



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Evaluation de la contamination par les métaux lourds (Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb) des sédiments du bassin du lac Léré, Mayo-Kebbi Ouest, Tchad

Tchinfanbe SOUAREBA^{1,2,3*}, Jean-Claude DOUMNANG¹, Parfait RONDOUBA^{1,4},
Mianpereum TARKODJIEL² et Yaya MAHMOUT²

¹Laboratoire de Recherche en Hydro-Géosciences et Réservoirs (LHGR), Université de N'Djamena BP 1027, Tchad.

²Laboratoire de Recherche sur les Substances Naturelles – Département de Chimie, Université de N'Djaména BP 1027, Tchad.

³Université de Moundou, BP 206, Tchad.

⁴Institut National Supérieur du Sahara et du Sahel d'Iriba, BP 6430, Tchad.

*Auteur correspondant ; E-mail : tchinfanbesouareba@mail.com ; Tel : +235 62754480.

Received: 24-02-2024

Accepted: 19-04-2024

Published: 30-04-2024

RESUME

Les activités anthropiques sont à l'origine des émissions des éléments métalliques qui contribuent à la dégradation de la qualité des sédiments des milieux lacustres. Dans le but de caractériser l'état de la qualité des sédiments du bassin du lac Léré, site centré entre 9,37° de longitude Nord et 14,10° de latitude Est, Département du Mayo-Kebbi Ouest et de constituer une base des données relatives aux métaux lourds, cette présente étude visait à évaluer l'état de contamination des sédiments de ce bassin par les métaux lourds à savoir l'aluminium (Al), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le zinc (Zn), le chrome (Cr), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb). Tout d'abord, ces éléments métalliques ont été analysés dans l'extrait par la méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique (Band HACH Lange GmbH) de marque DR 6000. Les résultats ont montré que les différentes teneurs des métaux varient peu et restent inférieures aux teneurs du fond géochimique. Néanmoins, la plus importante variation est observée pour le Mn (2,50 mg/kg en S5 à 134,50 mg/kg en S1). Globalement, on retient que les sédiments du bassin du lac Léré étaient faiblement pollués (IPS = 4,65). Cette trace de pollution observée serait due à un enrichissement important des sédiments en élément Cd et Ni enregistré (Cd : 10,39 et Ni : 3,24). Par rapport à l'ordre d'enrichissement moyen on peut retenir que : Cd > Ni > Cr > Zn > Al > Pb > Fe . Il faut noter que les sédiments du bassin du lac Léré étaient non contaminés et ne présentaient pas de risque écologique considérable quel que soit l'enrichissement observé pour le Cd et Ni. Dans la plupart des stations et par rapport aux autres éléments analysés, l'aluminium, le fer et le plomb étaient des éléments les moins présents dans les sédiments du bassin du lac Léré (Igeo < 0).

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Métaux lourds, contamination, sédiments, lac-Léré, Mayo-Kebbi Ouest, Tchad.

ABSTRACT

Anthropogenic activities are responsible for emissions of metallic elements that contribute to the degradation of sediment quality in lake environments. In order to characterize the state of sediment quality in the Lac Léré basin, a site centered between 9.37° North longitude and 14.10° East latitude, West Mayo-Kebbi Department, and to build up a database on heavy metals, this study aimed to assess the state of contamination of

sediments in this basin by the heavy metals aluminum (Al), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), zinc (Zn), chromium (Cr), cadmium (Cd) and lead (Pb). Firstly, these metallic elements were analyzed in the extract by the colorimetric method using a DR 6000 atomic absorption spectrophotometer (Band HACH Lange GmbH). The results showed that the various metal contents vary little and remain below the geochemical background levels. Nevertheless, the greatest variation is observed for Mn (2.50 mg/kg in S5 to 134.50 mg/kg in S1). Overall, sediments in the Lac Léré basin were found to be slightly polluted (SPI = 4.65). This trace of pollution is due to the significant enrichment of sediments in the elements Cd and Ni recorded (Cd: 10.39 and Ni: 3.24). In relation to the average order of enrichment, Cd > Ni > Cr > Zn > Al > Pb > Fe. It should be noted that the sediments in the Lac Léré basin were uncontaminated and do not present a considerable ecological risk, whatever the enrichment observed for Cd and Ni. In most stations and compared with the other elements analyzed, aluminum, iron and lead were the least present elements in the sediments of the Lac Léré basin (Igeo < 0).

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Heavy metals, contamination, sediments, Lake Léré, Mayo-Kebbi West, Chad.

INTRODUCTION

La contamination des sédiments des milieux lacustres est une préoccupation majeure. A cette situation, s'ajoute le problème lié au réchauffement climatique qui modifie les propriétés chimiques des métaux lourds pour favoriser leur accumulation en particulier dans les matrices sédimentaires. Parmi les principaux polluants des lacs, on retrouve le plus souvent les métaux lourds tels que : l'Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cu, As, Cr, Cd, Pb, Hg donc certains d'entre eux (Cd, Pb, Mg, As et Cr) sont très toxiques à faible dose. Les métaux lourds sont à l'origine d'un déséquilibre dans les systèmes aquatiques et de nombreuses maladies cancérogènes (Louise, 2008). Ils affectent le cycle de reproduction des espèces aquatiques rendant ainsi leur multiplication difficile voire même impossible (Mounia, 2013). C'est peut-être ce problème qui serait à l'origine de la disparition des nombreuses espèces des milieux aquatiques aujourd'hui.

Le lac Léré ayant comme principaux bassins versants le Mayo Kebbi, l'El-Ouaya et le Mayo Binder n'échappe pas au risque de contamination par les polluants métalliques. Le bassin a subi une forte pression humaine et connaît une explosion démographique avec un taux d'accroissement naturel de 2,6% au cours de ces deux dernières décennies (Passinring, 2016). A cet effet, les activités de l'agriculture deviennent de plus en plus intenses (Passinring, 2008, 2016) pouvant générer des métaux lourds dans le lac ; Les déchets domestiques peuvent introduire d'importantes quantités de

substances contenant des métaux lourds. Plusieurs recherches dans les domaines de la géologie (Baldal et al., 2013) et de la géographie (Beagoubé, 2011) ont relevé que la nature, les propriétés et la dynamique des sols et des roches de la zone de Léré sont susceptibles de provoquer leurs altérations entraînant ainsi une accumulation progressive des métaux lourds dans les sédiments (Nadjiam, 2011).

Cependant, il faut noter que le bassin du lac Léré n'a fait l'objet d'aucune étude dans le domaine de l'évaluation des métaux lourds. Ainsi, notre travail s'inscrit dans l'objectif d'évaluer dans un premier temps la teneur en quelques métaux lourds à savoir l'Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb et de déterminer dans une deuxième phase les différents indices de contamination de ces éléments dans les sédiments du bassin du lac Léré afin de constituer une base des données relatives à ces éléments nuisibles.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

Le lac Léré, site d'étude centré sur 9,37° de longitude Nord et 14,10° de latitude Est, est l'un de 5 départements du Mayo-Kebbi Ouest avec une superficie d'environ 40 km² (Passinring, 2008). Ce lac est alimenté principalement par le fleuve Mayo-Kebbi et des autres sources temporaires à savoir l'El-Ouaya et le Mayo Binder en période de pluie qui se jette ensuite dans la Bénoué, bassin du Niger. A Léré, on distingue une saison sèche

qui s'étend de novembre à mars et une saison de pluie allant d'avril à octobre. La pluviosité moyenne à Léré est de 850 mm par an, avec un maximum en août. L'évaporation moyenne est de l'ordre de 3 m par an. A Léré, les principales activités de la population sont : l'agriculture, la pêche, l'élevage, le commerce et l'artisanat. La population de Léré est estimée à plus de 226 000 habitants (Passinring, 2016).

Matériel

Les sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne, il s'agit des sédiments superficiels. Immédiatement prélevés, des mesures *in situ* de la conductivité électrique et du pH ont été effectuées à l'aide d'un multi paramètre HANNA de marque HI 8915 et ensuite les échantillons sont collectionnés dans les emballages neufs et placés dans des sacs en polyéthylène (Rodier et al., 2009). Cependant, le séchage à haute température (100°C) des échantillons pourrait induire une modification importante de leurs caractéristiques et n'est par conséquent pas adapté à cette étude (Rodier et al., 2009). Ainsi, les échantillons ont été séchés dans les conditions de température du laboratoire entre 20 et 30°C après le quartage (Ngaram, 2011). Ensuite nous avons effectué tour à tour le broyage et le tamisage. Un tamis de 120 µm de maille de marque NFX31-101 a été utilisé à cet effet.

Méthodes

Extraction et dosage des métaux lourds

Les différents échantillons des sédiments ont été soumis à l'attaque d'un mélange d'acide HCl + HF à 1N après calcination à 550°C (Nicolas, 2007) afin de solubiliser toutes les formes des métaux et surtout ceux liés aux minéraux silicatés (Kouakou et al., 2021). Les résidus ont été dissous dans de l'eau régale (HCl + HNO₃ à 1N 1/3 v/v) et les échantillons ont été filtrés. Le volume était ramené ensuite à 50 mL par l'ajout d'eau déminéralisée (Kouakou et al., 2021). Les éléments Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb ont été dosés selon la méthode colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre (Band HACH Lange GmbH) de marque DR6000 et DR3900. A cet effet, deux cuves de

25 mL ont été utilisées dont l'une contenant 10 mL d'échantillon analytique et l'autre 10 mL d'une solution d'étalon. Après avoir étalonné correctement, les 10 mL d'échantillons préparés sont introduits dans une enceinte du spectrophotomètre et la concentration mesurée en mg/L s'affiche à l'écran de l'appareil. Par la suite, les concentrations des ETM ont été exprimées en mg/kg ou µg/kg de sédiment sec.

Détermination des indices de contamination

Pour évaluer l'état de la contamination des sédiments superficiels du bassin du lac Léré, plusieurs indices ont été déterminés il s'agissait de : le facteur d'enrichissement, l'indice de charge polluante, le facteur de contamination ou le degré de pollution sédimentaire, l'indice de géo-accumulation et l'indice des risques écologiques.

Le facteur d'enrichissement et l'indice de pollution sédimentaire (IPS) : Les facteurs d'enrichissement (EF) ont été calculés au niveau de chaque site et pour chaque métal à partir de la formule :

$$EF = \frac{tMe/tMn \text{ (sédiments)}}{t'Me/t'Mn \text{ (référence)}}$$

Où tMe est la teneur (mg/kg) du métal dans le sédiment et t'Me la teneur du même métal dans le fond géochimique de la zone d'étude ; tMn est la teneur (mg/kg) du métal (choisi comme métal de référence normalisant) dans le sédiment et t'Mn la teneur (mg/kg) du même métal de référence dans le fond géochimique de référence. Pour notre étude, le manganèse a été choisi comme métal de référence. Ici par manque des données de référence dans la zone d'étude, nous avons choisi la croute continentale supérieure comme fond géochimique de référence et tous les calculs ont été effectués à partir de celui-ci. Le facteur d'enrichissement permet de discriminer les causes anthropiques et naturelles des émissions des métaux lourds dans les sédiments (Miguel et Salvarredy, 2008). Ainsi, on n'observe aucun enrichissement lorsque $EF \leq 1$; Enrichissement mineur si $1 < EF \leq 3$; Enrichissement modéré si $3 < EF \leq 5$; Enrichissement modéré sévère si $5 < EF \leq 10$; Enrichissement sévère si $10 < EF \leq 25$; Enrichissement très sévère si $25 < EF \leq 50$.

L'indice de pollution des sédiments introduit par Müller (1969) (Batoul, 2018) étant défini comme la fonction linéaire de la somme des facteurs d'enrichissement. Il permet d'évaluer la qualité globale des sédiments en tenant compte des facteurs de toxicité de chaque métal analysé. Il est calculé à partir de la formule :

$$IPS = \frac{\sum_1^n (FE_i \times W_i)}{\sum_1^n W_i}$$

Où W_i est le facteur de toxicité du métal et FE_i le facteur d'enrichissement. $0 \leq IPS < 2$: sédiment sain ; $2 \leq IPS < 5$: sédiment faiblement pollué ; $5 \leq IPS < 10$: sédiment moyennement pollué ; $10 \leq IPS < 20$: sédiment très pollué et $IPS \geq 20$ sédiment dangereux.

Le facteur de contamination (FC) et l'indice de charge polluante (PLI) : Le facteur de contamination ou FC est l'un des facteurs permettant d'évaluer la contamination d'un métal analysé dans un sédiment (Mohamed et al., 2013 ; Nadem et al., 2015 ; Batoul, 2018). Il est calculé en divisant la teneur d'un métal analysé dans le sédiment par la teneur du même métal dans le fond géochimique de référence. Les équations suivantes développées par Tomlinson et al. (1980) (Batoul, 2018) ont permis de calculer respectivement le FC et PLI.

$$FC = \frac{tMe (\text{sédiment})}{tMe (\text{référence})}$$

Si $FC < 1$, il n'y a pas de contamination issue des apports anthropiques ; si $1 < FC < 3$, le sédiment est modérément contaminé ; si $1 < FC < 3$, le sédiment est considérablement contaminé ; si $6 < FC$, le sédiment est fortement contaminé.

$$IPS = \sqrt[n]{\prod_1^n FC_i}$$

Si $PLI = 0$: pas de détérioration ; si $PLI = 1$: niveau de référence ; si $PLI > 1$: détérioration progressive du sédiment.

L'indice de géo-accumulation (Igeo) : Un autre facteur d'évaluation de la contamination métallique des sédiments peut être calculé, il s'agit de l'indice de géo-accumulation noté Igeo. L'Igeo a été introduit

par Muller (1969) (Batoul, 2018) dans le but de déterminer le degré de contamination métallique dans les sols. Il est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{geo} = \text{Log}_2\left(\frac{C_i}{1,5 \times B_n}\right)$$

- ✓ Igeo : indice de géo-accumulation sans dimension ;
- ✓ C_i : concentration d'un métal mesurée dans le sédiment (mg/kg) ;
- ✓ B_n : concentration du même métal dans le fond géochimique ;
- ✓ 1,5 : facteur de correction du fond géochimique.

L'indice de risque écologique potentiel (RI) et les indices de risque écologique individuel (E_r^i) : cet indice est introduit pour évaluer le degré de risque écologique des ETM dans les sédiments. Les valeurs de RI se calculent à partir des formules de Håkanson (1980) suivantes :

$$RI = \sum_1^n E_r^i = \sum_1^n T_f^i \times C_f^i = \sum_1^n T_f^i \times \frac{C_D^i}{C_R^i}$$

Avec T_f^i : facteur de toxicité d'un métal ; $C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i}$: coefficient de contamination ; C_D^i : concentration du métal dans le sédiment non pollué et C_R^i : concentration du même métal dans l'échantillon.

RESULTATS

Variation du pH et de la conductivité électrique (CE).

La Figure 2 représente la variation du pH et de la conductivité dans les sédiments du bassin du lac Léré en fonction des points de prélèvement. L'analyse de variance montre une différence non significative pour le pH et une différence significative pour la CE à un seuil de 95%. Le pH varie de 5,9 (S2) à 7,1 (S1 et S7) avec une moyenne de 6,7 proche de la neutralité. La valeur moyenne du pH des sédiments du bassin du lac Léré est proche de 7 (pH neutre). Les plus fortes valeurs de la conductivité électrique sont obtenues au niveau des stations S2 (227 $\mu\text{S/cm}$), S4 (264 $\mu\text{S/cm}$), S6 (217 $\mu\text{S/cm}$) et S7 (246 $\mu\text{S/cm}$) avec une moyenne de 179,125 $\mu\text{S/cm}$. La valeur

moyenne de la conductivité électrique des sédiments du bassin du lac Léré est de l'ordre de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Variation de la teneur en métaux lourds.

Les variations des teneurs en métaux lourds exprimées en mg/kg ou en $\mu\text{g}/\text{kg}$ des sédiments superficiels du bassin du lac sont représentées dans la Figure 3.

La teneur en Al variait de 0,09 mg/kg (S5) à 2,93 mg/kg (S6) avec une moyenne de 0,83 mg/kg ; cette variation est significative à un seuil de 95%. La teneur en Fe variait de 1,30 mg/kg (S4) à 19,65 mg/kg (S6) avec une moyenne de 4,39 mg/kg ; cette variation est significative à un seuil de 99%. La teneur en Mn variait de 2,50 mg/kg (S5) à 134,50 mg/kg (S1) avec une moyenne de 42,44 mg/kg. La différence de teneur en Mn est hautement significative à un seuil de 99% entre les points de prélèvement. La teneur en Ni variait de 0 mg/kg (S1) à 1,85 mg/kg (S5) avec une moyenne de 1,03 mg/kg. La différence est significative à un seuil de 95%. La teneur en Zn variait de 0,15 mg/kg (S3) à 4,60 mg/kg (S6) avec une moyenne de 1,45 mg/kg. La différence est significative à un seuil de 95%. La teneur en Cr variait de 0,20 mg/kg (S2 et S4) à 3,90 mg/kg (S6) avec une moyenne de 1,05 mg/kg. La différence est significative à un seuil de 95%. La teneur en Cd variait de 3,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (S8) à 32,00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (S4) avec une moyenne de 13,56 $\mu\text{g}/\text{kg}$. La différence est significative à un seuil de 95%. La teneur en Pb variait de 1,45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (S3) à 11,65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (S1) avec une moyenne de 3,86 $\mu\text{g}/\text{kg}$. La différence est significative à un seuil de 95%.

Contamination des sédiments par les métaux lourds

Facteurs d'enrichissement (FE) et indice de pollution sédimentaire (IPS)

Les résultats du calcul des facteurs d'enrichissement des sédiments du bassin du lac Léré ont montré que le Fe et le Pb ne présentaient aucun enrichissement dans la plupart des points $FE < 1$. L'Al et le Zn présentaient un enrichissement mineur dans les stations S7 et S6. Le Ni présentait un enrichissement mineur dans les stations S3, S5 et S6. Comme le Ni, le Cr présentait aussi un

enrichissement mineur au niveau des stations S3, S4, S6 puis un enrichissement sévère au niveau des stations S4 ($FE = 12,9$) et S8 ($FE = 6,45$). Cependant, le Cd, un métal toxique, présentait un enrichissement mineur à la station S6, un enrichissement modéré au niveau des stations S2 ($FE = 3,39$) et S8 ($FE = 3,5$) puis un enrichissement modérément sévère au niveau des points S3 ($FE = 5$), S5 ($FE = 4,59$) et très sévère au point S4 ($FE = 64$).

Les valeurs enregistrées de l'IPS dénotent que les sédiments des stations S1 ($IPS = 0,09$), S6 ($IPS = 0,76$) et S7 ($IPS = 0,47$) étaient sains, les sédiments des stations S2 ($IPS = 1,5$) et S8 ($IPS = 1,99$) étaient faiblement pollués, les sédiments des stations S3 ($IPS = 2,28$) et S5 ($IPS = 2,14$) étaient moyennement pollués et en fin les sédiments du point S4 étaient très pollués ($IPS = 27,99$).

Facteurs de contamination (FC) et indice de charge polluante (PLI)

Le Tableau 6 indique les valeurs des facteurs de contamination et les valeurs des indices de charge polluante des métaux lourds dans les sédiments en fonction des différentes stations de prélèvement. Ces valeurs restent inférieures à 1. Par rapport au facteur de contamination, on observe que : $\text{Cd} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Fe} > \text{Al}$. Comparé aux autres points, le point S6 est retenu comme le plus chargé en métaux lourds. Ainsi, $\text{S6} > \text{S7} > \text{S1} = \text{S2} = \text{S3} = \text{S4} = \text{S5} = \text{S8}$.

Indices de géo-accumulation ($I_{\text{géo}}$)

La Figure 4 présente les valeurs des indices de géo-accumulation en fonction des stations de prélèvement. Les indices de géo-accumulation étaient tous inférieures à 0. Au niveau de S1, le manganèse et le zinc dominaient : $I_{\text{géo_Mn}} (-2,42) > I_{\text{géo_Zn}} (-6,23) = I_{\text{géo_Cr}} (-6,23) = I_{\text{géo_Cd}} (-6,23) > I_{\text{géo_Pb}} (-11,29) > I_{\text{géo_Fe}} (-13,87) > I_{\text{géo_Al}} (-17,19)$. Au niveau de S2, le cadmium et le chrome dominaient et le plomb était le moins présent : $I_{\text{géo_Cd}} (-4,06) > I_{\text{géo_Cr}} (-4,23) > I_{\text{géo_Mn}} (-5,74) > I_{\text{géo_Ni}} (-6,23) > I_{\text{géo_Zn}} (-8,97) > I_{\text{géo_Pb}} (-13,87) > I_{\text{géo_Fe}} (-14,61) > I_{\text{géo_Pb}} (-17,93)$. Au niveau de S3, le cadmium et le nickel dominaient et les éléments les moins présents étaient le fer et

l'aluminium : $Igéo_Cd (-4,42) > Igéo_Ni (-5,64) > Igéo_Cr (-6,23) > Igéo_Mn (-6,74) > Igéo_Zn (-8,97) > Igéo_Pb (-14,02) > Igéo_Fe (-14,87) > Igéo_Al (-18,19)$. Au niveau de S4, le cadmium et le nickel dominaient : $Igéo_Cd (-2,22) > Igéo_Ni (-4,64) > Igéo_Cr (-7,38) > Igéo_Mn (-8,23) > Igéo_Zn (-8,97) > Igéo_Pb (-13,87) > Igéo_Fe (-15,19) > Igéo_Al (-18,51)$. Au niveau de S5, le cadmium et le nickel dominaient : $Igéo_Cd (-3,14) > Igéo_Ni (-3,91) > Igéo_Mn (-5,38) > Igéo_Cr (-7,23) = Igéo_Zn (-7,23) > Igéo_Pb (-13,87) > Igéo_Fe (-14,61) > Igéo_Al (-20,52)$. Au niveau de S6, le cadmium et le chrome dominaient : $Igéo_Cd (-3,64) > Igéo_Cr (-3,77) > Igéo_Zn (-4,23) = Igéo_Ni (-4,23) = Igéo_Mn (-4,28) > Igéo_Fe (-11,29) > Igéo_Pb (-11,87) > Igéo_Al (-15,19)$. Au niveau de S7, le cadmium et le manganèse dominaient : $Igéo_Cd (-2,64) = Igéo_Mn (-2,64) > Igéo_Zn (-4,23) > Igéo_Cr (-4,91) >$

$Igéo_Mn (-4,28) > Igéo_Fe (-13,87) > Igéo_Pb (-13,87) > Igéo_Al (-16,19)$. Au niveau de S8, le nickel et le zinc dominaient : $Igéo_Ni (-4,42) > Igéo_Zn (-4,64) > Igéo_Cd (-5,23) > Igéo_Cr (-6,23) > Igéo_Mn (-7,23) > Igéo_Pb (-13,87) > Igéo_Fe (-14,87) > Igéo_Al (-18,52)$. Dans la plupart des stations, le plomb, le fer et l'aluminium étaient les métaux les moins présents dans les sédiments.

Indices de risque écologique individuel (E_i^I) et de risque écologique potentiel (RI)

Le Tableau 7 présente les valeurs des indices de risque écologique potentiel et des valeurs de risque écologique individuel pour chaque station d'échantillonnage. Les valeurs sont largement intérieures à 40. Ce qui permet de conclure que toutes les stations ne présentent aucun risque écologique lié aux émissions des métaux lourds pendant cette période.

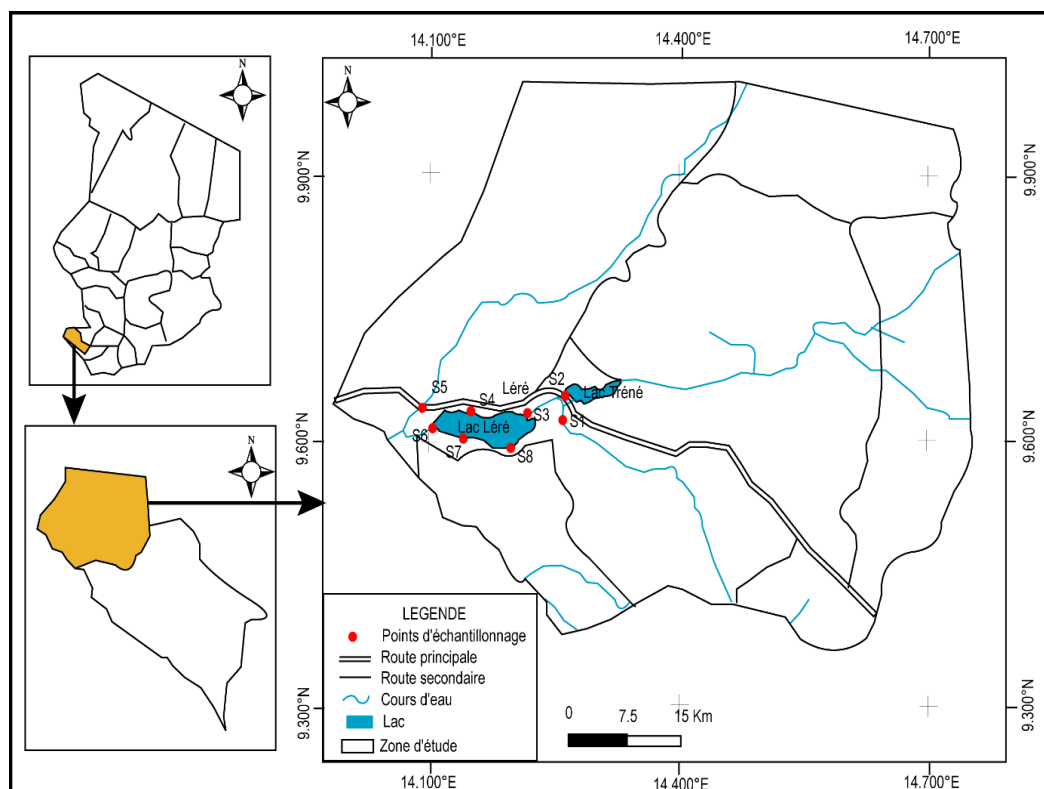


Figure 1 : Géolocalisation de la zone d'étude et des points d'échantillonnage.

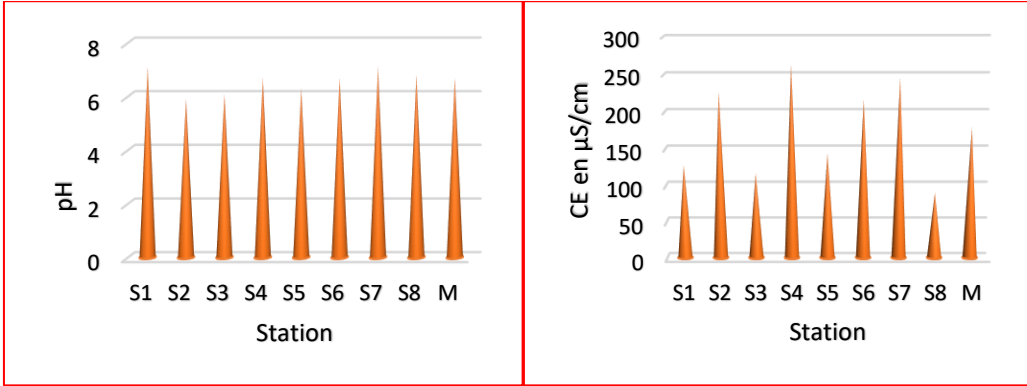
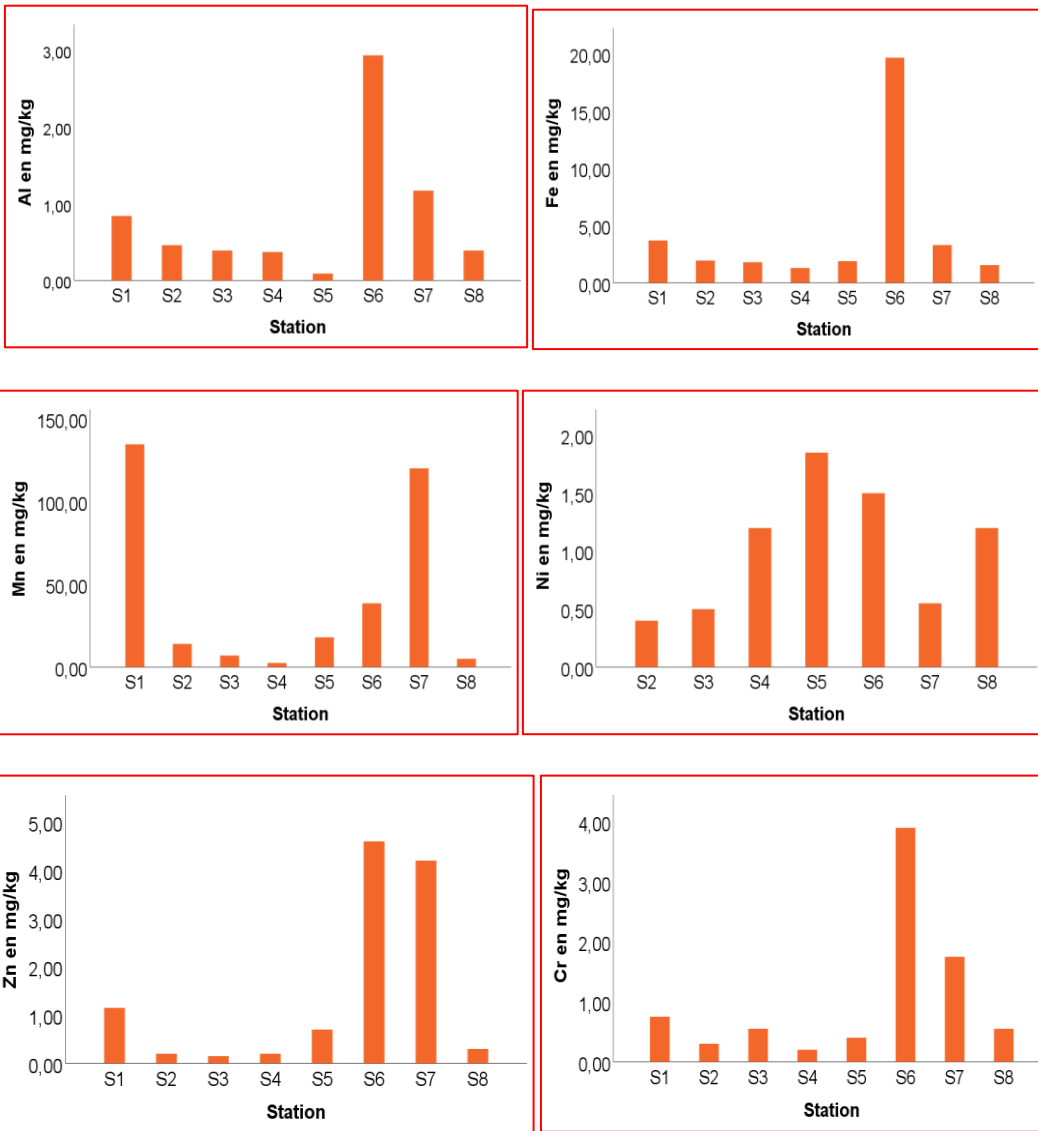


Figure 2 : Variation du pH et de la conductivité électrique dans les sédiments du bassin du lac Léré.



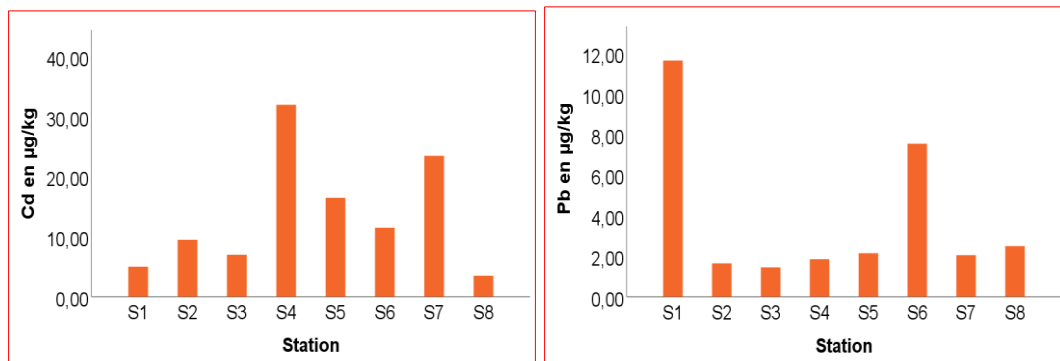


Figure 3 : Variation des teneurs en métaux lourds : Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb analysés dans les sédiments du bassin du lac Léré en fonction des différentes stations de prélèvement.

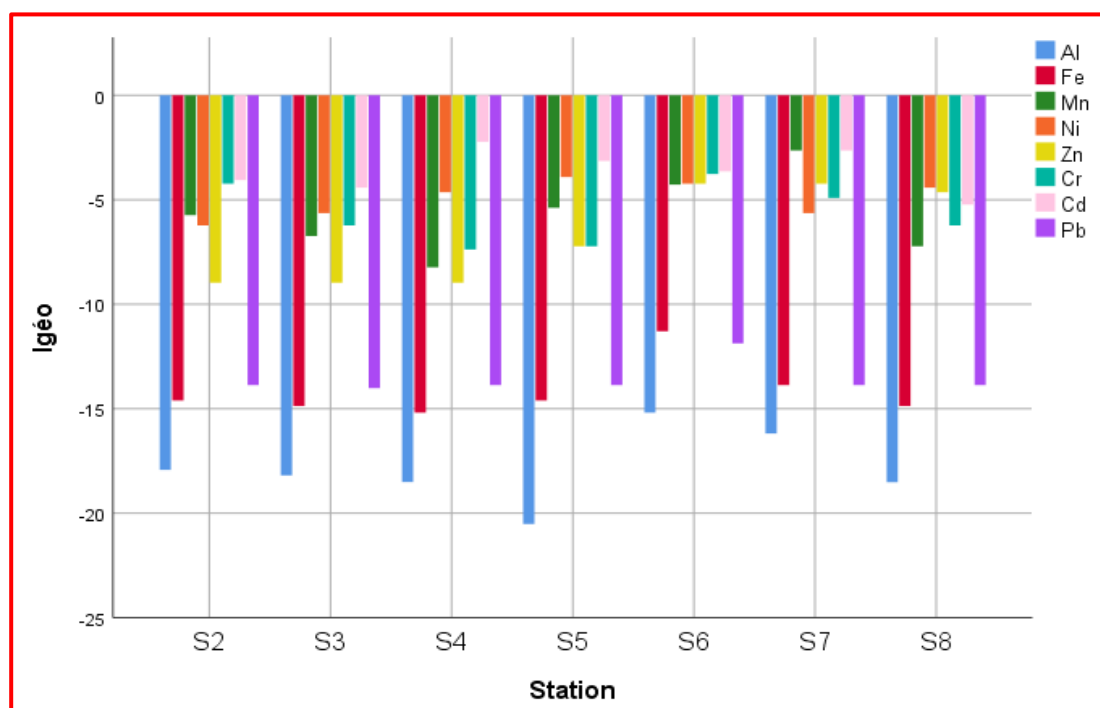


Figure 4 : Variation des indices de géo-accumulation des métaux lourds en fonctions des stations de prélèvement.

Tableau 1: Coordonnées géographiques des points de prélèvement.

Station	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Localité	El-Ouaya	Pont-Lao	V. Léré	Dissing	Mayo Binder	Poyeme	Mourbame	Doue
Longitude	9,6278	9,6548	9,6326	9,6334	9,6437	9,6160	9,6065	9,5954
Latitude	14,2583	14,2583	14,2132	14,1458	14,0959	14,1007	14,1371	14,1965

Tableau 2 : Classification de la qualité des sédiments selon Müller (1969) (Batoul, 2018).

Valeur	Classe	Qualité de sédiment
$I_{géo} \leq 0$	0	Non pollué
$0 < I_{géo} \leq 1$	1	Non pollué à modérément pollué
$1 < I_{géo} \leq 2$	2	Modérément pollué
$2 < I_{géo} \leq 3$	3	Modérément pollué à fortement pollué
$3 < I_{géo} \leq 4$	4	Fortement pollué
$4 < I_{géo} \leq 5$	5	Fortement pollué à extrêmement pollué
$I_{géo} \geq 5$	6	Extrêmement pollué

Tableau 3 : Classification de la qualité des sédiments selon les valeurs de Er et RI (Batoul, 2018)

E_r^i	Qualité de sédiment	RI	Qualité de sédiment
≤ 40	Faible risque écologique	≤ 150	Faible potentiel écologique
$40 < E_r^i \leq 80$	Risque écologique modéré	$150 < RI \leq 300$	Potentiel écologique modéré
$80 < E_r^i \leq 1600$	Risque écologique élevé	$300 < RI \leq 600$	Potentiel écologique élevé
$160 < E_r^i \leq 320$	Risque écologique très élevé	> 600	Potentiel écologique sévère
> 320	Risque écologique sévère		

Tableau 4 : Etudes comparatives de la variation des teneurs (mg/kg) en métaux lourds dans les sédiments.

Sédiments	Al	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr	Cd	Pb	Références
Bassin du lac Léré, Tchad	0,83	4,39	42,44	1,03	1,45	1,05	0,013	0,038	Présent travail
Chari, Logone Tchad	nd	2,601	0,6	<0,005	nd	0,166	<0,025	0,054	Digue et al., (2023)
Région du Kanem, Tchad	9,25	11,44	0,18	29,97	65,77	50,65	0,45	9,86	Vicat et Doumnang, (2023)
Oued Cheliff, Algérie	1563,8	1073,0	484,4	88,8	270,1	119,8	3,6	3,6	Batoul, (2018)
Rivière N'zi, Côte d'Ivoire	nd	nd	nd	1,66	3,16	nd	0,49	0,65	Ahbeauriet et al., (2021)
Lac Tchad, Tchad	nd	nd	nd	nd	nd	9,09	nd	nd	Kayalto, (2009)
Oueds Rémir, Tunisie	nd	47765	906	nd	26903	68	73	15677	Haifa et Abdallah, (2014)
Littoral Nord-Ouest, Maroc	nd	nd	nd	20,04	25,72	223,06	0,50	48,86	Coulibaly et al., (2014)
Sassandra, Côte d'Ivoire	nd	35.52	77.09	nd	45.89	nd	0.26	47.91	Kouakou et al., (2021)

Nangbeto Lake, Togo	nd	nd	nd	8,61	nd	6,54	0,04	6,95	Adje et al., (2021)
BarrageBéniHaroun,Algérie	nd	nd	nd	nd	75,72	nd	nd	37,66	Hamssa et al., (2018)
Guarapiranga, Brazil	nd	nd	nd	nd	83	76	nd	nd	Guiherme et al., (2011)

nd : non déterminée

Tableau 5 : Distribution des facteurs d'enrichissement des éléments métalliques (Al, Fe, Ni, Zn, Cr, Cd, Pb) analysés dans les sédiments en fonction des sites.

	Al	Fe	Ni	Zn	Cr	Cd	Pb	IPS
S1	0,09	0	0	0,08	0,08	0,19	0,002	0,09
S2	0,09	0,002	0,77	0,14	0,31	3,39	0,003	1,5
S3	0,08	0,004	1,92	0,21	1,12	5	0,006	2,28
S4	0,11	0,008	12,9	0,78	1,14	64	0,02	27,99
S5	0,02	0,002	2,76	0,37	0,32	4,58	0,004	2,14
S6	0,06	0,008	1,05	1,15	1,45	1,49	0,006	0,76
S7	2,68	0	0,12	0,34	0,21	0,98	0	0,47
S8	0,1	0,005	6,45	0,58	1,57	3,5	0,01	1,99
Moyenne	0,4	0,003	3,24	0,46	0,78	10,39	0,006	4,65

S1 : Station 1, S2 : Station 2, S3 : Station 3, S4 : Station 4, S5 : Station 5, S6 : Station 6, S7 : Station 7, S8 : Station 8,

Tableau 6 : Distribution des facteurs de contamination et des indices de pollution sédimentaire des éléments métalliques (Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd, Pb) analysés à différents points d'échantillonnage.

	Al	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr	Cd	Pb	PLI
S1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,28	0	0,02	0,02	0,05	6*10 ⁻⁴	0,003
S2	6*10 ⁻⁶	6*10 ⁻⁵	0,028	0,02	0,003	0,008	0,09	10 ⁻⁴	0,002
S3	5*10 ⁻⁶	5*10 ⁻⁵	0,014	0,03	0,003	0,02	0,07	9*10 ⁻⁵	0,002
S4	4*10 ⁻⁶	4*10 ⁻⁵	0,005	0,06	0,003	0,006	0,32	10 ⁻⁴	0,002
S5	10 ⁻⁵	6*10 ⁻⁵	0,036	0,1	0,01	0,01	0,17	10 ⁻⁴	0,002
S6	4*10 ⁻⁵	6*10 ⁻⁴	0,077	0,08	0,08	0,11	0,12	4*10 ⁻⁴	0,009
S7	2*10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,24	0,03	0,08	0,05	0,24	10 ⁻⁴	0,006
S8	4*10 ⁻⁶	5*10 ⁻⁵	0,01	0,07	0,006	0,02	0,04	10 ⁻⁴	0,002
Moyenne	1,1*10 ⁻⁵	1,3*10 ⁻⁴	0,086	0,049	0,026	0,031	0,138	2*10 ⁻⁴	0,0035

Tableau 7 : Distribution des valeurs des indices de risque écologique individuel (E_r^i) et de risque écologique potentiel (RI) selon différentes stations de prélèvement.

	E_r^i								RI
	Al	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr	Cd	Pb	
S1	0,00001	0,0002	1,14	0	0,02	0,04	1,5	0,018	2,72
S2	0,000006	0,00012	0,14	0,1	0,003	0,016	2,7	0,003	2,96
S3	0,000005	0,0001	0,07	0,15	0,003	0,04	2,1	0,0027	2,37
S4	0,000004	0,00008	0,025	0,3	0,003	0,012	9,6	0,003	9,94
S5	0,000001	0,00012	0,18	0,5	0,01	0,02	5,1	0,003	5,81
S6	0,00004	0,0012	0,39	0,4	0,08	0,22	3,6	0,012	4,7
S7	0,00002	0,0002	1,2	0,15	0,08	0,1	7,2	0,003	8,73
S8	0,000004	0,0001	0,05	0,35	0,006	0,04	1,2	0,003	1,65
Moyenne	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	0,39	0,24	0,025	0,061	4,12	0,006	4,86

DISCUSSION

Les résultats de mesure du pH indiquent que les sédiments du bassin du lac Léré étaient en moyenne neutres. Mais certains sites présentaient un léger caractère acide (S2, S3 et S6) ou basique (S1, S7 et S8). Ces mêmes propriétés sont obtenues dans le fleuve Chari (pH 7,1) (Digue et al., 2023). Cependant, Hamza et al. (2018) ont relevé les valeurs du pH plus basiques que les nôtres dans les Sédiments Du Barrage Béni Haroun en Algérie (pH 8,38). Ces différences peuvent s’expliquer par la nature des sols traversés par les eaux, mais aussi la présence ou non des activités susceptibles de modifier le pH du milieu (Kayalto, 2009). Un pH trop acide pourrait favoriser la solubilisation des métaux lourds. Tandis qu’une valeur de pH basique favoriserait leur adsorption sur les sédiments (Mounia, 2013).

Les valeurs de la conductivité des sédiments du lac Léré ont été relativement faibles comparées à la valeur de norme de l’OMS (2500 μ S/cm) (Batoul, 2018). Les sédiments du lac Léré contiendraient moins des ions libres ou échangeables en solution susceptibles de modifier la conductivité

électrique. Ces sédiments étaient en effet, faiblement minéralisés.

Les résultats de mesure des différentes teneurs en métaux lourds dans les sédiments du bassin du lac Léré laissent suggérer que leurs valeurs sont très faibles comparées aux valeurs dans le fond géochimique de la croûte continentale supérieure (Al : 77,2 mg/g ; Fe : 30,9 : mg/g ; Mn : 0,5 mg/g ; Ni : 18,6 mg/kg ; Zn : 52 mg/kg ; Cr : 35 mg/kg ; Cd : 0,1 mg/kg et Pb : 17 mg/kg) (Batoul, 2018). Ce qui témoigne de l’absence des activités industrielles et minières dans la zone d’étude. Les valeurs sont comparables à celles obtenues dans le fleuve du Chari à N’Djaména (Digue et al., 2023). Tout de même des valeurs des teneurs similaires aux nôtres ont été relevées dans les sédiments de la rivière N’Zi en Côte d’Ivoire (Abeauriet et al., 2021). Cependant, Kayalto (2009) a relevé une concentration en Cr allant de de 9,09 à 15,15 mg/kg, plus importante que la nôtre dans les sédiments du lac Tchad, Ce qui pourrait s’expliquer par l’accumulation des sédiments drainés en amont du Lac Tchad et d’importante évaporation des eaux du lac (Nadjiam, 2015). Des teneurs par exemples en Fe (28,5 g/kg) en Zn (118 mg/kg), en Cd (1 mg/kg) et en Pb (45

mg/kg) ont été enregistrées dans les sédiments des oueds Rémir et Siliana d'El Akhouat en Tunisie (Haifa et Abdallah, 2015). Ces différences études montrent que les sédiments du bassin du Lac Léré sont de qualité acceptable vis-à-vis de la contamination par des métaux lourds.

Toutefois, les sédiments du lac Léré s'enrichissent en Ni, Cr, et Cd. Ainsi, nous avons enregistré un enrichissement sévère et très sévère en Ni et Cd respectivement dans les stations S3, S4 et S5. Ce qui permet de constater une forte pollution particulièrement observée au niveau de ces stations. En effet, les activités agricoles utilisant des intrants chimiques et l'altération géochimique des sols et des roches peuvent être à l'origine de l'enrichissement des métaux lourds dans les sédiments. Les sédiments superficiels du bassin du lac Léré sont plus enrichis en ETM que ceux de la Lagune Potou en Côte d'Ivoire (Diangone et al., 2020). Dans ses travaux, Kouakou et al. (2021) ont obtenu un enrichissement similaire en Zn (0,24 mg/kg) dans les sédiments du sous bassin versant du fleuve Sassandra en Côte d'Ivoire avec un état de pollution globalement sévère. Tout de même, Vicat et Doumngang (2023) ont déterminé un enrichissement en Ni, en Cr, en Cd et en Zn dans les sédiments du Kanem semblable à celui obtenu dans notre travail. Ce résultat peut témoigner de la nature des activités anthropiques et des sols dans ces zones. Cependant, il faut aussi noter que les faibles teneurs enregistrées dans le bassin du lac Léré peuvent être dues à l'altération des sols et des roches. En effet, les altérations ou les érosions des roches et des sols sont à l'origine des émissions des métaux lourds dans les milieux aquatiques (Mounia, 2013 ; Batoul, 2018). Ces éléments métalliques une fois dans le milieu, peuvent interagir avec les matières en suspensions contenues dans le plan d'eau et se déposer ensuite dans le fond (Benjaline et Tara, 2020). Lorsque des conditions du milieu changent (pH, conductivité, température, MO, les minéraux...) les métaux peuvent se solubiliser et se mobiliser entre les phases solide et liquide (Blinda et al., 2013). Ce qui pourrait à cet effet représenter ultérieurement

un risque écologique majeur (Coulibaly et al., 2014).

En ce qui concerne la géo-accumulation des sédiments du bassin du lac Léré, les résultats montrent que les valeurs des Igéo étaient toutes inférieures à 0. En effet, les sédiments du bassin du lac Léré étaient en général non pollués. Par conséquent, ils ne présentaient pas de risque écologique considérable. Ces résultats corroboraient ceux obtenus par Digue et al. (2023) dans les sédiments du fleuve Chari à N'Djaména et par Vicat et Doumngang (2023) dans le sol de la région du Kanem. Une étude menée par Ahbeauriet et al. (2021) dans les sédiments de la rivière N'zi en Côte d'Ivoire a permis de relever aussi des faibles valeurs de l'Igéo des métaux à savoir le Ni, le Pb et le Zn comparables aux nôtres. Cependant, par rapport aux résultats de nos travaux, Adje et al. (2021) ont relevé une valeur de l'Igéo élevée en Pb dans les sédiments du lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto au Togo. Ce qui laisse suggérer une pollution modérée de ce lac, comparé au lac Léré.

Conclusion

Ce présent travail visait à évaluer l'état de la contamination par les métaux lourds (Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb) des sédiments du Bassin du Lac Léré (BLL). Tout de même, il faut noter que les teneurs en ces éléments métalliques restent faibles comparées aux teneurs dans le fond géochimique. Cependant, les sédiments superficiels du BLL s'enrichissent en Cd et Ni mais restent non contaminés et ne présentent pas de risque écologique considérable vis-à-vis de cet enrichissement. Toutefois, cet enrichissement pourrait devenir préoccupant car il s'agit d'un des éléments métalliques les plus toxiques. En effet, la connaissance de l'état de qualité des eaux de ce bassin et l'étude de la spéciation de ces éléments métalliques s'avèrent indispensables car ces métaux lourds pourraient se détacher des sédiments et exister dans le plan d'eau sous diverses formes chimiques.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Tous les auteurs ont contribué à la hauteur de leur position dans le présent article.

RÉFÉRENCES

- Adje K, Ouro-Sama K, Solitoke HD, Tanouayi G, Agbere S, Badassan TEE, Ahoudi H, Gnandi K. 2021. Assessment of trace elements contamination of Nangbeto Lake sediments (Togo). *Environnement, Ingénierie & Développement*, **85**: 12-25. DOI : <https://doi.org/10.46298/eid.2021.7304>
- Ahbeauriet AO, Naminata S, Koffi P, Koffi MY, Albert T, Thomas D. 2021. Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **15**(5): 2199-2208. DOI : <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i5.38>
- Baldal O, David B, Djetarem M. 2013. Étude sur les Ressources minières et pétrolières dans le Mayo Kebbi Ouest Tchad. *Rapport de mission* 98 p
- Batoul B. 2018. Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff (Algérie). Thèse de Doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, et Université de Mostaganem. 192 p
- Benjalil C, Tara G. 2020. Les métaux lourds. Citepa. Rapport édition 2020.
- Blinda M, Abdelkbir B, Mohamed F, Sayf Elislam B, Mohamed LM. 2013. Evaluation de la contamination métallique des sédiments et des eaux superficielles du littoral Nord-Ouest du Maroc. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, **35** : 43-49. DOI : [http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/01/07-%20Blinda%20et%20al.%20\(43-49\).pdf](http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/01/07-%20Blinda%20et%20al.%20(43-49).pdf)
- Coulibaly AS, Amani EM, Akobé AC, Monde S, Aka K, Gérard B. 2014. Caractérisation des Indices de Pollution (Igeo, Pli, Tec et Pec) d'un Environnement Estuarien à Forte Pression Anthropique : la Baie de Biétry (Côte d'Ivoire, Golf de Guinée). DOI : <http://10.15693/ijaist/2014.v3i12.135-139>.
- Diangone E, Yao AN, Loukala KMCT, Monde S, Coulibaly A. 2020. Evaluation de la Pollution Métallique des Sédiments Superficiels de la Lagune Potou en Période d'étiage (Littoral de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, **16** (33): 1857-7881 DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p70>
- Digue TM, Tinda D, Bertrand NG, Salomon MB, Dikdim DJM, Mianpereum T. 2023. Contamination and Potential Risks of Heavy Metals in the Sediments of the Chari and Logon Rivers in N'Djamena, Chad. *Open Journal of Soil Science*, **13**: 29-45. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2023.132002>
- Guilherme MG, Robson LF, Ana MGF, Paulo SCS, Déborah ITF. 2011. Enrichment factor and geoaccumulation index applied to sediment samples from the Guarapiranga reservoir, Brazil, for metal and trace element assessment. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2015.1318.1321>
- Haifa M, Abdallah BM. 2014. Contamination assessment of Remir and Siliana stream sediments by El Akhouat mine discharges (Siliana basin, North-western of Tunisia). *Geo. Eco. Trop.*, **38** (2) : 305-316.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*. **1980** (14): 975–1001. DOI : [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hamssa D, Saliha KN, Dounia K, Fatima ZAM. 2018. Teneurs Des Éléments Traces Métalliques Cu, Zn Et Pb Des Sédiments Du Barrage Béni Haroun (Nord Est Del'Algérie). DOI:

- <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p269>.
- Honoré Beakgoube. 2011. Gestions des lamantins des lacs de Léré : entre conservation des ressources naturelles et survie de la population. Master Géographie, Université de Sarh-Tchad.
- Kayalto B. 2009. Contribution à l'évaluation de la contamination par les métaux lourds, de trois espèces de poissons, des sédiments et des eaux du lac Tchad. Mémoire Master, université de N'Gaoundéré/Cameroun.
- Kouakou SK, Kouakou BK, Félix KK, Koffi CB, Kouassi LK. 2021. Pollution des eaux à usages domestiques par les éléments traces métalliques des activités anthropiques : cas du sous bassin versant du fleuve Sassandra en amont du barrage de Buyo, Côte d'Ivoire. *Proc. IAHS*, **384** : 85–92. DOI : <http://dx.doi.org/10.5194/piahs-384-85-2021>
- Louise SC. 2008. Analyses des affluents des lacs de la municipalité de Saint Faustin Lac-Carré printemps. Rapport 2008.
- Miguel M, Salvarredy A. 2008. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier 488 p.
- Mohammed B, Abdelkbir B, Mohamed F, Sayf EB, Mohamed ELM. 2013. Evaluation de la contamination métallique des sédiments et des eaux superficielles du littoral Nord-Ouest du Maroc. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, **35** : 43-49.
- Mounia C. 2013. Analyse et Spéciation des métaux dans un Oued en zone minière : Cas de l'Oued Essouk. Thèse Doctorat ès Sciences en Chimie. Université Constantine I, Algérie p146.
- Nadem S, El Baghdadi M, Rais J, Barakat A. 2015. Evaluation of heavy metal contamination of sediments of the estuary of the Bouregreg (Atlantic Coast, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.*, **6** (11) : 3338-3345. <http://www.jmaterenvironsci.com>
- Nadjiam D. 2013. Les ressources en sols du Tchad les actions prioritaires pour une gestion durable. Accra, Ghana. *Rapport*.
- Ngaram N. 2011. Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 166 P.
- Nicolas A. 2007. Dosage des métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et Hg) dans les sols par ICP-MS. *Annales de Toxicologie Analytique*, **19**(1). DOI : <https://doi.org/10.1051/ata:2007006>
- Passinring K. 2006. Milieux naturels et paysages du bassin – versant des lacs de Léré (MKO – Tchad). Thèse de doctorat, Université Aix – Marseille I, 306 p.
- Passinring K. 2016. Effets de l'écoulement des tributaires sur la dynamique des lacs de Léré (Mayo – Kebbi Ouest/Tchad). *Geo. Eco. Trop.*, **40** (3) : 191-200.
- Rodier J, Bernard L, Merletet NC. 2009. *L'Analyse de l'Eau pour Statistique* (9^e édition). Dunon : Paris ; 5600 p.
- Vicat JP, Doumnang MJC. 2023. Geochemical composition an heavy metals enrichment of pond sediments of the Kanem Region (Republic of Chad). *International Journal of Multidisciplinary Reseach and Publication*; ISSN (Online): 2581-6187.