

ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION MÉTALLIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN DU LAC LÉRÉ, PROVINCE DU MAYO-KEBBI OUEST, RÉPUBLIQUE DU TCHAD

**Tchinfanbe SQUAREBA^{1,2,3*}, Parfait RONDOUBA⁴,
Jean-Claude DOUMNANG MBAIGANE^{2,3},
Severin MBAIHOUGADOBE^{1,3}, Kedeu PASSINRING⁵
et Mianpereum TARKODJIEL^{1,3}**

¹ Université de Moundou, Laboratoire de Chimie, BP 206, Moundou, Tchad

² Université de N'Djamena, Laboratoire Hydro-Géosciences et Réservoirs, BP 1027, N'Djamena, Tchad

³ Université de N'Djaména, Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement, BP 1027, N'Djamena, Tchad

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

⁵ Université de N'Djaména, Département de Géographie, BP 1027, N'Djamena, Tchad

(reçu le 27 Juillet 2024; accepté le 04 Novembre 2024)

* Correspondance, e-mail : tchinfanbesouareba@gmail.com

RÉSUMÉ

Le bassin du lac Léré est exposé aux effets nuisibles des éléments métalliques qui proviennent à la fois des sources anthropiques et naturelles. L'objectif de cette étude porte sur l'évaluation de la contamination métallique des eaux du bassin du lac Léré, site centré précisément sur 9,37° de longitude Nord et 14,10° de latitude Est. Compte tenu des bassins versants, des activités environnantes et des sources de contamination, 8 sites ont été choisis pour cette étude. Les échantillons ont été prélevés en période de septembre 2023, période d'épandage des engrais et de traitement aux pesticides. Après traitement chimique (acidification et filtration) des échantillons, les éléments (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cr, Cd et Pb) ont été soumis à l'analyse spectrométrique à l'aide des spectrophotomètres d'absorption atomique DR 6000 et DR 3900. Les résultats montrent que les concentrations obtenues varient d'un métal à un autre et sont fonction des sites étudiés. Les concentrations moyennes enregistrées sont respectivement : 0,03 mgAl/L ; 0,94 mgFe/L ; 2,15 mgMn/L ; 0,29 mgNi/L ; 0,2 mgZn/L ; 0,18 mgCr/L ; 0,00635 mgCd/L et 0,00019 mgPb/L. Cependant, les métaux lourds (Ni, Mn, Fe, Cr et Cd)

présentent des concentrations supérieures aux normes préconisées des eaux douces. Par ailleurs, ces résultats indiquent que sur 8 sites étudiés, 7 (soit 87,5 %) sont contaminés par le fer et le cadmium et 8 (soit 100 %) sites sont contaminés par le manganèse, le nickel et le chrome. Par contre l'on ne note aucune contamination observée pour les éléments aluminium, zinc et plomb. On retient que les sites (S1, S2 et S5) sont les plus particulièrement enrichis en métaux traces. Les eaux naturelles du bassin du Lac Léré se caractérisent par une présence hors normes des éléments métalliques. Ces derniers proviennent principalement des bassins versants : le Mayo-Kebbi à l'Est, le Mayo-Binder au Nord-Ouest et l'El-Ouaya au Sud-Est Toutefois, les résultats obtenus permettront ainsi de mettre en place un système de traitement des eaux du bassin du lac Léré pour alimenter la population de la ville de Léré en eau acceptable pour la consommation.

Mots-clés : *Lac-Léré, Eléments métalliques, Contamination, Eaux, Mayo-Kebbi Ouest, Tchad.*

ABSTRACT

Assessment of metallic contamination of surface waters in the lake Lere basin, Mayo-Kebbi West Province (Republic of Chad)

The lac Lere basin is exposed to the harmful effects of metallic elements from both anthropogenic and natural sources. The aim of this study is to assess metal contamination in the waters of the lac Lere basin, a site precisely centered on 9.37° North longitude and 14.10° East latitude. Taking into account the watersheds, surrounding activities and sources of contamination, eight sites were chosen for this study. Samples were taken in September 2023, the period of fertilizer application and pesticide treatment. After chemical treatment (acidification and filtration) of the samples, the elements (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cr, Cd and Pb) were subjected to spectrometric analysis using DR 6000 and DR 3900 atomic absorption spectrophotometers. The results show that the concentrations obtained vary from one metal to another and depend on the sites studied. The average concentrations recorded are respectively: 0.03 mgAl/L; 0.94 mgFe/L; 2.15 mgMn/L; 0.29 mgNi/L; 0.2 mgZn/L; 0.18 mgCr/L; 0.00635 mgCd/L and 0.00019 mgPb/L. However, concentrations of heavy metals (Ni, Mn, Fe, Cr and Cd) exceeded recommended freshwater standards. Furthermore, these results indicate that of the eight sites studied, seven (or 87.5 %) are contaminated with iron and cadmium, and eight (or 100 %) are contaminated with manganese, nickel and chromium. However, no contamination was observed for aluminum, zinc or lead. Sites S1, S2 and S5 are the most particularly contaminated with metals. The natural waters of the

lac Lere basin are characterized by an unusual presence of metallic elements. These come mainly from the Mayo-Kebbi watershed in the east, the Mayo-Binder in the northwest and the El-Ouaya in the southeast. However, the results obtained will enable us to set up a water treatment system in the lac Lere basin to supply the population of the town of Lere with water that is acceptable for consumption.

Keywords : *Lac Lere, Metallic elements, Contamination, Water, Mayo-Kebbi West, Chad.*

I - INTRODUCTION

Les lacs constituent d'importantes réserves d'eau douce continentale et de ressources halieutiques [1]. Malheureusement, les activités anthropiques contribuent inévitablement à la dégradation de la qualité des eaux lacustres. Les lacs constituent les premiers réceptacles de tout effluent terrestre (déchets plastiques, eaux usées domestiques et industrielles, engrais, pesticides, ruisselât, etc.) [2]. La pollution métallique des milieux lacustres est devenue aujourd'hui un défi majeur. Il faut noter que les éléments métalliques sont hautement toxiques à faible concentration [3]. En effet, quelques $\mu\text{g/L}$ de plomb, cadmium, mercure, chrome, sélénium et arsenic, par exemple, suffisent pour intoxiquer un milieu et affecter ainsi le cycle de reproduction des espèces aquatiques [3, 4]. Les eaux superficielles quelles que soient leurs propriétés et leur nature, contiennent des polluants métalliques. L'utilisation d'eau contaminée par les éléments métalliques induit un problème d'écologie et de santé humaine grave [5]. C'est pourquoi aujourd'hui les éléments traces métalliques retiennent l'attention des scientifiques et gestionnaires du fait de leur persistance dans l'environnement et le danger qu'ils présentent pour les écosystèmes aquatiques et la santé humaine [6, 7]. Au Tchad, les lacs contribuent au développement économique du pays. En effet, les vastes plaines lacustres du pays contribuent essentiellement au développement des activités agricoles et de l'élevage [8]. Les eaux de consommation domestique et industrielle proviennent en grande partie des lacs, fleuves, rivières et nappes phréatiques. Malheureusement, ces eaux reçoivent quotidiennement des matières d'origine urbaine et industrielle contenant de forme de pollution métallique. Il faut noter qu'au Tchad, la plupart des agglomérations urbaines et les industries sont, en général, localisées à proximité des lacs et des sources d'eaux qui les alimentent (rivières et fleuves) [9]. Ces eaux sont le plus souvent vulnérables au réchauffement climatique. Ce dernier pourrait accélérer le mécanisme d'érosion et d'altération des sols et des roches pouvant ainsi générer des métaux lourds dans l'eau [10 - 12]. Tout de même, le lac Léré, site d'étude, n'échappe pas au risque de contamination métallique car des nombreuses activités sont pratiquées autour de celui-ci sans aucun contrôle [13].

En effet, l'exploitation et le traitement des minerais d'or et des calcaires, la production des déchets électroniques domestiques et d'eaux usées due au développement urbain de Léré, l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides en agriculture, le déversement des déchets par l'usine d'égrenage de coton, la combustion de la biomasse et les émissions routières constituent les quelques causes d'émission des éléments métalliques dans l'eau. Parallèlement à ces sources humaines, on note également quelques causes naturelles (érosion des sols, altération des roches, dissolution des minéraux, dépôts des aérosols, décomposition des matières d'origine animale et végétale, etc.) qui contribuent significativement aux émissions des éléments métalliques dans le bassin du lac Léré [13, 14]. Une étude a montré qu'environ 80 % de la population du Département du Lac Léré n'ont pas l'accès à l'eau potable [15]. Les populations utilisent et/ou consomment les eaux naturelles issues directement du lac Léré sans aucun système de contrôle et de traitement préalable. Ces eaux sont utilisées pour la consommation domestique, pour l'irrigation et pour l'abreuvement des animaux. Les utilisateurs des eaux naturelles du bassin du lac Léré pourraient cependant être soumis au risque d'intoxication par les métaux toxiques car ces eaux n'ont fait l'objet d'aucune évaluation des polluants métalliques. Dans le but de constituer des données relatives à la qualité des eaux du bassin du lac Léré, les concentrations des différents éléments métalliques peuvent être mesurées et comparées aux normes internationales préconisées. Cette étude a pour objectif d'évaluer la contamination des eaux du bassin du lac Léré par les éléments métalliques (Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb). Ce travail est structuré autour de l'introduction, la présentation de matériel et méthodes employés pour atteindre l'objectif, l'interprétation et la discussion de l'ensemble des résultats obtenus ainsi que la conclusion et le résumé qui tablent l'essentiel des résultats.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Milieu d'étude

II-1-1. Contexte géographique

Le bassin du lac Léré, situé à l'extrême Sud-Ouest du Tchad dans la Province du Mayo-Kebbi Ouest, est centré sur 9,37° de longitude Nord et 14,10° de latitude Est. La zone de Léré appartient au climat soudanien avec une précipitation moyenne qui varie entre 800 et 1200 mm par an depuis 1992 [16]. La température maximale atteint 45°C en période de canicule de mars à mai. La vitesse du vent soufflant dans le Département de Lac Léré s'élève, en moyenne, à 10 m/s avec de direction variable qui dépend, en général, de la saison. Le lac Léré fait partie de la réserve de Binder-Léré frontalier avec le

parc national de Zah-Soo. La population, estimée à plus de 226 000 habitants, est composée essentiellement des agriculteurs, des éleveurs, des pêcheurs et des commerçants [13].

II-1-2. Contexte géologique

Le lac de Léré est centré sur le bassin tchadien du Mayo – Kebbi. Il est caractérisé par une structure géologique constituée des roches granitiques et volcano-sédimentaires métamorphisées de l'orogénèse panafricaine du Précambrien [8, 14]. Des grès et conglomérats d'âge secondaire en discordance sur le socle, puis des grès tertiaires et des sables du Continental Terminal constituent également l'essentiel des matériaux géologiques du bassin du lac Léré [8, 14]. La série volcano-sédimentaire dite série de Zalbi, d'âge protérozoïque est constituée de volcanites basiques, d'argilites, de schistes noirs et de spilites déformées et métamorphisées dans le faciès amphibolite [8, 14].

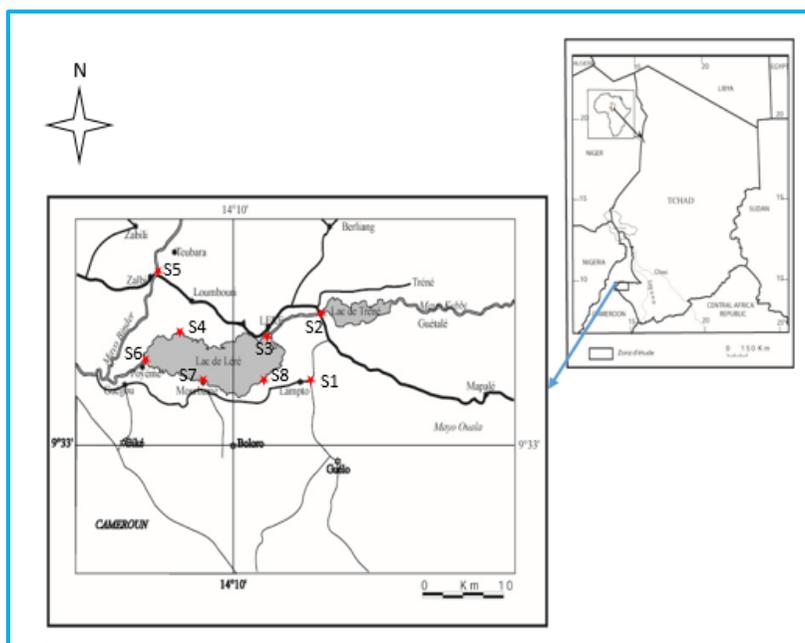


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des points d'échantillonnage sur le bassin du lac Léré dans la province du Mayo-Kebbi Ouest (Tchad)

II-2. Échantillonnage

II-2-1. Justification du choix des points d'échantillonnage

Le choix des points de prélèvement a été effectué en tenant compte de la présence des bassins versants, des activités environnantes ainsi que des sources possibles de contamination du lac. Il en ressort à cet effet 8 sites :

- Le point S1 situé en embouchure permet de mesurer l'apport d'El-Ouaya ;
- Le point S2 situé en amont du lac permet de mettre en évidence les apports des polluants en provenance du Mayo-Kebbi une fois traversés le lac de Tréné ;
- Le point S3 situé à proximité de la ville de Léré, a été choisi pour estimer l'apport des émissions routières ainsi que de la pollution urbaine ;
- Le point S4 situé à proximité de l'usine « Coton Tchad » a été choisi pour évaluer le flux des polluants liés aux activités de cette usine et aux autres sources qui s'y trouvent ;
- Le point S5 a été choisi pour mesurer l'apport des polluants en provenance du Mayo-Binder.
- Le point S6 correspondant au site situé en aval du lac, a été choisi pour estimer le flux du polluant qui émerge en suivant le réseau hydrographique du lac Léré ;
- Les points S7 et S8 sont situés sur la côte sud du lac. Ces points ont été choisis pour mesurer les apports des polluants pouvant provenir des champs agricoles et des chaînes des collines.

Tableau 1 : Coordonnées des points de prélèvement d'eau du bassin du lac Léré

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Localité	E-O.	Amont	V L.	Dissing	M-B.	Aval	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

E-O. El-Ouaya ; V L. Ville de Léré ; M-B. Mayo-Binder.

II-2-2. Prélèvement et conservation d'eau

Pour garantir la représentativité des échantillons, 1,5 litre d'eau a été prélevée à trois endroits différents de chacun de huit points d'échantillonnage. Avant le prélèvement, les bouteilles ont été préalablement rincées à l'eau déminéralisée, puis rincées trois fois avec l'eau du site d'échantillonnage. Immédiatement après le prélèvement, les échantillons ont été étiquetés et conservés dans des bouteilles en plastique éthyléniques neuves afin de prévenir toute contamination éventuelle (**Figure 1**). Les prélèvements ont été effectués entre 30 et 50 cm de profondeur, car l'eau de surface doit être évitée lorsqu'il s'agit d'une étude des micropolluants métalliques [17]. Ensuite, les échantillons d'eau ont été acidifiés (HCl cc), conservés dans un frigidaire (à environ 4°C) et acheminés au Laboratoire pour les analyses.



Figure 2 : Échantillons d'eau contenue dans les bouteilles en plastique éthyléniques (photo, 2023). Le prélèvement a été effectué en septembre 2023

II-3. Dosage des éléments métalliques (Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb)

Après filtration des échantillons d'eau, les éléments métalliques tels que : l'Al, Fe, Mn, Ni, Zn, Cr, Cd et Pb ont été dosés selon la méthode spectrométrique à l'aide des spectrophotomètres d'absorption atomique DR 6000 et DR 3900 de marque Band HACH Lange GmbH. 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 (blanc analytique). Après avoir étalonné correctement, les 10 mL de chaque échantillon préparé sont introduits dans l'enceinte du spectrophotomètre et la concentration (mg/L) s'affiche à l'écran de l'appareil [13].

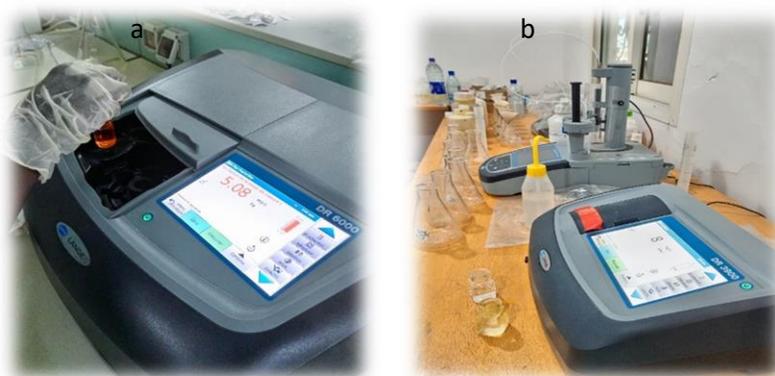


Figure 3 : Spectrophotomètres d'absorption atomique DR 6000 (a) et DR 3900 (b) de marque Band HACH Lange GmbH

II-4. Détermination du facteur de contamination

Le facteur de contamination métallique d'une eau (FCE) est calculé en divisant la concentration d'un métal analysé dans l'échantillon par la concentration du même métal fixée par les normes internationales recommandées [18]. Pour cette étude, ce sont les normes de l'OMS qui ont été choisies comme référence à partir desquelles tous les calculs ont été effectués.

$$FCE = \frac{[Me] \text{ (échantillon d'eau)}}{[Me] \text{ (norme internationale)}} \quad (1)$$

Si $FCE < 1$, il n'y a pas de contamination de l'eau ; si $FCE > 1$, il y a contamination de l'eau.

II-5. Traitement statistique des données

Les histogrammes ont été construits à l'aide de la feuille de calcul du Microsoft EXCEL version 2013. L'analyse de variance (ANOVA) a été effectuée avec le logiciel IBM SPSS statistics 25.

III - RÉSULTATS

III-1. L'aluminium

Les résultats d'analyses des ETM dans les eaux superficielles du bassin du Lac Léré montrent que la concentration en aluminium varie entre 0,009 (S8) et 0,068 mg/L (S2) avec une valeur moyenne de 0,03 mg/L. Les sites S2, S5 et S6 présentent des concentrations en aluminium respectivement 0,068 mg/L, 0,042 mg/L et 0,042 mg/L supérieures à la moyenne obtenue. Par contre, les plus faibles concentrations sont obtenues au niveau des sites S4 (0,012 mg/L), S7 (0,017 mg/L) et S8 (0,009 mg/L). Sur l'ensemble des sites étudiés, on ne note aucune contamination notoire des sites par l'aluminium ($FCE < 1$).

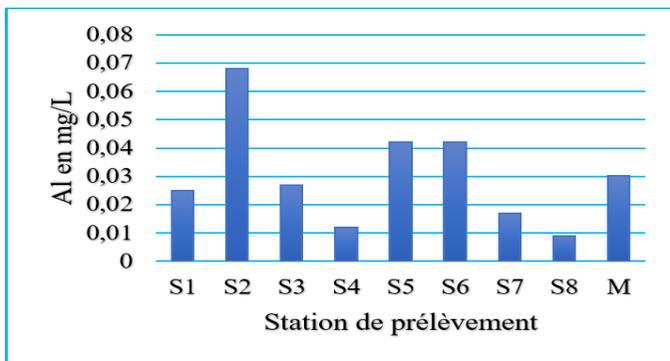


Figure 4 : Variation de la concentration en aluminium dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

III-2. Le fer

La concentration en fer varie de 0,3 (S3) à 2,53 mg/L (S5) avec une moyenne de 0,94 mg/L. La station S5 est la plus chargée en fer. Les plus faibles concentrations sont obtenues au niveau des sites S1 (0,47 mg/L) et S3 (0,3 mg/L). Les valeurs supérieures à la moyenne enregistrée sont relevées au niveau des sites S5 (2,53 mg/L) et S8 (1,04 mg/L). L'analyse de variance montre une différence significative de concentration entre les sites. Les résultats indiquent que sur 8 sites étudiés, 7 sont contaminés par le fer soit 87,5 %. IL s'agit principalement des sites S1, S2, S4, S5, S6, S7 et S8.

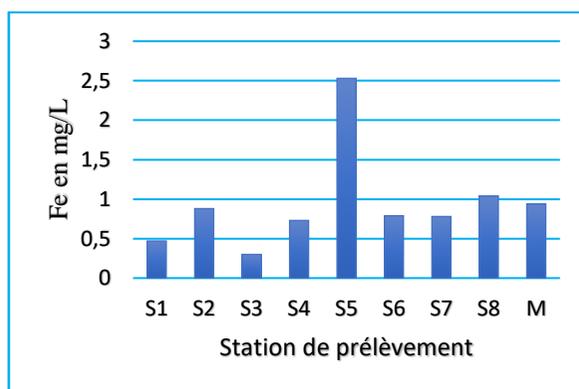


Figure 5 : Variation de la concentration en fer dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

III-3. Le manganèse

La concentration en manganèse varie de 0,8 (S3) à 4,4 mg/L (S6) avec une moyenne de 2,15 mg/L. l'analyse de variance montre que la variation de la concentration en manganèse dans les eaux du bassin du lac Léré est statistiquement significative à un niveau de 95%. On note que les sites les plus enrichis en manganèse sont les sites S5 (3,5 mg/L), S6 (4,4 mg/L) et S8 (2,4 mg/L) dont les valeurs sont largement supérieures à la moyenne enregistrée. Les résultats du calcul de facteur de contamination d'eau montrent que tous les sites ont été contaminés par le manganèse ($FCE > 1$).

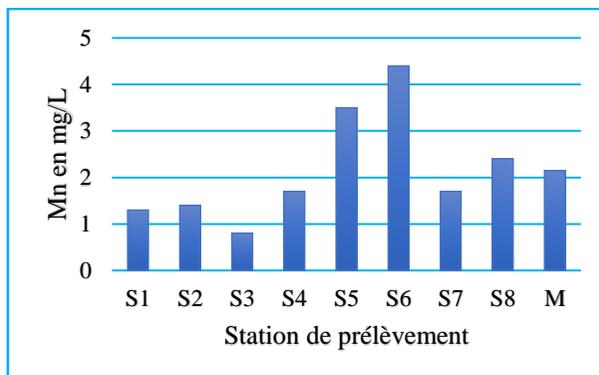


Figure 6 : Variation de la concentration en manganèse dans les eaux du bassin du lac Lérez en fonction des sites

III-4. Le nickel

La concentration en nickel varie de 0,16 (S2) à 0,42 mg/L (S1) avec une moyenne de 0,29 mg/L. Le nickel présente une fluctuation de concentration de S1 à S4. Les sites les plus potentiellement enrichis en nickel sont les sites S1 (0,42 mg/L), S3 (0,37 mg/L), S4 (0,32 mg/L) et S5 (0,36 mg/L) dont les valeurs sont au-delà de la moyenne enregistrée. L'analyse de variance montre une différence non significative de concentration en nickel en fonction des sites. Les résultats du calcul de facteur de contamination d'eau indiquent que tous les sites étudiés ont été contaminés par le nickel ($FCE > 1$).

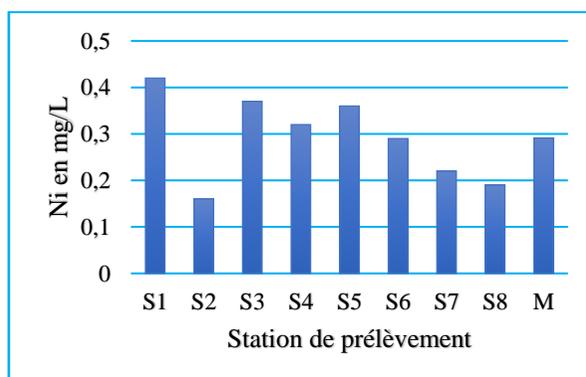


Figure 7 : Variation de la concentration en nickel dans les eaux du bassin du lac Lérez en fonction des sites

III-5. Le zinc

La concentration en zinc est comprise entre 0,14 mg/L (S2) et 0,3 mg/L (S8) avec une moyenne de 0,2 mg/L. Les sites retenus comme les plus enrichis en

zinc sont : S1 (0,2 mg/L), S3 (0,24 mg/L), S5 (0,24 mg/L) et S8 (0,3 mg/L). Par contre, les plus faibles concentrations en zinc sont enregistrées au niveau des sites S2 (0,14 mg/L) et S7 (0,13 mg/L). La variation de concentration en zinc dans le bassin du lac Léré n'est pas significative au seuil de 5%. Toutefois, on ne note aucune contamination pour le zinc ($FCE < 1$) dans le bassin du lac Léré.

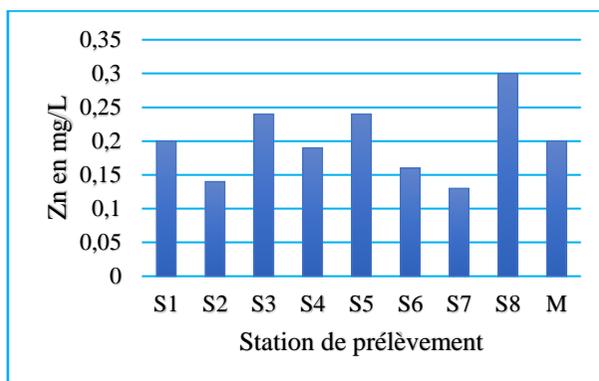


Figure 8 : Variation de la concentration en zinc dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

III-6. Le Chrome

La concentration en chrome varie entre 0,08 mgCr/L (S3) et 0,5 mgCr/L (S5) avec une moyenne de 0,18 mgCr/L. La variation de la concentration en chrome dans le bassin du lac Léré en fonction des sites est hautement significative (niveau de confiance de 99%). Les stations S5 (0,5 mgCr/L) et S8 (0,22 mgCr/L) sont les plus enrichies en ce métal. Les résultats dénotent que tous les sites étudiés ont été contaminés par le chrome ($FCE > 1$).

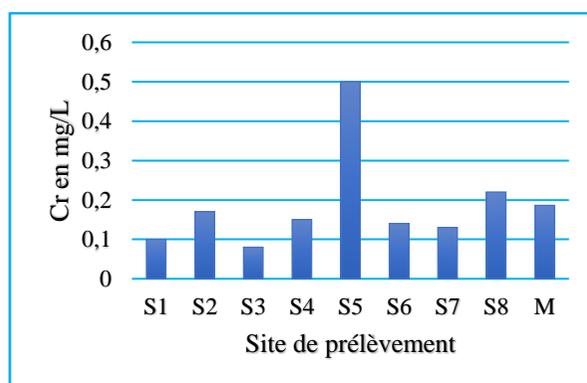


Figure 9 : Variation de la concentration en chrome dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

III-7. Le cadmium

Les résultats d'analyse de cadmium montrent que les concentrations en ce métal varient de 0,3 $\mu\text{g/L}$ (S2) à 12,5 $\mu\text{g/L}$ (S5) avec une moyenne de 6,35 $\mu\text{gCd/L}$. La variation de la concentration en cadmium est significative à un seuil de 95%. Ainsi, les plus fortes concentrations sont relevées au niveau des points S1 (11,5 $\mu\text{gCd/L}$), S3 (9,2 $\mu\text{gCd/L}$) et S5 (12,5 $\mu\text{gCd/L}$) et les plus faibles au niveau des sites S2 (0,3 $\mu\text{gCd/L}$) et S8 (0,6 $\mu\text{gCd/L}$). Les résultats montrent que sur 8 sites étudiés, 7 sont contaminés par le cadmium soit 87,5 %.

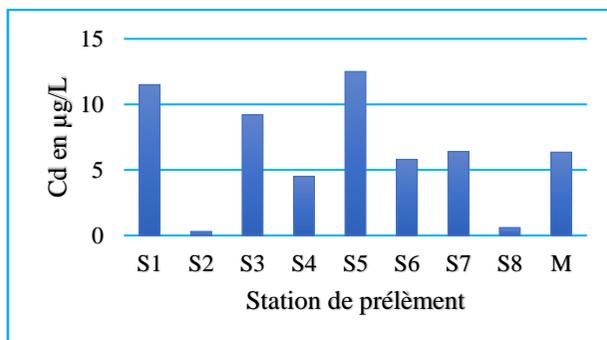


Figure 10 : Variation de la concentration en cadmium dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

III-8. Le plomb

L'analyse de plomb indique que la concentration en ce métal varie de 0,19 $\mu\text{gPb/L}$ (S2) à 0,98 $\mu\text{gPb/L}$ (S5) avec une moyenne de 0,60 $\mu\text{gPb/L}$. La variation de la concentration en Pb est significative à un niveau de 95 %. Les sites S3 (0,89 $\mu\text{gPb/L}$), S4 (0,67 $\mu\text{gPb/L}$), S5 (0,98 $\mu\text{gPb/L}$) et S8 (0,62 $\mu\text{gPb/L}$) sont les plus enrichis en plomb donc les valeurs de concentration sont supérieures à la moyenne enregistrée. Comme dans le cas de l'aluminium et le zinc, on ne note aucune contamination pour le plomb sur l'ensemble des sites d'étude.

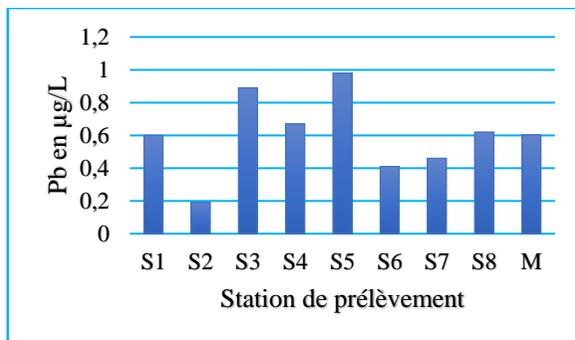


Figure 11 : Variation de la concentration en plomb dans les eaux du bassin du lac Léré en fonction des sites

Tableau 2 : Distribution des valeurs de facteurs de contamination métallique des eaux du lac Léré (FCE sans dimension) en fonctions des points de prélèvement

ETM	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	M
Al	0,13	0,34	0,14	0,06	0,21	0,21	0,09	0,05	0,15
Fe	1,57	2,93	1	2,43	8,43	2,63	2,6	3,47	3,13
Mn	2,6	2,8	1,6	3,4	7	8,8	3,4	4,8	4,3
Ni	21	8	18,5	16	18	14,5	11	9,5	14,58
Zn	0,07	0,05	0,08	0,06	0,08	0,05	0,04	0,1	0,06
Cr	2	3,4	1,6	3	10	2,8	2,6	4,4	3,73
Cd	3,8	0,1	3,06	1,5	4,17	1,93	2,13	2	2,12
Pb	0,06	0,02	0,09	0,07	0,1	0,04	0,05	0,06	0,06

M : Moyenne

Tableau 3 : Quelques normes des eaux (mg/L)

Normes	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	Al	Fe	Ni
N1	0,01	3	0,003	0,05	0,5	0,2	0,3	0,02
N2	0,5	5	0,5	2	1,2	-	3	2
N3	5	2	0,01	-	1	-	-	-
N4	0,003	0,015	0,0001	-	0,003	-	-	-
N5	0,05	5	0,005	-	5	-	1-2	-

N1 : Norme selon l’OMS des eaux destinées à la consommation humaine [19] ;

N2 : Norme selon FAO des eaux de surface [20] ;

N3 : Norme selon FAO des eaux destinées à l’agriculture [21] ;

N4 : Norme américaine des eaux douces naturelles [22] ;

N5 : Norme européenne des eaux de surface et souterraines (1981) [23].

IV - DISCUSSION

IV-1. Variation des concentrations en éléments métalliques (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb)

L’analyse des résultats montre que les concentrations en différents éléments métalliques analysés sont élevées. Il s’agit particulièrement des éléments Fe, Mn, Ni, Cr et Cd dont les concentrations sont au-delà des différentes normes préconisées. Les éléments Al, Zn et Pb présentent des concentrations conformes aux normes de l’OMS et aux normes américaines des eaux douces continentales. Ces résultats indiquent aussi que la plupart des métaux analysés proviennent principalement de S5, site représentant les apports des polluants en provenance du Mayo-Binder. En effet, le Mayo-Binder traverse des champs agricoles et des terrains miniers dont l’altération des roches et la dissolution

des minéraux pourraient augmenter les concentrations des éléments métalliques dans l'eau. Les éléments métalliques analysés présentent de concentration qui dépend, en général, de la nature des sites étudiés. Ainsi, la forte concentration en Al obtenue au niveau du site S2 peut s'expliquer par la nature des sols, points connectés entre le Mayo-Kebbi à l'Est et le bassin versant d'El-Ouaya au Sud-Est. Concernant le fer, sa concentration varie d'un endroit à un autre avec une moyenne supérieure à la norme des eaux douces. Cette forte augmentation de la concentration en fer dans les eaux du lac Léré serait due aux activités anthropiques. En effet, le fer est un métal très réactif, sa fraction retenue sur les sédiments s'oxyde facilement sous la variation des conditions physico-chimiques [18]. Les auteurs [24] ont relevé une concentration en fer de 2,838 mg/L dans les eaux superficielles de la Basse Moulouya au niveau d'Oued Za au Maroc, qui dépasse largement la moyenne enregistrée dans le bassin du lac Léré. En effet, les eaux superficielles de la Basse Moulouya au niveau d'Oued Za sont plus enrichies en Fe que celles prélevées dans le bassin du lac Léré. Une étude menée sur la contamination par les métaux lourds des eaux au voisinage de la mine de Tighza du Maroc Central Oriental a montré que les eaux de ce site ont été fortement enrichies en Zn, Cd, Pb et Mn [25]. Dans le bassin du lac Léré, les concentrations moyennes en Zn ; Cd ; Pb et Mn dans l'eau atteignent respectivement 0,2 ; 0,0063 ; 0,0006 et 2,15 mg/L qui sont relativement insignifiantes comparées aux concentrations en ETM dans les eaux à proximité des zones minières de Tighza du Maroc Central Oriental.

En effet, l'exploitation minière constitue l'une des principales sources d'émission des ETM dans les eaux superficielles [26]. L'augmentation de la concentration en Mn dans les eaux du bassin du lac Léré peut résulter de l'extraction artisanale des minerais tout autour de celui-ci. Le manganèse est associé aux nombreux minéraux extractibles dont leur exploitation peut libérer ce métal dans l'eau. Ce métal est toxique lorsqu'il se trouve sous la forme d'ion libre facilement assimilable par les cellules vivantes. Une concentration moyenne en Ni de 0,472 mg/L semblable à la nôtre a été relevée au niveau de l'estuaire du fleuve Konkouré en République de Guinée [27]. Cette valeur dépasse largement la norme recommandée par l'OMS. Par conséquent, les eaux superficielles de l'estuaire du fleuve Konkouré de même que celles du bassin du lac Léré sont enrichies en nickel. Faut-il noter que le nickel et ses composés inorganiques peuvent entraîner des troubles cutanés et être extrêmement toxiques et cancérigènes pour l'homme [28]. D'après leur étude portée sur l'évaluation de la contamination par les métaux lourds des sédiments, les auteurs [13] ont montré que les sédiments du bassin du lac Léré s'enrichissent en Ni et Cd. Ces derniers proviennent du Mayo-Kebbi, du Mayo-Binder et de l'El-Ouaya (principaux bassins versants du lac Léré). Les mêmes auteurs attribuent l'enrichissement en ces éléments métalliques aux intrants agricoles (engrais et pesticides), à la dissolution des roches

environnantes et aux transports des matériaux inorganiques [13]. Par ailleurs, il faut noter que la forte présence des éléments métalliques dans le plan d'eau pourrait être liée au relargage de sédiments et à l'acido-dissociation des substrats solides contenus dans les aérosols. Par ailleurs, des concentrations très faibles en cadmium, comparées aux nôtres, ont été enregistrées dans les eaux de l'estuaire du Bouregreg [29]. De même, des concentrations en cadmium encore plus faibles qui varient de 0,00 à 0,52 µg/L et de 0,00 à 0,67 µg/L ont été relevées respectivement dans les lacs de Bini et de Dang au Cameroun [30]. Ces résultats prouvent que les eaux du bassin du lac Léré sont plus chargées en cadmium que celles de l'estuaire du Bouregreg au Maroc et des lacs de Bini et de Dang au Cameroun. Une absence de contamination en Cr, Cd, Ni et Pb a été constatée dans les eaux superficielles du Littoral Nord-Ouest du Maroc [31]. En revanche, une étude a permis de mettre en évidence une contamination avérée des eaux superficielles du lac Oubeira par les éléments Cr, Fe, Ni, Pb, Mn et Cd dont les valeurs de concentration sont respectivement 0,72 ; 10,53 ; 0,37 ; 0,45, 0,87 et 0,007 mg/L au niveau de l'embouchure Demet Rihana [21]. Ces résultats sont au-delà de concentrations enregistrées dans le lac Léré. Par conséquent, les eaux superficielles du lac Oubeira au niveau de l'embouchure Demet Rihana en Algérie sont plus enrichies en éléments métalliques que celles du bassin du lac Léré. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les eaux du lac Oubeira en reçoivent les rejets d'eaux usées domestiques [21].

Tableau 4 : Comparaison des concentrations en éléments métalliques dans quelques eaux de surface en Afrique. Les concentrations sont exprimées en mg/L

Eaux	Al	Fe	Mn	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	Sources
Lac Léré, Tchad	0,003	0,94	2,15	0,2	0,29	0,18	0,0002	0,006	PE
Lac Tchad	0,048	nd	0,004	0,0016	0,002	0,001	0,0002	0,0001	[10]
Rivière Mekrou, Bénin	nd	nd	nd	0,0151	nd	nd	nd	0,0335	[12]
Zaida, Maroc	nd	nd	nd	0,0003	nd	nd	0,002	<< LD	[22]
Bassin de la Lufira, Congo	nd	nd	nd	2,38	nd	nd	0,078	39,7	[23]
Tighza, Maroc	nd	nd	13,93	36,858	nd	nd	0,761	0,082	[25]
Emb. de Demet Rihana, Algérie	nd	10,53	1,063	1,5	0,37	0,72	0,45	0,007	[26]
Emb. de Oued Messida, Algérie	nd	0,55	0,84	1,27	0,45	0,64	0,44	0,001	[26]
Lac de Bini, Cameroun	nd	0,27	nd	0,0002	0,014	0,011	0,002	0,0003	[30]
Lac de Dang, Cameroun	nd	0,31	nd	0,0003	0,026	0,017	0,002	0,0076	[30]

LD : Limite de Détection ; nd : non déterminé ; PE : Présente Etude.

IV-2. Contamination métallique des eaux

Les résultats du calcul des facteurs de contamination d'eau (*Tableau 2*) ont permis de montrer que les éléments (Fe, Mn, Ni, Cr et le Cd) présentaient des valeurs de FCE supérieures à 1. Par conséquent, les eaux du bassin du Lac Léré sont contaminées par ces éléments métalliques. Ces eaux bien que dépourvues d'un système de traitement ou de contrôle avant leur utilisation, représentent un problème de santé humaine et pour l'écosystème aquatique. La contamination des eaux du bassin du lac Léré par les éléments métalliques (Fe, Mn, Ni, Cr et Cd) serait liée aux activités agricoles (engrais et pesticides) et à l'altération chimique des sols et des roches issues des chaînes de collines. Ces polluants peuvent s'infiltrer dans le sol et être entraînés par la suite par ruissellement. Les activités minières (la cimenterie de Baoré installée en amont du Mayo-Kebbi, les multiples champs aurifères en activité dans le Mayo-Kebbi Ouest et l'exploration uranifère dans le nord du bassin du lac Léré) pourraient représenter la principale cause anthropique de la contamination des eaux de ce bassin. Il faut noter qu'en particulier lorsque la conductivité et la concentration en minéraux augmentent, les métaux lourds forment des composés complexes stables qui s'associent, le plus souvent, aux différents minéraux. Cependant, la dissociation ultérieure de ces minéraux pourrait augmenter la concentration des éléments métalliques dans le plan d'eau [32]. D'après [13], les sols du bassin du lac Léré se caractérisent par une faible teneur en Al, Zn et Pb. L'absence instantanée de la contamination d'eau du bassin du lac Léré par les éléments aluminium, zinc et plomb peut témoigner de la nature des activités anthropiques et de la géologie des bassins versants. On peut associer cette situation à une possible rétention de ces éléments métalliques sur les sédiments pendant cette période. En effet, les éléments (Al, Zn et Pb) auraient pu former, à ce stade, des complexes stables dont la dissociation ne serait possible que dans certaines conditions (pH, minéralisation, oxydabilité, oxygénation, sulfuration, etc.) du milieu [30 - 32].

V - CONCLUSION

Les éléments métalliques (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cr, Cd et Pb) ont été analysés dans l'eau naturelle du bassin du lac Léré par les méthodes spectrométriques après échantillonnage réalisé en septembre 2023. Ceci afin d'évaluer l'état de la contamination métallique dans ce lac. Les résultats ont permis de retenir que les concentrations en différents éléments métalliques varient en fonction des sites et sont, pour certains (Fe, Mn, Ni, Cr et Cd), supérieures aux normes internationales préconisées. Sur 8 sites étudiés, 87,5 % des sites sont contaminés par le fer et le cadmium et 100 % par le manganèse, le nickel et le chrome. Les eaux naturelles du bassin du Lac Léré sont contaminées par le

nickel, le fer, le manganèse, le chrome et le cadmium. On n'enregistre pas de contamination notoire pour l'aluminium, le zinc et le plomb. Les eaux du bassin du lac Léré ne peuvent pas être utilisables pour la consommation humaine ni dans les activités domestiques à cause de la présence hors norme des éléments métalliques particulièrement toxiques (Mn, Ni, Cr et Cd). L'utilisation de ces eaux pourrait être limitée, à faible risque, à l'irrigation des cultures et à l'abreuvement des bétails.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier M. Bopabe SINIKI pour le financement du projet.

RÉFÉRENCES

- [1] - A. SOUMBOUGMA, A. KADEBA, N. F. COMPAORE et J. I. BOUSSIM, Caractérisation des effluents industriels et effets de leur utilisation agricole sur la santé des populations : cas de la commune de Bobo-Dioulasso. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 36 (2020) 52 - 68
- [2] - N. NGARAM, N. M. TCHADANAYE, A. MERLE, P. BAUTERI et A. N. B. BOUREGA, Caractérisation physico-chimique des eaux du fleuve Chari au niveau de la ville de N'Djaména (Tchad). *Anales de l'université de N'Djaména-Série C*, N°05 (2011) 102 p.
- [3] - L. T. LACOUÉ, Incorporation des métaux dans les œufs de la seiche commune *Sepia officinalis* et effets potentiels sur les fonctions digestives et immunitaires. Thèse de doctorat : Océanologie Biologique & Environnement Marin, (2007) 200 p.
- [4] - S. MAGALI, Spéciation du cadmium, du plomb et du zinc dans les poussières d'émissions atmosphériques d'origine sidérurgique approche de l'impact toxicologique des poussières. Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, (2007) 334 p.
- [5] - K. S. F. EKPONON, T. J. G. IRIE, B. I. N'GI, J. P. YAO et K. AFFIAN, Profils géochimiques des métaux lourds (Pb, Cd, Cu et Zn) des carottes sédimentaires de la baie d'Abouabou, Lagune Ebrié. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 43 (2024) 73 - 87
- [6] - S. H. IMANE, A. M. FATIMA-ZOHRRA, K. DOUNIA et M. SMAIL, Niveau de contamination par les éléments traces métalliques cadmium, cobalt, cuivre et zinc de deux cyprinidés et des sédiments du barrage Koudiet Medouar (Batna, Algérie). *Journal of Applied Biosciences*, 143 (2019) 14606 - 14622

- [7] - P. KPIAGOU, S. TCHEGUENI, G. BOGUIDO, D. SAMA, K. GNANDI, T. TCHACONDO et A. I. GLITHO, Evaluation de la pollution des ressources en eau du bassin versant de Didagou (Dapaong, Nord-Togo). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 16 (1) (2022) 481 - 497
- [8] - K. PASSINRING, Milieux naturels et paysages du bassin – versant des lacs de Léré (MKO– Tchad). Thèse de doctorat, Université Aix – Marseille I, (2006) 306 p.
- [9] - M. DJEBE, Pression humaine et érosion des berges du Chari et Logone à N'Djamena. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 39 (2022) 70 - 83
- [10] - J. P. VICAT, M. J. C. DOUMNANG et D. N. NADJILEM, Physicochemical Caraterisation of Pond Waters in the Kanem Region, Republic of Chad. *International Journal of Multidisciplinary Research an Publications (IJMRAP)*, 6 (4) (2023) 68 - 75
- [11] - I. SOUMAÏLA SIDDO, M. M. ADAMOU, S. ILLA et A. ISSOUFOU IDÉ, Évaluation temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 39 (2022) 364 - 375
- [12] - P. G. AMLAN, W. K. CHOUTI, C. A. DEDJIHO, K. R. FANGNON et N. E. CHITOU, Évaluation de la pollution chimique des eaux par les éléments traces métalliques (ETM) : cas de la rivière Mekrou (nord-ouest Bénin). *Journal of Applied Biosciences*, 192 (2023) 20331 - 20346
- [13] - T. SOUAREBA, J. C. DOUMNANG, P. RONDOUBA, M. TARKODJIEL et Y. MAHMOUT, 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. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 18 (2) (2024) 723 - 736
- [14] - M. J. C. DOUMNANG, Géologie de formations néoprotozoïques du Mayo Kebbi (Sud-Ouest du Tchad) : apport de la pétrologie et de la géochimie : implications sur la géodynamique au Panafricain. Thèse de doctorat, Science de la Terre et de l'Univers, Université d'Orléans (2006) 270 p.
- [15] - INSEED, *Data base*, commune de Léré, Tchad, (2020)
- [16] - NASA, Données agro-climatiques : http://www.nasa.agroclimatology_data.org (22 février 2022)
- [17] - J. RODIER, L. BERNARD et N. C. MERLETET, *L'analyse de l'eau pour statistique*. 9^e édition. Dunon Paris, (2009) 5600 p.
- [18] - B. BATOUL, 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, (2018) 192 p.
- [19] - OMS, <http://www.osmre.gov>, treatment Techniques and Costs (26 mars 2024)
- [20] - FAO, From Heavy Metal Regulations Faolex. Retrieved, (2012) <http://faolex.org/docs/pdf/eri42405>

- [21] - H. J. M. BOWEN, Environmental Chemistry of the Elements. *Academic Press*, New York, (1979) 49 - 62
- [22] - B. BAGHDAD, M. NAIMI, A. BOUABDLI, P. SONNET, A. S. GARCIA, M. BOUNAHLA et A. C. INIGO, Assessment of Water Quality In Abandoned Lead Mine environment in the High Moulouya in Morocco. *EvironWater, Inter Regional Conference* 12th Edition, (2009)
- [23] - B. K. MANDA, G. COLINET, L. ANDRE, A. C. MANDA, J. P. MARQUET et J. C. MICHA, Evaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/RD Congo). *Tropicultura*, 28 (4) (2010) 246 - 252
- [24] - A. FAHSSI, S. A. Y. HAMEED, T. RACHID et C. ABDELHAFID, Evaluation spatiotemporelle de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya Evaluation spatiotemporal of the metal contamination of surface water resources in the lower Moulouya (North eastern Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (7) (2016) 2404 - 2423
- [25] - E. H. FARAH, B. ABDELLAH, R. NOUREDDINE et B. LAHCEN, Etude De La Contamination Par Les Métaux Lourds Des Eaux Et Des Sédiments Au Voisinage De La Mine De Tighza (Maroc Central Oriental). *European Scientific Journal*, 12 (6) (2016) 167 - 158
- [26] - A. BENDJAMA, L. DJABRI, T. CHOUCANE, A. BOUKARI et S. TLILI, La contamination métallique des eaux lacustres des zones humides du PNEK située au Nord-Est algérien. *Conférence internationale de 2014 sur l'énergétique appliquée et la pollution, LEAP*, Constantine, (2015) 14 - 15
- [27] - G. ONIVOGUI, S. BALDE, K. BANGOURA et M. K. BARRY, Évaluation des risques de pollution en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, Co, Ni, Zn) des eaux et des sédiments de l'estuaire du fleuve Konkouré (Rep. de Guinée). *Afrique Science*, 09 (3) (2013) 36 - 44
- [28] - C. BENJAMIN et G. TARA, Les métaux lourds. *Citepa. Rapport France* édition, (2020)
- [29] - N. ZERKI, Apport de la chimométrie pour l'analyse et l'interprétation de quelques paramètres physicochimiques influençant la répartition des métaux lourds, des éléments nutritifs et des anions dans les eaux de l'oued de Bouregreg. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Université Mohammed V-Agdal Rabat, (2013) 161 p.
- [30] - B. OUMAR, N. L. EKENGLE et O. A. D. BALLA, Évaluation du niveau de pollution par les métaux lourds des lacs Bini et Dang, Région de l'Adamaoua, Cameroun. *Afrique Science*, 10 (2) (2014) 184 - 198

- [31] - M. BLINDA, B. ABDELKBIR, F. MOHAMED, S. B. ELISLAM et L. M. MOHAMED, 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 (2013) 43 - 49
- [32] - N. KONÉ, A. S. N'DA, K. B. KIEN, G. F. H. BOGUHÉ et S. BERTÉ, Caractérisation physico-chimique des eaux du lac du barrage hydroélectrique de Kossou, fleuve Bandama, Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 39 (2022) 55 - 69