ. Qual.* 31, 162-67, <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1620>
- Bai J., Cui B., Chen B., Zhang K., Deng W., Gao H. et Xiao R. (2011). Spacial distribution ecological assessment of heavy metal in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China. *Ecological Modelling*, 222(2), 301-306, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.02>
- Benguedda-rahah W. (2012). Contribution à l'étude de la bioaccumulation métallique dans les sédiments et différents maillons de la chaîne trophique du littoral extrême ouest algérien. Thèse de doctorat, Univ. Tlemcen, Algérie, 149 p.
- CCME. (2001). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updates. In: Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), (Ed.). *Canadian sediment quality guidelines*. Environment Canada, Winnipeg, Canada: 1-5.

- Chen B., Liang X., Xu W., Huang X. et Li X. (2012). The changes in trace metal contamination over the last decade in surface sediments of the Pearl River Estuary, South China. *Science of the total environment*, **439**, 141-149, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.025>
- Dahri, N., Atoui, A., Ellouze, M., et Abida, H. (2018). Assessment of streambed sediment contamination by heavy metals: The case of the Gabes Catchment, South-eastern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*. **140**, 29-41, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.033>
- Djeddi H., Nacereddine S. K., Keddari D., & Afri-Mehennaoui F.-Z. (2018). Teneurs des éléments traces métalliques Cu, Zn Et Pb des sédiments du barrage Béni Haroun (Nord-Est de l'Algérie) *European Scientific Journal*, **14**(15), 269-286, <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p269>
- Environnement Canada et ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39 p, https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/dragage_sept-iles_IOC/documents/DB8.pdf .
- Hakanson L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hilton J., Davison W. et Ochsenein U. (1985). A mathematical model for analysis of sediment data. *Chemical Geology*, **48**, 281-291, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7885-2>
- Lamouroux M (1969). Notice explicative de la carte pédologique du Togo au 1/1000.000. Notice explicative No 34. Oice de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM), Centre ORSTOM de Lomé, Togo, https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/notexp/13277.pdf
- Müller G. (1969). Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, **2**, 108-118.
- Nadem S., El Baghdadi M., Rais J. et Barakat A. (2015). Evaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'estuaire de Bou Regreg (Côte atlantique, Maroc). *J. Mater. Environ. Sci*, **6**(11), 3338-3345, <https://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol6-11.html>
- Ouro-Sama K., Solitoke H. D., Tanouayi G., Lazar I. M., Bran P., Nadejde M., Badassan T. E.-E., Ahoudi H., Nyametso A. Y., Gnandi K., Lazar G. O. (2021). Spatial and seasonal variation of trace elements contamination in the sediments of a tropical lagoon system: The Lake Togo-Lagoon of Aného complex (southern Togo). *Environmental Earth Sciences*, **80**, 1-22, <https://www.x-mol.com/paperRedirect/1359655914572124160>
- Rashed M.N. (2001). Monitoring of Environmental heavy metals in fish from Nasser Lake, Egypt. *Environment Internationa*, **27**, 27-33, [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00050-2)
- Rezaie-Boroon M. H., Gnandi K. et Tomety Mensah K. F. (2011). Presence and distribution of toxic trace elements in water and sediments of the southern Togo Rivers watershed, West Africa. *Fresenius Environmental Bulletin*, **20**(7a), 1861-1873, https://www.prt-parlar.de/download_feb_2011/
- Rudnick R., Gao S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise Geochem*, **3**, 1-64, <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Smith W. and Javad H. (2003). Foundations of Materials Science and Engineering. Edition McGraw-Hill Professional. ISBN : 0-07-292194-3, p223.
- Toure M., N'guessan A. Y., et Konan E. K. (2018). Etude géochimique des sédiments superficiels d'une baie lagunaire et son impact sur l'environnement : Cas de la baie d'Abouabou (lagune Ebrié; Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **12**(5), 2371-2380, <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i5.35>
- Traore A., Soro G., Kouadio E. K, Bamba B.S., Oga MS, et Soro N. et Biemi J. (2014). Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune ghien (Sud-Est de la Cote d'Ivoire). *Afrique Sc. Revue Internationale et Technologie*, **10**(3), 73-88, <http://www.afriquescience.info/document.php?id=3720>
- UNESCO. (2008). Programme PCCP : Potential Conflit to Coopération Potent, cas du bassin du Mono 65 p.
- Wognin A. V., N'guessan Y. M., Assalé F. J. P., Aka A. M., Coulibaly A. S., Monde S. et Aka K. (2017). Les éléments traces métalliques dans la lagune Ebrié : distribution saisonnière, niveau de contamination et qualité environnementale des sédiments. *International Journal of Biological and Chemical Science*, **11**(2), 911-923, <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i2.30>
- Yi Y., Yang Z. et Zhand S., (2011). Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environ. Pollut.*, **159**(10), 2575-2585, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.011>