

Indices de pollution des eaux du bassin hydrographique de la rivière Lufira par des métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) rejetés dans les effluents miniers de la ville de Likasi et ses environs, Haut Katanga (RD Congo)

[Water pollution indices in the Lufira River basin due to heavy metals (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, and Zn) discharged in mining effluents from the city of Likasi and its surroundings, Haut Katanga (DR Congo)]

Boris UNYUMBE YANGA KALALA^{1,2}, René GIZANGA VALU^{1,2}, Willy LUSASI SWANA³, Thierry TANGOU TABOU¹, Camile NSIMANDA IPEY¹, and Dieudonné MUSIBONO EYUL'ANKI¹

¹Mention Sciences et Gestion de l'Environnement, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa (UNIKIN), B.P. 190 Kinshasa XI, RD Congo

²Département de Contrôle Environnement, Office Congolais de Contrôle (OCC), Kinshasa, RD Congo

³Laboratoire de Limnologie, Hydrobiologie et Aquaculture, Mention Sciences de la Vie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa (UNIKIN), B.P. 190 Kinshasa XI, RD Congo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the province of Haut Katanga, the quality of waterways is particularly threatened by mining activities that do not take into account the environmental protection criteria recently introduced through Congolese mining legislation. The objective of this study is to analyze the level of pollution in the water of rivers and Lake Tshangalele, which is rich in fish consumed by local populations in the upper part of the Lufira River basin, near the city of Likasi in the province of Haut Katanga in the Democratic Republic of Congo, in order to assess the level of risk and exposure faced by these aquatic ecosystems and their resources. The concentrations of ten heavy metals (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, and Zn) were measured in river and lake water using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES). Water pollution indices based on ETM concentrations were calculated using the weighted arithmetic method. The results obtained show that in terms of contamination levels, As (Kapulande > Kapemba > Lake Tshangalele), Cd (Kapemba > Lufira 2), Co (Kapulande > Panda 2 > Lufira), Cr (Lufira > Kapamba > Kapulande), Cu (Kapulande > Tshangalele), Mn (Kapulande > Panda 2 > Kapemba > Lufira 2 > Tshagalele), Ni (Lufira > Buluo), Pb (Kapulande > CLP > Panda), Se (Kapulande > Panda 3 > Kapemba) and Zinc (Kapulande > Tshangalele) show very high contamination levels with a very significant statistical difference ($p < 0.05$) compared to WHO standards for drinking water and good ecological quality. Based on the Pollution Load Index (PLI), it can be seen that the water in the Kapulande River (PLI = 31.9) is highly polluted compared to that of the Kapemba (PLI = 9.2), Lufira 2 (PLI = 5), Buluo, and Lufira 1 rivers, with PLI values of 4.7 respectively, followed by Panda 2 (PLI = 3.4) and Lake Tshangalele (PLI = 13.3), compared to the PLI of other rivers where pollution was considered to be low. Taking into account the ecological, social, and economic roles of the Lufira basin, which has been designated a Ramsar Site since 2017, and in view of the chemical and ecotoxicological risks to the aquatic ecosystems surveyed and their resources, as well as to the population exposed to them, appropriate measures must be taken to combat the degradation of these environments.

KEYWORDS: watershed, heavy metals, water pollution index, Lufira river.

RESUME: Dans la province du Haut Katanga, la qualité des cours d'eau est particulièrement menacée par les activités minières qui se font sans tenir compte des critères de protection de l'environnement récemment introduits à travers la législation minière congolaise. Cette étude a pour objectif d'analyser le niveau de pollution dans l'eau des rivières et celle du lac Tshangalele, riche en poissons consommés par des populations riveraines dans la partie supérieure du bassin hydrographique de la rivière Lufira, aux environs de la ville de Likasi dans la province du Haut Katanga en République Démocratique du Congo en vue d'évaluer le niveau de risque et d'exposition dont fait face ces écosystèmes aquatiques et leurs ressources. Les concentrations de dix métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) ont été dosées dans l'eau des rivières et du lac à l'aide d'un spectrophotomètre d'Emission Optique avec Plasma à Couplage Inductif (ICP-OES). Les indices de pollution de l'eau en fonction des teneurs en ETMs ont été calculés suivant la méthode arithmétique pondérée. Les résultats obtenus montrent qu'en termes du taux de contamination, l'As (Kapulande > Kapemba > lac Tshangalele), le Cd (Kapemba > Lufira 2), le Co (Kapulande > Panda 2 > Lufira), le Cr (Lufira > Kapamba > Kapulande), le Cu (Kapulande > Tshangalele), le Mn (Kapulande > Panda 2 > Kapemba > Lufira 2 > Tshangalele), le Ni (Lufira > Buluo), Pb (Kapulande > CLP > Panda), le Se (Kapulande > Panda 3 > Kapemba) et Zinc (Kapulande > Tshangalele) présentent des taux de contaminations très élevés avec une différence statistique très significative ($p < 0,05$) par rapport aux valeurs normatives de l'OMS pour une eau de boisson et d'une bonne qualité écologique. Sur base de l'indice PLI (Pollution Loard Index), il s'observe que l'eau de la rivière Kapulande (PLI = 31,9) est hautement polluée que celle des rivières Kapemba (PLI = 9,2), Lufira 2 (PLI = 5), Buluo et Lufira 1 avec une valeur de PLI de 4,7 respectivement suivies de Panda 2 (PLI = 3,4) et le lac Tshangalele (PLI = 13,3) par rapport au PLI des autres rivières où la pollution a été jugée légère. Tenant compte des rôles écologiques, sociaux et économiques du bassin de la Lufira déclaré depuis 2017, « Site Ramsar » et au vu des risques chimiques et écotoxicologiques que courent les écosystèmes aquatiques prospectés et leurs ressources, mais aussi la population qui y sont exposées, des mesures appropriées doivent être prises pour lutter contre la dégradation de ces milieux.

MOTS-CLEFS: bassin hydrographique, métaux lourds, indice de pollution de l'eau, rivière Lufira.

1 INTRODUCTION

Les écosystèmes aquatiques servent de refuge et d'habitats à de nombreuses espèces vivantes; l'un des traits spécifiques qui fait de ces espaces un patrimoine qui mérite d'être préservé [1]. Malheureusement, ces milieux naturels censés être protégés sont soumis aujourd'hui à une dégradation accrue [2]. Actuellement, la présence de métaux lourds comme des contaminants à des concentrations supérieures aux charges naturelles et aux standards légaux autorisés, alimente les débats dans les enjeux environnementaux [3]. En effet, cette situation trouverait son origine dans le développement croissant à travers le mode d'activités socio-économiques notamment: l'expansion urbaine, les activités industrielles ainsi que l'absence ou la faiblesse de réglementations concernant la gestion de l'environnement, surtout pour les écosystèmes aquatiques vulnérables situés près des grandes agglomérations [1, 4].

En République Démocratique du Congo, la pollution des milieux aquatiques et en particulier des écosystèmes idoines situés dans les zones minières, est devenue un phénomène alarmant qui menace gravement l'environnement et la santé humaine car de nombreux éléments chimiques toxiques tels que les métaux lourds y sont rejetés de manière chronique sans précaution, ni prétraitement en amont [5], [6], [7], [8].

La ville de Likasi, dans la Province du Haut-Katanga, est l'un des épicentres de l'exploitation minière en République Démocratique du Congo à cause de sa position localisée dans les affleurements riches en cuivre (Cu) et en cobalt (Co), appelés sites cuprifères katangais [9]. Les rivières qui arrosent la ville de Likasi et ses environs sont utilisées comme des drains naturels des effluents par les industries minières (extraction, traitements, etc.) [4]. La plupart des unités industrielles qui s'y trouvent exploitent par des procédés hydrométallurgiques les minerais de cuivre et de cobalt, rejetant malheureusement les effluents miniers lourdement pollués dans les différentes rivières qui alimentent la rivière Panda, principal affluent de la rivière Lufira, elle-même constituant le principal affluent du Fleuve Congo dans sa partie Sud-Est appelée « le Lualaba ». Les affluents de la Lufira abritaient jadis une variété d'espèces aquatiques et terrestres, jouant un rôle crucial dans la vie quotidienne des communautés riveraines qui dépendent de ces ressources pour la pêche, l'agriculture et l'approvisionnement en eau pour les divers usages domestiques [5].

Cependant, la rivière Lufira et le lac Tshangalele riches en poissons alimentent les populations riveraines ainsi que celles des villes de Lubumbashi et Likasi en poissons frais; à certains endroits non impactés, leurs bassins versants sont exploités pour des activités agricoles. Mais aussi, ces écosystèmes aquatiques traversent un domaine déclaré depuis le 31 décembre 2017

comme l'un des plus grands sites Ramsar au monde [10]. C'est cela toute l'importance de préserver les eaux de ces écosystèmes aquatiques spéciaux pour leur rôle socio-économique et écologique au niveau local.

Plusieurs études sur la contamination des écosystèmes aquatiques et leurs ressources sont déjà réalisées à travers le pays [4], [6], [7], [8], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23] bien que celles-ci restent fragmentaires et éparses à travers les différentes régions du pays.

Dans le bassin de la Lufira, les études antérieures réalisées par [4], [5] ont montré la présence des éléments traces métalliques dans ces écosystèmes aquatiques. Malheureusement, ces études n'ont pas pris en compte l'intégralité du bassin hydrographique de la Lufira en vue d'évaluer la variation spatiale de cette contamination. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude en vue d'évaluer la pollution de ces eaux consommées directement et/ou indirectement par des populations riveraines du bassin de la Lufira contaminées par des métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn), au regard des Directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), en se basant sur le calcul des indices ou facteurs de contamination et des pollutions.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MILIEU D'ÉTUDE

La présente étude a eu lieu dans la ville de Likasi et ses environs situés dans la province du Haut Katanga en République Démocratique du Congo où les échantillons d'eaux des rivières du bassin hydrographique de la Lufira (figure 1) ont été analysés. Au total, treize (13) stations sur neuf (09) rivières notamment: Kapemba, Mura, Kamilopa, Kapulande, CLP, Kimiba, Buluo, Panda, Lufira et le lac Tshangalele, constituant le réseau hydrographique de la Lufira ont été prises en compte. Ses coordonnées géographiques sont approximativement 09°20'57"S et 26°54'51"E (Site Ramsar) et la figure 1 qui suit illustre la zone d'étude dans sa partie supérieure.

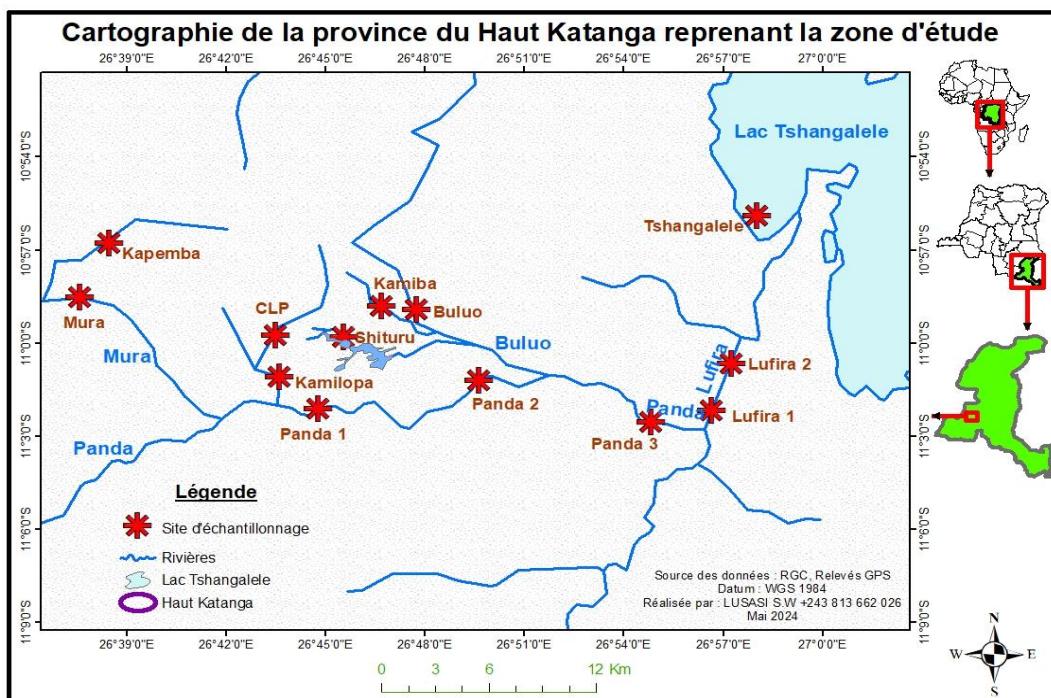


Fig. 1. Cartographie de la zone d'étude reprenant le réseau hydrographique de la rivière Lufira

Le choix de la zone d'étude et des rivières prospectées se justifie par la concentration des activités minières en amont, l'utilisation des rivières par les miniers pour le rejet des effluents, l'intense activité de pêche et agricoles dans certains sites ainsi que l'utilisation de ces cours d'eaux pour certains besoins domestiques par la population riveraine. Les stations d'échantillonnage ont été sélectionnées sur les principaux affluents qui reçoivent directement ou indirectement les effluents miniers dans le bassin hydrographique de la rivière Lufira afin d'assurer la représentativité de la contamination dans le bassin.

2.2 MÉTHODOLOGIE

2.2.1 ECHANTILLONNAGE

Les échantillons d'eaux ayant servi aux analyses chimiques des ETMs ont été prélevés à l'aide des flacons en polyéthylène préalablement stérilisés et rincés avec les eaux à échantillonner dans chaque station [24]. Ensuite les échantillons ont été placés dans des flacons en polyéthylène [25] avant de les conditionner dans les glacières contenant des blocs de glaces afin que les échantillons soient conservés à une température de 4 °C environ [26].

Le même jour, les échantillons ont été ramenés au laboratoire de produits pétroliers et de chimie de l'Office Congolais de Contrôle (OCC) de la Ville de Lubumbashi dans la province du Haut Katanga en RD Congo.

2.2.2 EVALUATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES RIVIERES

Cinq (5) paramètres physico-chimiques notamment: la température (°C), le potentiel d'hydrogène, la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la turbidité (ppm) ainsi que la salinité (%) de l'eau des rivières Kapemba, Mura, Kamilopa, Shituru, CLP, Kimiba, Buluo, Panda, Lufira ainsi que du lac Tshangalele ont été évalués *in situ*. Ces paramètres ont été déterminés à l'aide des deux sondes multiparamètres de marque HANNA Combo pH-mètre modèle pH/ORP/EC/DO N° HI9828 et de modèle EZ-9909SP préalablement étalonnés. Sur chaque site prospecté, sept (7) prélèvements ont été effectués pour les paramètres concernés.

2.2.3 DOSAGE DES ÉLÉMENTS TRACES METALLIQUES DANS L'EAU

Pour mesurer les niveaux de contamination chimique des eaux, le dosage des métaux lourds (dix au total: l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn)) a été effectué à l'aide d'un spectrophotomètre d'Emission Optique avec Plasma à Couplage Inductif (ICP-OES) [27] de marque PERKIN ELMER (série 8300). C'est une technique d'analyse élémentaire quantitative qui repose sur l'excitation des atomes d'un échantillon dans un plasma à haute température, puis sur la mesure de la lumière émise par ces atomes excités [28].

2.2.4 ANALYSES INDICIAIRES ET MULTIVARIÉES

2.2.4.1 FACTEUR DE CONTAMINATION (FC) ET INDICE DE CHARGE DE POLLUTION OU POLLUTION LOARD INDEX (PLI)

Plusieurs indices existent à travers la littérature pour estimer la qualité des eaux [29] et certains d'entre eux sont utilisés par les organismes d'évaluation environnementale qui surveillent et gèrent la qualité des eaux, surtout dans la surveillance de la qualité des effluents industriels, enfin d'appliquer le principe pollueur-payeur sur les installations classées [30], [31]. Ce sont des outils précieux qui simplifient les données obtenues à des valeurs numériques qui permettent de visualiser la qualité des eaux et les risques associés à la présence de polluants [32], [33], [34], [35].

Pour cette étude, le facteur de contamination (FC) et l'indice de charge de pollution ou pollution loard index (PLI), appelé aussi Heavy Pollution Index (HPI) [36] ont été utilisés pour caractériser la pollution dans le bassin de la Lufira [37]. Le choix de ces deux indices pour évaluer la contamination des eaux des rivières et du lac Tshangalele dans ce bassin s'est basé sur trois étapes: (1) définition de objectif principal qui est de quantifier la pollution minière dans le bassin, (2) en tenant compte des concentrations dosées dans les échantillons supposés contaminés et ceux obtenus dans les zones du bassin de la Lufira non impactés par des activités minières, (3) agrégation en un seul indice global pour nous permettre une bonne interprétation [28].

Le facteur de contamination a été évalué par la formule mathématique suivante:

$$FC = Ci/Cref.i$$

Où: Ci est la concentration en mg/l d'un contaminant (Ci) dans l'eau supposée contaminée; Cref, i est la concentration de référence en mg/l (Cref.i) dans les eaux de la Lufira en dehors des zones non impactées par des activités minières où la pêche et l'usage domestique s'y déroulent encore.

Si $FC \leq 1$: pas de pollution minière; Si $FC > 1$: existence d'une pollution minière dans le bassin.

L'indice de charge de pollution ou PLI a été calculé sur base de facteurs de contamination de chaque ETM de la manière suivante:

$$PLI = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n FCI_i}$$

Si $PLI = 0$: pas de détérioration; $PLI = 1$: présents aux concentrations de référence; $PLI > 1$ détérioration progressive du milieu [38].

2.2.4.2 CORRÉLATION DE PEARSON

Le coefficient de corrélation de Pearson a été appliquée pour mettre en évidence l'implication de dix métaux lourds ciblés dans la pollution des eaux du bassin hydrographique sous étude, à travers une matrice de corrélation en y intégrant le PLI qui, est le principal indice d'évaluation de la pollution des eaux par les ETMs pour examiner le rôle que joue chaque élément dans la toxicité des eaux. La formule suivante du coefficient de corrélation de Pearson (noté r) a été utilisée:

$$r = \frac{[n \Sigma(xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)]}{\sqrt{[(n \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2) * (n \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2)]}}$$

dont,

n = représente le nombre d'observations appariées (paire de données);

Σxy = est la somme des produits de chaque paire de valeurs (x, y);

Σx : est la somme des valeurs de la première variable (x);

Σy : est la somme des valeurs de la seconde variable (y);

Σx^2 : est la somme des carrés de la première variable (x^2);

Σy^2 : est la somme des carrés de la seconde variable (y^2).

2.2.4.3 ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

Les ACP est une méthode descriptive et exploratoire dont le but est d'extraire de la manière la plus synthétique possible, l'information contenue dans un tableau de données [39]. C'est une technique qui permet un arrangement des entités écologiques le long d'axes bi ou pluridimensionnelles sur la base des données relatives à la composition spécifique [40].

Le but principal de l'ACP est de simplifier et de condenser un ensemble de données qui aboutit à un diagramme dont les entités écologiques (Stations d'échantillonnage) sont représentées par des points [39], [41]. Dans le cadre de cette étude, l'ACP a été appliquée pour déterminer l'affinité des métaux lourds dosés sur base de leurs teneurs avec les rivières et lac prospectés.

2.2.5 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

La cartographie de la zone d'étude a été élaborée avec le logiciel ArcGIS version 10.8 grâce aux données de longitude et latitude relevées sur chaque point d'échantillonnage à l'aide d'un GPS de marque Garmin Etrex. Les données issues des différentes manipulations ont été encodées sur le tableur Excel 2013 suivi du calcul de la moyenne et de l'écart-type pour chaque paramètre physico-chimique avec le même logiciel. La normalité des données à soumettre aux analyses statistiques a été calculée à l'aide du test de [42] afin de tester l'homogénéité des variances [43]. Pour relever la différence de la variation entre les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques, l'analyse de la variance à un facteur de classification (ANOVA 1) [45] accompagnée du LSD (Least Significant Différence) test de Fisher [46] a été utilisée à l'intervalle de 95 % de confiance grâce au logiciel Statistix (version 10.8). Les résultats obtenus après les différents traitements et analyses sont exprimés sous forme des tableaux, graphiques et figures pour les rendre interprétables. Le logiciel Origin (version 6.1) a été utilisé pour dresser les graphiques en histogrammes sur la variation des paramètres physico-chimiques dans l'eau des rivières et du lac.

3 RESULTATS

3.1 QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES RIVIERES ET LAC TSHANGALELE

La variation de la qualité physico-chimique des eaux des rivières du bassin hydrographique de la rivière Lufira et celle du lac Tshangalele prospectés dans le cadre de cette étude est reprise dans les points ci-après. Les valeurs moyennes de différents paramètres qui portent les mêmes lettres alphabétiques ne présentent pas de différence statistique significative tandis que celles qui portent des lettres différentes sont statistiquement significative ($p < 0,05$) les unes des autres. La taille de l'échantillon en termes du nombre de prélèvement est de sept (7) répétitions pour chaque paramètre et pour chaque station.

Tableau 1. Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et le lac Tshangalele

Rivières et lac prospectés	Paramètres physico-chimiques analysés				
	Température (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Turbidité (UNT)	Salinité (%)
Kapemba	18,14±4,41 ^e	4,77±0,06 ^c	522,86±2,69 ^d	272,57±0,08 ^d	0,02±0,00 ^e
Mura	19,26±0,42 ^{de}	6,35±0,03 ^a	339,29±1,47 ^f	169,14±1,02 ⁱ	0,01±0,00 ^f
Kamilopa	22,84±0,96 ^b	5,78±0,05 ^b	553±2,57 ^d	275,29±1,18 ^d	0,02±0,00 ^d
Kapulande	27,06±0,18 ^a	4,56±0,05 ^c	2893,14±6,69 ^a	1437,57±6,49 ^a	0,13±0,01 ^a
CLP	24,21±0,39 ^b	5,72±0,07 ^b	643,71±2,9 ^c	319,14±1,59 ^c	0,03±0,00 ^c
Kimiba	23,99±0,1 ^b	5,89±0,02 ^b	902,57±2,94 ^b	448±2,29 ^b	0,04±0,00 ^b
Buluo	24,24±1,19 ^b	6,28±0,03 ^a	431±4 ^e	219,43±2,2 ^f	0,02±0,00 ^e
Panda 1	21,03±0,3cd	6,13±0,08 ^a	326,4±92,18f	190,57±0,78h	0,01±0,00f
Panda 2	22,46±0,48bc	4,75±0,03 ^c	456,86±2,16 ^e	228,57±1,51 ^e	0,02±0,00 ^e
Panda 3	22,46±0,12bc	5,6±0,01 ^b	420,14±2,16 ^e	211,71±2,24g	0,02±0,00 ^e
Lufira 1	24,06±0,33b	5,79±0,03 ^b	428,57±2,65 ^e	213±1,43g	0,02±0,00 ^e
Lufira 2	24,11±0,33b	5,29±0,03 ^b	430,14±1,88 ^e	214,14±1,02g	0,02±0,00 ^e
Tshangalele	24,42±1,27b	5,67±0,03 ^b	425±3,14 ^e	210,43±2,2g	0,02±0,00 ^e
Norme OMS	0 – 25	6,5 – 8,5	< 1500	< 5	-

De manière générale, les eaux de surface des rivières et du lac Tshangalele prospectés présentent une variation de qualité physico-chimique en fonction des paramètres environnementaux considérés et des écosystèmes considérés. Il s'observe que:

- ✓ Les eaux des rivières et lac sont chaudes avec une température moyenne comprise entre 18,14±4,41°C (rivière Kapemba) et 27,06±0,18 °C rivière Kapulande). En comparaison avec le seuil fixé par l'OMS pour une eau de boisson et de bonne qualité écologique, les valeurs de température relevées dans le cadre de cette étude sont dans la gamme de la fourchette requise (0 à 25°C) sauf pour la rivière pour Kapulande (27,06±0,18 °C). L'analyse de la variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée aux données de la température relevées dans les différentes rivières montre une différence très hautement significative ($F = 8,84$; $p = 0,0000$; LSD = 2,2354) entre les valeurs moyennes de température dont la plus élevée est celle de la rivière Kapulande suivie des rivières CLP, Kimiba, Buluo, Kamilopa et Panda.
- ✓ Deux tendances de potentiel d'hydrogène sont observées dans l'eau des rivières et le lac Tshangalele prospectés. De tous les écosystèmes aquatiques étudiés, le taux d'acidité le plus élevé avec une différence statistique très hautement significative ($F = 1960$; $p = 0,0000$; LSD = 0,0622) est observé dans l'eau des rivières Kapulande ($pH = 4,56\pm0,05$) qui reçoit directement les effluents miniers acides de l'unité industrielle GCM suivies des rivières Panda 2 ($pH = 4,75\pm0,03$) et Kapemba ($pH = 4,77\pm0,06$). Par contre, l'eau des rivières Mura ($pH = 6,35\pm0,03$), Buluo ($pH = 6,28\pm0,03$) et Panda 1 ($6,13\pm0,08$) sont légèrement acides par rapport à celle des autres rivières. Cette augmentation du pH vers la neutralité est due probablement à l'exploitation de la carrière de la chaux aux environs de ces dernières. En comparaison avec le seuil des valeurs guides fixées par l'OMS pour une eau de bonne qualité écologique pour la survie des organismes aquatiques, les valeurs relevées dans la plupart des écosystèmes aquatiques ainsi que le lac Tshangalele restent en dehors de la fourchette de la norme (6,5 à 8,5) sauf celle des rivières Mura, Buluo et Panda 1.
- ✓ L'eau des rivières et du lac Tshangalele analysée présente une grande variation du taux des ions en solution avec une différence statistique très hautement significative ($F = 2069$; $p = 0,0000$) entre les différentes valeurs moyennes obtenues.

Avec une valeur critique de 42,284; le LSD test montre que seule l'eau de la rivière Kapulande est la plus chargée en ions (conductivité = $2893,1 \pm 6,69 \mu\text{S}/\text{cm}$), au-delà de la Directive de l'OMS (Conductivité < 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$); suivie des rivières Kimiba (conductivité = $902,57 \pm 2,94 \mu\text{S}/\text{cm}$) et CLP (conductivité = $643,71 \pm 2,9 \mu\text{S}/\text{cm}$) et l'eau de la rivière Mura (conductivité = $339,29 \pm 1,47 \mu\text{S}/\text{cm}$) qui sont faiblement chargées en ions majeurs. Il s'observe que la conductivité relevée dans la rivière Kapulande reste de loin supérieure à la cette norme suite aux rejets directs des effluents miniers de l'unité industrielle CGM.

- ✓ L'eau des rivières et lac prospectés sont très turbides. L'analyse de la variance à un facteur appliquée aux données de turbidité met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 52629$; $p = 0,0000$) entre les différentes valeurs moyennes. La valeur critique de comparaison ($LSD = 4,1455$) montre que l'eau de la rivière Kapulande (turbidité = $1437,6 \pm 6,49 \text{ UNT}$) est plus chargée en particules solides que les autres rivières y compris le lac Tshangalele ($210,43 \pm 2,2 \text{ UNT}$), probablement, à cause des matières en suspension issues des activités de traitement des minerais mais aussi du lessivage des résidus miniers. Les faibles valeurs sont obtenues dans l'eau des rivières Mura ($169,14 \pm 1,05 \text{ UNT}$) et Buluo ($219,43 \pm 2,2 \text{ UNT}$). La turbidité moyenne relevée dans toutes les rivières du bassin hydrographique ainsi que celle du lac Tshangalele dépasse la valeur normative établie par l'OMS (turbidité = < 5 UNT) pour une eau de boisson et d'une bonne qualité écologique pour la vie des organismes aquatiques. Et pourtant, ces eaux sont consommées directement et/ou indirectement par des populations riveraines.
- ✓ Le taux du sel est variable d'un écosystème aquatique prospecté à l'autre en termes de salinité avec une différence statistique très hautement significative ($F = 486$; $p = 0,0000$; $LSD = 4,022$). Le test de LSD montre que les valeurs de salinité les plus élevées sont obtenues dans l'eau des rivières Kapulande ($0,13 \pm 0,00 \%$), Kimiba ($0,03 \pm 0,00 \%$) et CLP ($0,03 \pm 0,00 \%$) par rapport à celles des rivières Mura ($0,001 \pm 0,00 \%$) et Kapemba ($0,01 \pm 0,00 \%$) ainsi que le lac Tshangalele ($0,02 \pm 0,00 \%$).

3.2 TENEURS DES METAUX LOURDS CIBLES DANS LES EAUX DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE LA RIVIERE LUFIRA ET LAC TSHANGALELE

La variation des teneurs de dix métaux lourds dosés dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la rivière Lufira et le lac Tshangalele dans ce bassin, dans le cadre de cette étude est reprise dans les sections qui suivent. Les teneurs moyennes de différents ETMs qui portent les mêmes lettres alphabétiques ne présentent aucune différence statistique significative ($p > 0,05$) tandis que celles qui portent des lettres différentes sont statistiquement significative ($p < 0,05$) les unes des autres. La taille de l'échantillon en termes du nombre de dosage est de six (6) répétitions pour chaque métal dosé.

3.2.1 VARIATION D'ARSENIC

Il ressort des résultats consignés sur la figure 2 ci-dessous que l'eau des rivières du bassin hydrographique de la rivière Lufira ainsi que celle du lac Tshangalele présentent une variation du taux de contamination en arsenic avec une différence statistique très hautement significative ($F = 7,35$; $p = 0,0000$) les uns des autres. Le test de LSD ($0,0324$) montre que l'eau de la rivière Kapulande est la plus contaminée en As ($0,12 \pm 0,04 \text{ mg/L}$) suivi de la rivière Kapemba ($0,08 \pm 0,01 \text{ mg/L}$) par rapport aux restes des rivières et lac Tshangalele ($0,01 \pm 0,00 \text{ mg/L}$). Par contre, les teneurs d'As relevée dans l'eau de la plupart des rivières de ce bassin hydrographique restent largement supérieures à la valeur normative dictée par l'OMS ($0,01 \text{ mg/L}$) pour l'eau douce de boisson et d'une bonne qualité écologique.

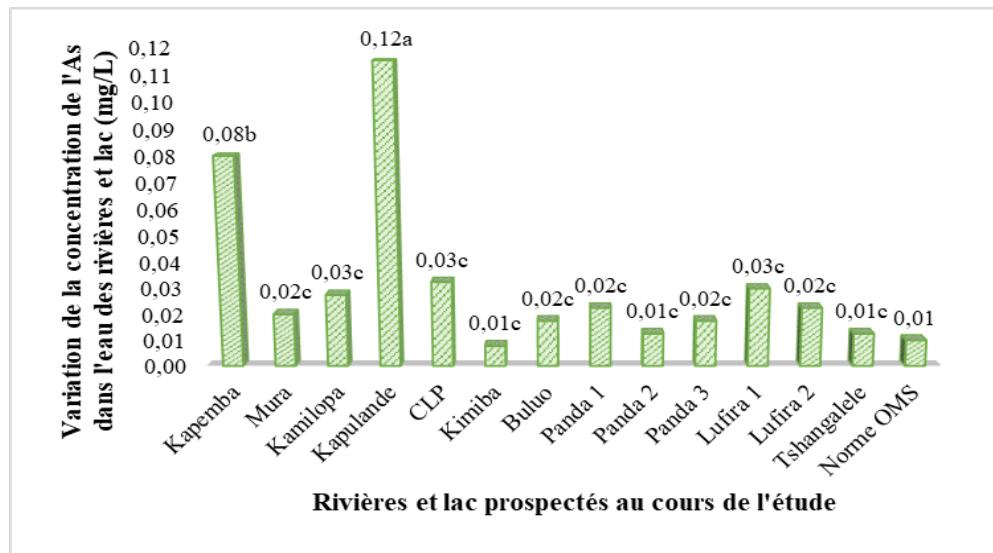


Fig. 2. Variation de la teneur d'As (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la norme de l'OMS

3.2.2 VARIATION DE CADMIUM

L'eau de la Kapemba ($0,22 \pm 0,19$ mg/L) suivie de celle des rivières Kapulande ($0,06 \pm 0,03$ mg/L) et Lufira au point 2 de prélèvement ($0,1 \pm 0,1$ mg/L) sont plus contaminées en Cd avec une différence statistique très significative ($F = 2,14$; $p = 0,0364$; LSD = 0,1196) par rapport aux autres écosystèmes aquatiques notamment, le lac Tshangalele ($0,01 \pm 0,01$ mg/L). En comparaison avec la valeur guide du seuil acceptable par la norme de l'OMS (0,003 mg/L) pour l'eau douce de boisson et d'une bonne qualité écologique, les concentrations moyennes en Cd relevées dans toutes les rivières du bassin de la Lufira ainsi que dans le lac Tshangalele sont de loin supérieures (figure 3).

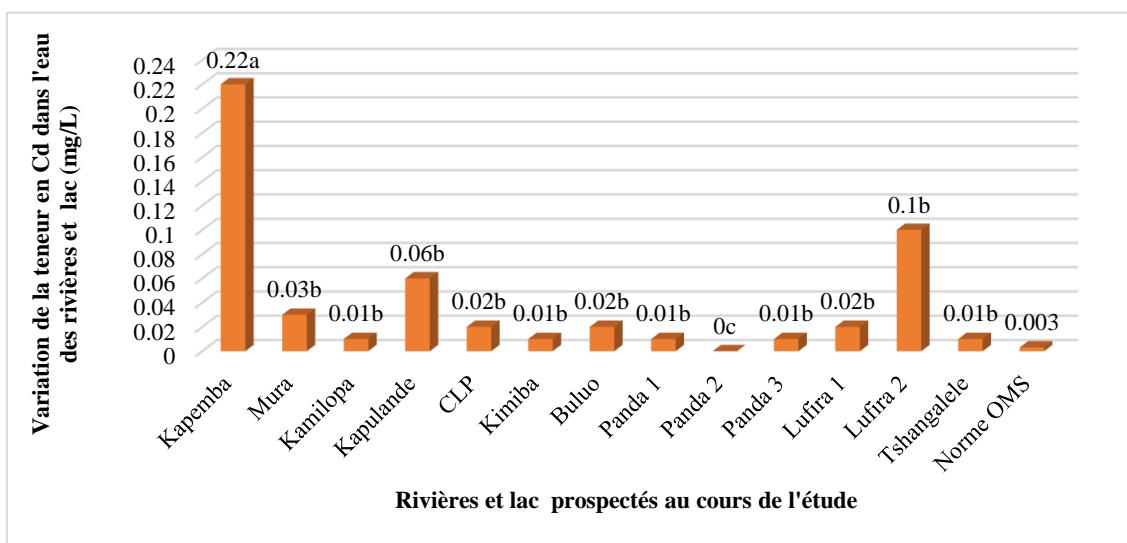


Fig. 3. Variation de la teneur de Cd (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la norme de l'OMS

3.2.3 VARIATION DE COBALT

La concentration de Co dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira comme dans le lac Tshangalele présente une disparité des teneurs (figure 4). L'analyse de la variance à un facteur appliquée aux teneurs de Co relevées à travers les rivières du bassin et le lac Tshangalele met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F =$

359; $p = 0,0000$; LSD = 0,1318) où, l'eau de la rivière Kapulande ($3,19 \pm 0,24$ mg/L) est la plus contaminée que celle de tous les écosystèmes aquatiques prospectés au cours de l'étude. Toutefois, en comparaison avec la valeur guide (0,07 mg/L) établie par la Directive Européenne (2020) sur la bonne qualité de l'eau de boisson et de la vie aquatique, la contamination relevée dans les rivières Kapulande ($3,19 \pm 0,24$ mg/L), Panda 2 ($0,09 \pm 0,02$ mg/L) et Lufira 1 ($0,09 \pm 0,01$ mg/L) reste également supérieure.

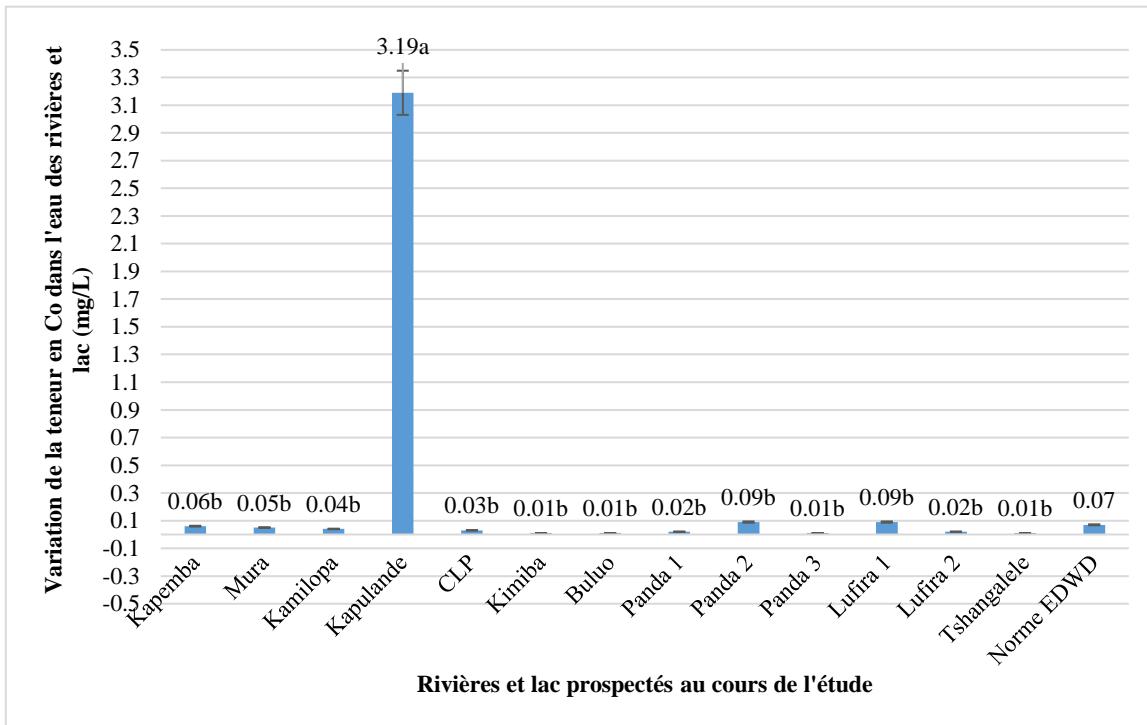


Fig. 4. Variation de la teneur de Co (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la Directive Européenne (EDWD) (2020)

3.2.4 VARIATION DE CHROME

La contamination en Cr dans les rivières du bassin hydrographique de la Lufira semble présenter une tendance d'augmentation d'amont vers l'aval (figure 5). Il ressort des résultats obtenus que la concentration de Cr dosée dans la rivière Lufira au point 1 ($0,09 \pm 0,01$ mg/L) de prélèvement est plus élevée avec une différence statistique significative ($F = 1,22$; $p = 0,0308$; LSD = 0,0595) suivie des taux de contamination relevées dans les rivières Kapemba ($0,03 \pm 0,01$ mg/L) et Kapulande ($0,03 \pm 0,02$ mg/L). Des très faibles traces de Cr sont obtenues dans les rivières Mura, Kamilopa et Panda 1 et 3. En comparaison avec la valeur normative dictée par la Directive Européenne (2020) (0,05 mg/L) pour l'eau de boisson comme pour une bonne qualité écologique, les concentrations relevées dans les rivières y compris dans le lac Tshangalele dans le cadre de cette étude restent inférieures, sauf pour la rivière Lufira.

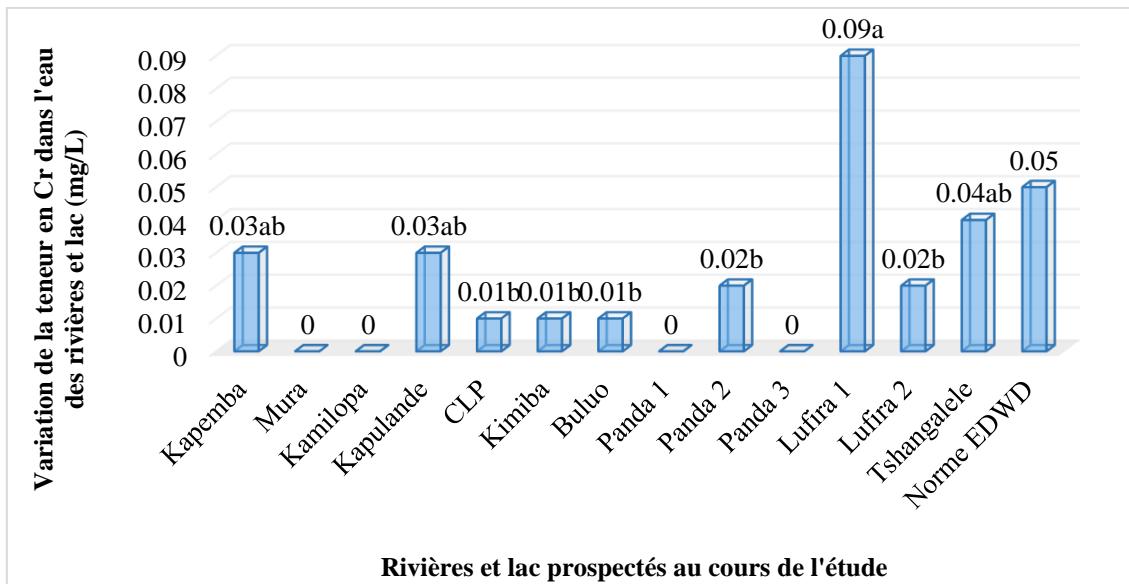


Fig. 5. Variation de la teneur de Cr (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la Directive Européenne (EDWD)

3.2.5 VARIATION DU CUIVRE

La contamination en Cu est plus élevée dans la rivière Kapulande ($0,45 \pm 0,24$ mg/L) avec une différence statistique très hautement significative ($F = 8,45$; $p = 0,0000$; LSD = 0,1142) par rapport aux concentrations moyennes relevées dans les autres rivières y compris le lac Tshangalele ($0,06 \pm 0,02$ mg/L). En comparaison avec la valeur normative (2 mg/L) fixée par l'OMS pour une eau de boisson et de bonne qualité écologique, il s'observe que le taux de contamination relevé dans toutes les rivières du bassin hydrographique de la Lufira y compris dans le lac Tshangalele reste faible (figure 6).

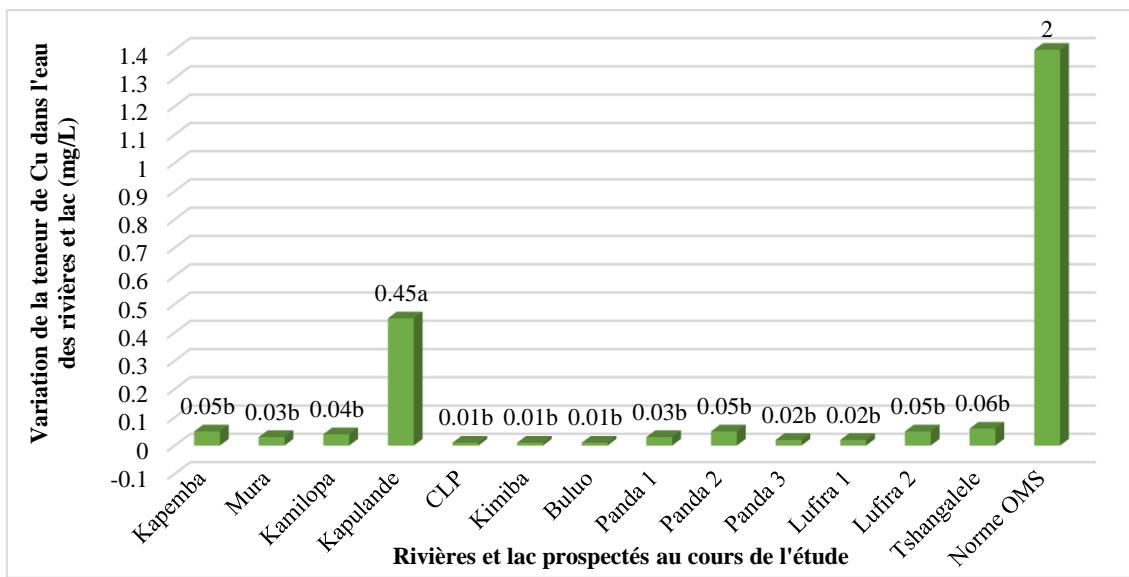


Fig. 6. Variation de la teneur de Cu (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en comparaison avec la norme de l'OMS

3.2.6 VARIATION DE MANGANESE

Le Mn présente un taux de contamination le plus élevé dans les rivières Kapulande ($1,92 \pm 0,12$ mg/L) suivie de la Panda 2 ($1,45 \pm 0,32$ mg/L), Kapemba ($0,36 \pm 0,16$ mg/L), Lufira 2 ($0,26 \pm 0,05$ mg/L), Tshangalele ($0,24 \pm 0,02$ mg/L) et Panda 1 ($0,14 \pm 0,04$

mg/L) que la valeur guide dictée par la Directive Européenne (2020) (0,05 mg/L) pour une eau de boisson et d'une bonne qualité écologique (figure 7). L'analyse de la variance à un facteur appliquée aux teneurs de Mn dosé dans l'eau des rivières dégage une différence statistique très hautement significative ($F = 81,9$; $p = 0,0000$; LSD = 0,1934) du taux de contamination dans les rivières et lac où la rivière Kapulande présente une forte contamination suivie de la rivière Panda 2 puis les rivières Kapemba et Lufira.

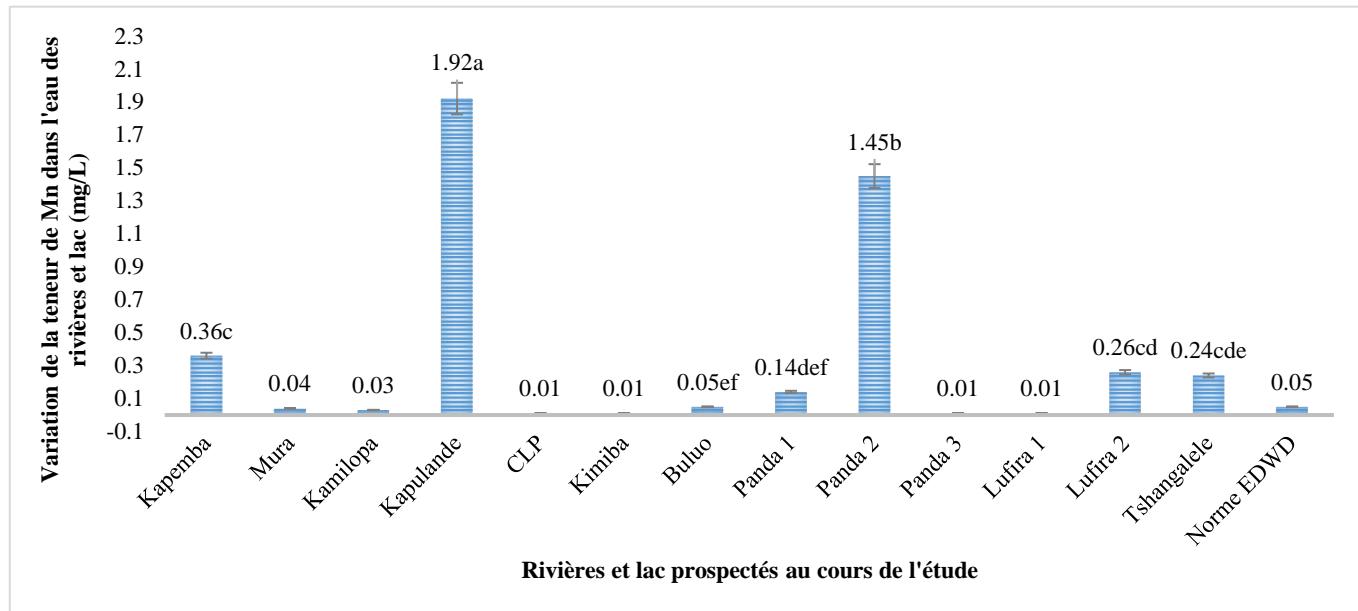


Fig. 7. Variation de la teneur de Mn (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la Directive Européenne (EDWD)

3.2.7 VARIATION DE NICKEL

De toutes les rivières du bassin hydrographique de la Lufira, la rivière Buluo est la plus contaminée en Ni ($9,98 \pm 1,52$ mg/L) avec une différence statistique très hautement significative ($F = 98,4$; $p = 0,0000$; LSD = 0,7955) par rapport aux taux de contamination relevés dans les autres rivières ainsi que le lac Tshangalele. Comparativement à la valeur normative fixée par l'OMS (0,02 mg/L), la contamination relevée dans la plupart des rivières et le lac Tshangalele demeure de loin supérieure. Par contre, le taux de contamination de Ni reste faible dans les autres rivières en comparaison avec la valeur normative de l'OMS (figure 8).

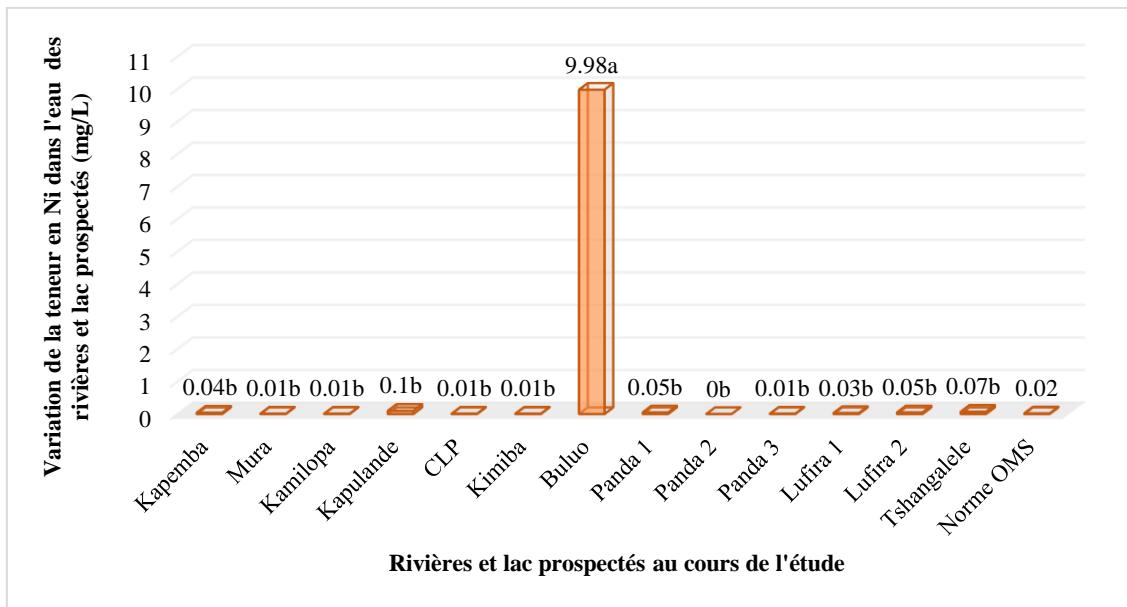


Fig. 8. Variation de la teneur de Ni (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la norme de l'OMS

3.2.8 VARIATION DE PLOMB

Le taux de contamination en Pb dans l'eau de la plupart des rivières et du lac Tshangalele reste de loin supérieur par rapport à la valeur normative fixée par l'OMS (0,01 mg/L) pour une eau de boisson et d'une bonne qualité écologique (figure 9). Au niveau des écosystèmes aquatiques du bassin hydrographique de la Lufira, l'analyse de la variance appliquée aux concentrations de Pb montre une différence statistique hautement significative ($F = 3,59$; $p = 0,0012$; LSD = 0,0220) où, la rivière Kapulande présente une contamination plus élevée ($0,05 \pm 0,02$ mg/L) suivie des rivières CLP ($0,03 \pm 0,03$ mg/L) et Panda 2 ($0,03 \pm 0,01$ mg/L) ainsi que le lac Tshangalele ($0,03 \pm 0,01$ mg/L).

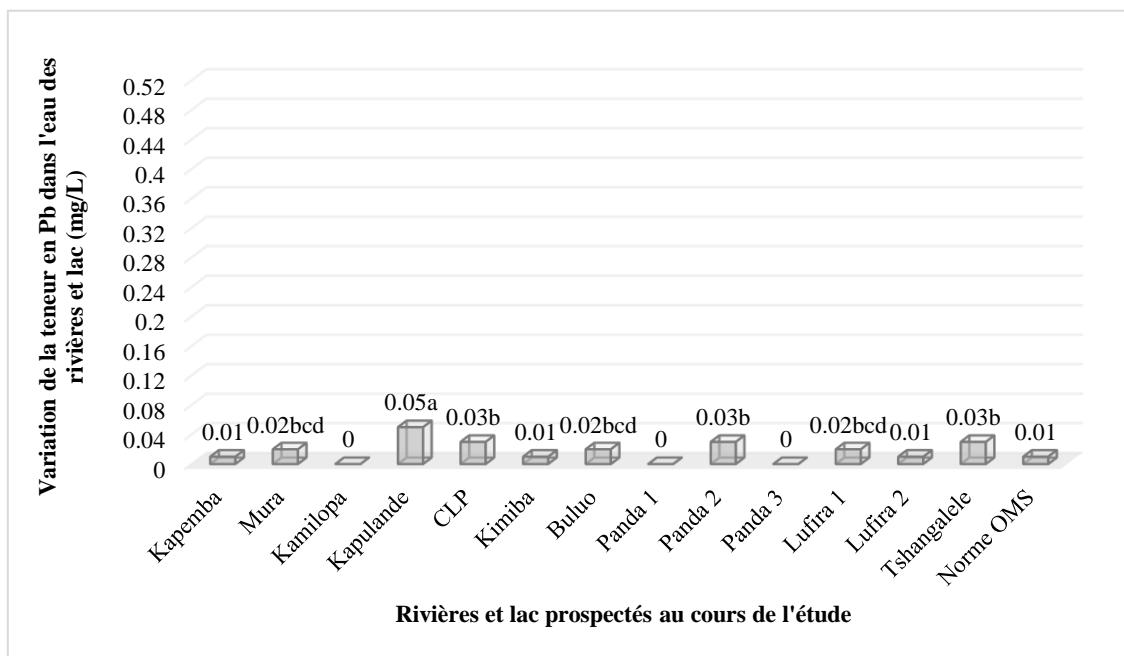


Fig. 9. Variation de la teneur de Pb (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en rapport avec la norme OMS

3.2.9 VARIATION DE SÉLÉNIUM

Le Se dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira ainsi que le lac Tshangalele est relevé dans presque tous les écosystèmes aquatiques à des concentrations variables (figure 10). L'analyse de la variance à un facteur appliquée aux données de contamination de l'eau des écosystèmes considérés met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 4,01$; $p = 0,0005$; $LSD = 0,0434$) indiquant une contamination élevée dans l'eau de la rivière Kapulande ($0,11 \pm 0,06$ mg/L) suivie de celle de Panda 3 ($0,09 \pm 0,02$ mg/L) puis Kapemba ($0,06 \pm 0,02$ mg/L). Les eaux du lac Tshangalele ($0,01 \pm 0,01$ mg/L), Lufira ($0,01 \pm 0,00$ mg/L) et Buluo ($0,01 \pm 0,01$ mg/L) sont très faiblement contaminées en Se. En comparaison avec le seuil de la norme (0,01 mg/L) établie par l'OMS pour une eau de boisson et d'une bonne qualité écologique, le taux de contamination obtenu dans la majorité des rivières du bassin de la Lufira est très élevé.

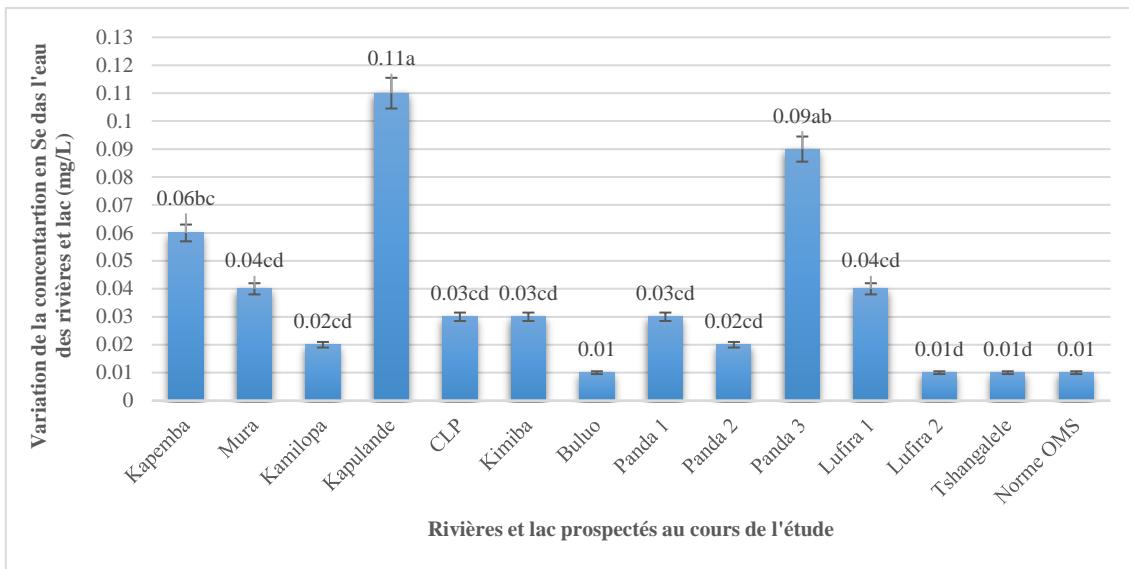


Fig. 10. Variation de la teneur de Se (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en comparaison avec la norme OMS

3.2.10 VARIATION DE ZINC

Les résultats repris sur la figure 11 ci-dessous montrent que la rivière Kapulande est la plus contaminée en Zn ($0,7 \pm 0,19$ mg/L) avec une différence statistique très hautement significative ($F = 30,6$; $p = 0,0000$; $LSD = 0,0959$) suivie du lac Tshangalele ($0,12 \pm 0,03$ mg/L) et le taux de contamination de Zn dans les autres rivières est très faible. En comparaison avec le seuil de la norme OMS sur la présence de ce métal dans l'eau de boisson ou d'une bonne qualité écologique, la valeur normative fixée (3 mg/L) reste de loin supérieure que celle dosée dans tous les écosystèmes aquatiques du bassin hydrographique de la Lufira.

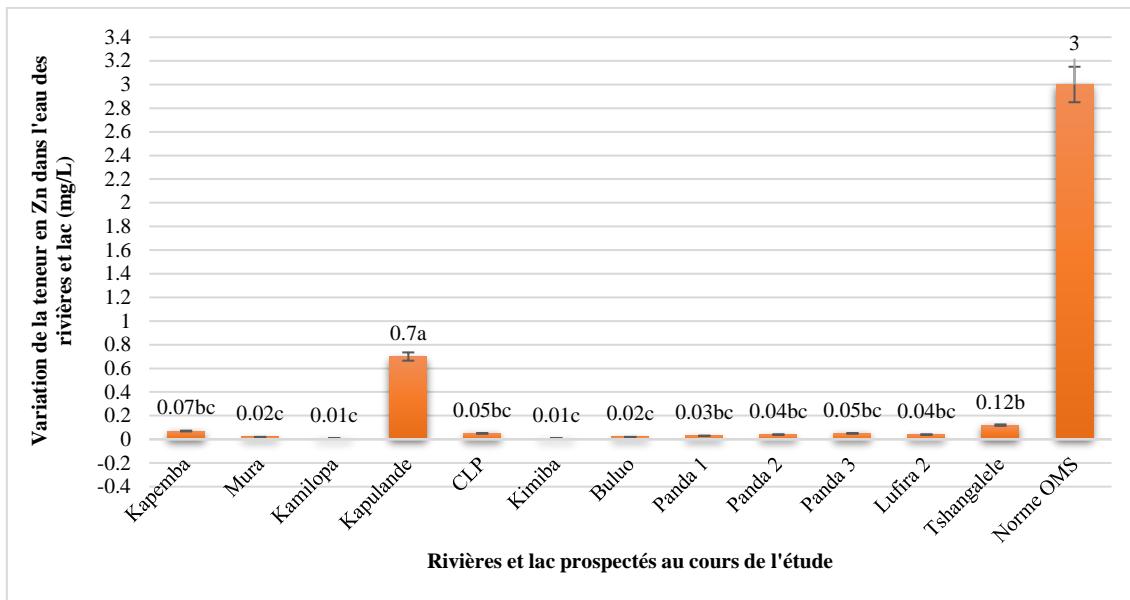


Fig. 11. Variation de la teneur de Zn (mg/L) dans l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele en comparaison avec la norme OMS

3.3 VALEURS DE FACTEUR DE CONTAMINATION (FC) ET INDICE DE CHARGE POLLUANTE (PLI)

Le tableau 1 ci-dessous donne les FC de chaque ETM des eaux des rivières et lac dans le bassin de la Lufira pour les 13 stations d'échantillonnage, mais aussi les indices de charges polluantes, en anglais « Pollution Load Indice » (PLI) de chaque rivière et le lac Tshangalele.

Tableau 2. Valeurs de FC et de PLI des eaux du bassin hydrographique de la Lufira

ETM (mg/l)	Stations d'échantillonnage (rivières et lac Tshangalele)												Concentration géochimique
	Kapemba	Mura	Kamilopa	Kapulande	CLP	Kimba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	
As	5,7	1,4	2,1	8,6	2,1	0,7	1,4	1,4	0,7	1,4	2,1	1,4	0,7
Cd	110	15	5	30	10	5	10	5	-	5	10	50	225,7
Co	2,3	1,9	1,5	122,7	1,2	0,4	0,4	0,8	3,5	0,4	3,5	0,8	7,4
Cr	30	-	-	30	10	10	10	-	20	-	90	20	108,3
Cu	4,2	2,5	3,3	37,5	0,8	0,8	0,8	2,5	4,2	1,7	1,7	4,2	0,3
Mn	9,2	1	0,8	49,2	0,3	0,3	1,3	3,6	37,2	0,3	0,3	6,7	16,7
Ni	40	10	10	100	10	10	9,980	50	-	10	30	50	474
Pb	1,3	2,5	-	6,3	3,8	1,3	2,5	-	3,8	-	2,5	1,3	50,8
Se	0,8	0,5	0,3	1,4	0,4	0,4	0,1	0,4	0,3	1,2	0,5	0,1	1,8
Zn	70	20	10	700	50	10	30	20	30	40	50	40	5,4
PLI	9,2	2,8	2	31,9	2,9	1,6	4,7	2,7	3,4	1,9	4,7	5	13,3

Il ressort des résultats repris au tableau ci-dessus que le niveau de pollution de l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira ainsi que du lac Tshangalele se diffère d'un élément métallique à l'autre et en fonction des stations considérées. Mais en tenant compte de la coloration du tableau en termes de FC, 72,3 % colorés en rouge montre que le bassin de la Lufira est contaminé sur base des stations échantillonées et en fonctions des 10 ETMs dosés. Toutefois, le FC de certains ETMs ont présenté des valeurs anormalement élevées dans certaines stations (rouge sang), notamment le Cd (Kapemba et Tshangalele);

le Co (Shituru); le Cr (Tshangalele); le Ni (Kapulande, Buluo et Tshangalele) et le Zn pour Buluo. En tenant compte de PLI, toutes les valeurs sont supérieures à un (01) indiquant une dégradation globale des eaux dans le bassin hydrographique de la Lufira, mais dans l'ordre suivant: Kapulande > Lac Tshangalele > Kapemba > Lufira 2 > Buluo et Lufira 1 > Panda 2 > CLP > Mura > Panda 1 > Kamilopa > Panda 3 > Kimiba.

3.4 CORRELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS DES ETMS ET PLI

Dans le cadre de cette étude, le coefficient de corrélation de Pearson a été utilisé pour mettre en évidence l'implication de dix métaux lourds dosés dans la pollution des eaux du bassin hydrographique sous étude, à travers une matrice de corrélation (tableau 2). Le PLI, qui est le principal indice d'évaluation de la pollution des eaux par les ETMs a été incorporé dans la matrice de corrélation pour examiner le rôle que joue chaque élément dans la toxicité des eaux.

Tableau 3. *Matrice de corrélation entre les concentrations des ETMs et PLI*

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Se	Zn	PLI
As		0,83	0,00	0,92	0,00	0,05	0,91	0,66	0,21	0,00	0,00
Cd	0,07		0,97	0,01	0,86	0,60	0,00	0,00	0,01	0,89	0,24
Co	0,82	0,01		0,77	0,00	0,00	0,65	0,85	0,10	0,00	0,00
Cr	0,03	0,70	0,09		1,00	0,52	0,00	0,00	0,06	0,89	0,25
Cu	0,85	-0,05	0,99	0,00		0,00	0,90	0,87	0,19	0,00	0,00
Mn	0,56	0,16	0,77	0,19	0,78		0,42	0,46	0,16	0,00	0,00
Ni	-0,04	0,90	0,14	0,74	0,04	0,25		0,00	0,00	0,86	0,16
Pb	-0,14	0,88	0,06	0,74	-0,05	0,23	0,98		0,01	0,92	0,27
Se	0,37	0,66	0,48	0,53	0,39	0,41	0,74	0,69		0,14	0,02
Zn	0,86	-0,04	0,99	0,04	0,99	0,74	0,05	-0,03	0,43		0,01
PLI	0,82	0,35	0,93	0,34	0,90	0,78	0,41	0,33	0,64	0,92	

Les résultats repris au tableau ci-dessus montrent que l'As ($r = 0,82$), le Cd ($r = 0,93$), le Cu ($r = 0,90$) et le Zn ($r = 0,92$) sont les éléments fortement corrélés au PLI, avec un coefficient de corrélation de Pearson de plus de 0,8. Certains ETMs pris deux à deux notamment: Cu et As ($r = 0,85$), Cu et Co ($r = 0,99$), Ni et Cd ($r = 0,90$), Pb et Cd ($r = 0,88$), Pb et Ni ($r = 0,98$) et Zn et Cu ($r = 0,99$) expriment d'importantes liaisons entre eux. La forte liaison observée entre ces ETMs suggère une origine commune de ces éléments.

3.5 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE EN FONCTION DE PLI

La matrice de corrélation entre les valeurs de PLI, appelé aussi « Pollution Load Indice » (PLI), de l'eau et les rivières du bassin hydrographique établie à travers l'analyse en composantes principales montre que les dix métaux lourds contribuent différemment dans la pollution des eaux analysées. La figure 14 montre que l'axe 1 explique 98,76% de la variance des données tandis que l'axe 2 explique 0,86%, ce qui indique que l'axe 1 retient la majeure partie d'information. En termes de corrélation, ces résultats montrent que la pollution de l'eau des rivières Kamilopa, Lufira 1 et 2, Buluo, Kimiba, Kapulande, CLP, Panda 1 et 3, Mura ainsi que celle du lac Tshangalele est influencée principalement par neuf (9) métaux lourds notamment: le Cu, Ni, Co, Zn, As, Cr, Pb, Se et Cd qui sont corrélés positivement à la qualité de l'eau de ces écosystèmes. La pollution PLI de l'eau de la rivière Panda 2 est influencée en grande partie par la contamination en Mn (figure 12).

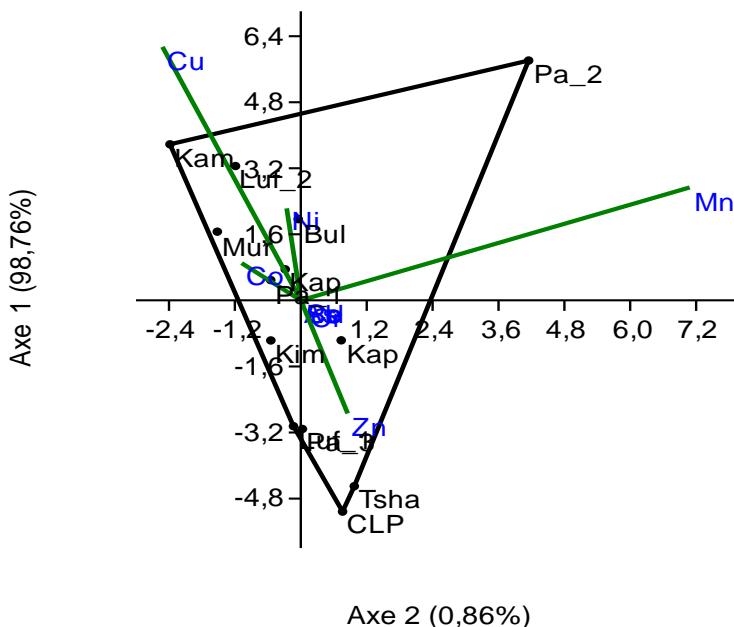


Fig. 12. Diagramme d'analyse en composantes principales de corrélation entre les rivières du bassin hydrographique de la Lufira et lac Tshangalele et l'indice de charge de pollution de l'eau (PLI)

4 DISCUSSION

Les résultats des paramètres physico-chimiques relevés dans les rivières Kapulande, Kapemba, Kimiba, Panda et CLP démontrent que les valeurs moyennes de certains de ces paramètres notamment la conductivité, la turbidité et le pH ont été en dehors de la gamme des fourchettes exigées pour une eau de bonne qualité écologique. Ainsi, cela est dû par les rejets dans les cours d'eaux des effluents (non traités ou mal traités) des usines minières qui contiennent des métaux lourds ainsi que des résidus de différents produits chimiques soit dans les processus d'extraction et de séparation, soit dans les processus de raffinage [47], [48].

Le niveau de pollution de l'eau des rivières du bassin hydrographique de la Lufira ainsi celle du lac Tshangalele par les métaux lourds a été évalué dans le cadre de cette étude à travers les analyses chimiques des ETM et des quelques indices de pollution d'eau. Ainsi, les résultats obtenus ont montré que l'eau des rivières et lac prospectés sont contaminés par divers éléments traces métalliques avec une concentration dépassant pour la plupart le seuil de contamination acceptable par les Directives de [49] et [50] sur la bonne qualité de l'eau de boisson et d'une bonne qualité écologique. En termes du taux de contamination élémentaire, l'As (rivières Kapulande > Kapemba > lac Tshangalele), le Cd (Kapemba > Lufira 2), le Co (Kapulande > Panda 2 > Lufira), le Cr (Lufira > Kapemba > Kapulande), le Cu (Kapulande > Tshangalele), le Mn (Kapulande > Panda 2 > Kapemba > Lufira 2 > Tshagalele), Le Ni (Lufira > Buluo), Pb (Kapulande > CLP > Panda), le Se (Kapulande > Panda 3 > Kpamba) et Zinc (Kapulande > Tshangalele). Les fortes concentrations des ETMs dosés dans l'eau des rivières et lac prospectés sont dues à la nature géologique de la zone [9] pour certains métaux mais, aussi et surtout aux activités minières [5] qui ont lieu le long des sous-bassins versant de la plupart de ces rivières qui composent le bassin hydrographique de la Lufira. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont proches de ceux obtenus par [4], [5], [7].

Dans leur étude, [5] ont obtenu des taux de contamination compris entre 0,004 mg/L (Lufira 3) et 0,08 mg/L (Kapulande) pour le Pb, 0,001 mg/L (Panda 1) à 39,7 mg/L (Kapulande) pour le Cd, 0,001 mg/L (Panda 1, Lufira 1, 2 et 3) et 0,012 mg/L (Kapulande) pour l'As, 0,19 mg/L (Panda 1) à 32,3 mg/L (Kapulande) pour le Co, 0,32 mg/L (Lufira 1 et 3) à 70,9 mg/L (Kapulande) pour le Cu et 0,12 mg/L (Lufira 3) à 5,24 mg/l (Lufira 1). Par ailleurs, le taux de contamination relevé dans la présente étude reste légèrement inférieur en comparaison avec les valeurs relevées par [5]. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait qu'avec le temps, grâce aux efforts de certains services étatiques de l'Etat Congolais, certaines sociétés minières se démènent à se conformer à la réglementation minière en ce qui concerne la qualité des effluents rejetés dans la nature, notamment dans les écosystèmes aquatiques à travers des stations d'épuration [4], [7]. Aussi, le processus d'autoépuration de ces écosystèmes aquatiques très dynamiques et l'éloignement avec les sources de pollution contribuent à diluer le taux de contamination de

ces derniers, d'amont vers l'aval; étant donné que la plupart des entreprises minières présentes dans la zone d'étude sont installées vers l'amont dans la ville de Likasi et ses environs.

Quand on y ajoute le phénomène de la bioaccumulation, les écosystèmes aquatiques prospectés plus particulièrement la chaîne trophique ainsi que l'homme sont dangereusement exposés à la pollution aux différents métaux lourds ciblés dans le cadre de cette étude. Ces métaux lourds peuvent générer des cancers reconnus (cancers de la peau, du foie, des poumons), occasionner des troubles cardiovasculaires, dermatologiques, neurologiques et gastro-intestinaux [51], [52]. Ces eaux, directement ou indirectement consommées (phénomène de la bioaccumulation dans la chaîne trophique) par ces métaux lourds constituent un risque pour les populations qui sont exposées à plusieurs pathologies et dysfonctionnement physiologique [53], [52]. Des effets chroniques peuvent être des atteintes hépatiques et rénales, troubles neurologiques, anémie, tachycardie et parfois maladies graves après exposition prolongée à des concentrations élevées. Les nourrissons sont plus vulnérables [51]. Certains de ces métaux provoquent des irritations du système respiratoire, des atteintes cardiaques et thyroïdiennes, des effets cancérogènes à long terme, des perturbations sur la croissance, la reproduction et la survie des poissons, des invertébrés et des végétaux aquatiques. Une bioaccumulation possible dans la chaîne alimentaire peut entraîner des effets toxiques chez les prédateurs et modifier l'équilibre des écosystèmes aquatiques [51], [53]. L'exposition au nickel, même à des concentrations faibles, peut provoquer des effets allergiques, des irritations cutanées, et des troubles respiratoires. Une exposition prolongée peut entraîner des problèmes rénaux, des troubles du système immunitaire et potentiellement des effets cancérogènes. Les groupes vulnérables, comme les enfants et les femmes enceintes, sont particulièrement à risque. Sur le plan écologique, le nickel peut nuire à la vie aquatique, affectant la reproduction et la survie des poissons et autres organismes. Ces organismes aquatiques peuvent accumuler le nickel, entraînant des concentrations toxiques dans les chaînes alimentaires (bioaccumulation) [43], [51].

Dans le cadre de cette étude, l'indice de pollution de l'eau PLI a permis de différencier les milieux très pollués de ceux qui sont moins pollués. Sur base de l'indice PLI, il a été relevé que l'eau de la rivière Kapulande est hautement polluée que celle des rivières Buluo, Panda, Lufira, Kapemba et le lac Tshangalele où la pollution a été jugée légère. Le coefficient de corrélation de Pearson a permis de clarifier la contribution des métaux lourds étudiés dans la pollution des eaux du bassin hydrographique étudié. L'As ($r = 0,82$), le Cd ($r = 0,93$), le Cu ($r = 0,90$) et le Zn ($r = 0,92$) ont été les éléments fortement corrélés au PLI, avec un coefficient de corrélation de Pearson de plus de 0,8. Certains ETMs pris deux à deux notamment: Cu et As ($r = 0,85$), Cu et Co ($r = 0,99$), Ni et Cd ($r = 0,90$), Pb et Cd ($r = 0,88$), Pb et Ni ($r = 0,98$) et Zn et Cu ($r = 0,99$) ont aussi exprimé d'importantes liaisons entre eux. La forte liaison observée entre ces ETMs suggère une origine commune de ces éléments d'après les allégations faites par [55]. La pollution telle que présentée dans l'eau des rivières est liée aux rejets dans les écosystèmes aquatiques des effluents minières non et/ou mal traités. D'après les observations faites par [56], quel que soit la performance de la station d'épuration utilisée (lagunage, boue active, etc.), une quantité importante de la charge métallique sous différentes formes peut se retrouver dans l'eau du point de pollution jusqu'en aval. Dans la plupart des cas, les activités anthropiques influent négativement sur la qualité de l'eau des écosystèmes aquatiques et leurs ressources à travers la pollution [56], [57], [58]. Il est donc clair que la pollution des eaux dans la zone d'étude est causée principalement par des activités minières à travers les usines d'extraction et traitement qui sont installées dans cette zone.

5 CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'analyser le niveau de pollution dans l'eau des rivières du bassin hydrographiques de la rivière Lufira et celle du lac Tshangalele dans la province du Haut Katanga en RD Congo en vue d'évaluer le niveau de risque et d'exposition dont fait face ces écosystèmes aquatiques et leurs ressources. Les résultats obtenus ont montré que l'eau des rivières et du lac prospectés sont contaminées par divers éléments traces métalliques à des concentrations dépassant pour la plupart le seuil de contamination acceptable par les directives de l'OMS (2017) et Européenne sur la bonne qualité de l'eau de boisson et écologique. De toutes les rivières prospectées, les rivières Kapulande, Panda, Lufira et Kapemba ont été les plus contaminées. L'indice de pollution de l'eau PLI a permis de différencier les milieux très pollués de ceux qui sont moins pollués. Sur base de cet indice, il a été relevé que l'eau de la rivière Kapulande est hautement polluée que celle des rivières Buluo, Panda, Lufira, Kapemba et du lac Tshangalele où la pollution a été jugé faible. Bien que la pollution soit aussi occasionnée par des facteurs naturels dans la zone d'étude, il a été observé que la majeure contribution est celle de l'exploitation minière. Des recherches futures axées sur la pollution des sédiments et des ressources aquatiques de ces écosystèmes ainsi que le risque d'exposition de la population locale qui recourt à ces écosystèmes aquatiques sont vivement souhaitées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les techniciens des Laboratoires des Produits Pétroliers et de Chimie de l'Office Congolais de Contrôle de Lubumbashi pour leur contribution dans le dosage des éléments traces métalliques dans les échantillons d'eaux des rivières étudiées.

REFERENCES

- [1] Diangone E., N'guessan Y., Toalo L., Sylvain M., Aoua C.M. 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, ESJ*, 16 (33): 70 - 87. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p70>, 2020.
- [2] Kakudji M.M., Mbuyi M. Impact of mining activities on water quality in the Haut-Katanga Province: A case study of the Lualaba River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (4): 1 - 12. doi: 10.1007/s10661-020-08245-5, 2020.
- [3] Clemens S., Ma J.F. Toxic Heavy Metal Accumulation in Plants: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (1), 1-12. doi: 10.1007/s11356-015-5350-0, 2016.
- [4] Unyumbe Y.K.B. Drame écologique: Contamination aux métaux lourds des eaux et des sédiments du bassin hydrologique de la rivière Lufira. Online Bookstorec. Libroterra. ISBN 978-1-63902-560-2, 159 p, 2021a.
- [5] Katemo M.B., Colinet G., André L., Chocha M.A., Marquet J-P., Micha J-C. 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/R Congo). *Tropicultura*, 28 (4), 246-252, 2010.
- [6] Mata K.H., Mohammed M.A.D., Ngweme N.G., Konde N.J., Mulaji K.C., Kiyombo M.G., Poté, W.J. Toxic metal concentration and ecotoxicity test of sediments from dense populated areas of Congo River, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Environemental Chemistry and Ecotoxicology*, 2: 83 – 90, 2020.
- [7] Unyumbe Y.K.B. Industries minières, ses impacts et outils d'évaluation environnementale: Risques professionnels, drainage miniers acides et devenir des métauxlourds. *Editions universitaires européennes*, ISBN: 978-620-3-44594-7, 2021b.
- [8] Nakweti K.J., Lusasi S.W., Tembeni M.J. Evaluation des teneurs en éléments traces métalliques (Cadmium et Plomb) dans l'eau, les sédiments et deux espèces de poissons *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) et *Oreochromis niloticus* (Linné, 1758) dans le Pool Malebo (Fleuve Congo), RD Congo. *European Scientific Journal, ESJ*, 17 (25), 174 - 192. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n25p17>, 2021.
- [9] Chalet J.M. Etude géologique de l'arc cuprifère du Shaba. Progrès réalisés entre 1950 et Davey JC, Bodwell JE, Gosse JA, Hamilton JW. (2007). Arsenic as an endocrine disruptor: effects of arsenic on estrogen receptor-mediated gene expression in vivo and in cell culture. *Toxicol Sci Off J Soc Toxicol* 2007; 98: 75–86, 1997.
- [10] www.rsis.ramar.org. Consulté le 11/07/2025. Service d'information sur les sites Ramsar.
- [11] Atibu E. Concentration des métaux dans les eaux des surfaces et les sédiments des rivières Luilu et Musonoie, Kolwezi-Katanga, République démocratique du Congo. *Sciences Direct Géochimie appliquée*, 26-32, 2013.
- [12] Foxall C., Chale F., Bailey-Watts A., Patterson G., West K. Les pesticides et les métaux lourds dans les poissons et les mollusques du Lac Tanganyika. *Lake Tanganyika Biodiversity Project*, République Démocratique du Congo, 16 p, 2000.
- [13] Nsimanda I.C., Musobono E.D., Basosila L.N., Wanga B.M.B. Contribution à l'étude écotoxicologique du Cadmium et du Plomb dans *Distichodus fasciolatus*, *Mormyrops anguilloïdes* et *Schilbe mystus* au Pool Malebo (Fleuve Congo- Kinshasa/ RD Congo) à Maluku. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 10 (1): 166-175, 2015b.
- [14] Nsimanda I.C., Musobono E.D., Basosila L.N., Wanga B.M.B. Étude préliminaire de la contamination au cadmium et au plomb de *Distichodus fasciolatus*, *Mormyrops anguilloïdes* et *Schilbe mystus* au Pool Malebo (Fleuve Congo- Kinshasa/RD Congo) à Kinsuka. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 10 (1), 176-183, 2015a.
- [15] Kashimbo K.S., Mukanya S.S., Mukoj K.A., Mwenge T.L., Kesonga N.M., Meli K., Kiyukeno K.Y. Etudes d'impacts des rejets liquides de l'usine STL (Société de Terril de Lubumbashi) sur la rivière Lubumbashi (Haut-Katanga/D.R. Congo). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 21: 285-292, 2016.
- [16] Mbuyi M., Mbuyi M. Evaluation of heavy metal pollution in the water and sediments of the Lubumbashi River, Haut-Katanga Province, Democratic Republic of the Congo. *Journal of Environmental Protection*, 8 (5): 1 - 12. doi: 10.4236/jep.2017.85045, 2017.
- [17] Mbuyi M.M., Mbuyi M. Assessment of heavy metal contamination in water and sediments of Lake Tshangalele, Haut-Katanga Province, Democratic Republic of the Congo. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 (3): 1 -12. doi: 10.1007/s13762-018-1790-5, 2018.

- [18] Nzapo K.H., Ngoboua K.N., Bongema A.L., Bongo N.G., Inkoto L.C., Falanga M.C., Ashande M.C., Ndembo N.J.L., Lokilo L.E., Djoza D.R. Evaluation de la bioaccumulation de métaux lourds chez *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822), *Chrysichthys nigrodigitatus* (Lacepède, 1803), *Mormyrops anguilloides* (Linnaeus, 1758) et *Coptodon rendalli* (Boulenger, 1897). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 38 (1), 185-191, 2018.
- [19] Muteba L.J- P., Kitoko N. F., Moma T.M.B., Mande S.M. Pollution de la rivière Kafubu. *Rapport d'enquête*, 97 p, 2011.
- [20] Mokolo M.M., Mbuyi M. Bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms from the Lualaba River, Haut-Katanga Province, Democratic Republic of the Congo. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (10): 12345 - 12356. doi: 10.1007/s11356-021-12678-9, 2021.
- [21] Tshibanda J.B., Augustin M.M, Mpiana T.P., Mulaji C.K., Otamonga J.P., Poté W.J. Influence of watershed on the accumulation of heavy metals in sediments of urban rivers under tropical conditions: Case of N'djili and Lukaya rivers in Kinshasa Democratic Republic of The Congo. *Watershed Ecology and The Environment*, 3: 30 - 37. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2021.06.001>, 2021.
- [22] Bipendu M.N., Lukanda M.V., Musibono E.A.D, Pwema K.V., Ngoboua K.T.N. Effets de rejets industriels de l'usine de traitement d'eau de Kinshasa (REGIDESO) sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux des rivières Matete et N'djili, R.D Congo. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 29 (2): 96-109, 2017.
- [23] Lusasi S.W., Baibangaka M.M, Nakweti K.J., Bipendu M.N., Unyumbe Y.K.B., Pwema K.V. Niveau de contamination par les éléments traces métalliques (Aluminium, Cuivre, Cadmium et Plomb) dans l'eau, le sédiment et deux espèces de poissons (*Marcusenius stanleyanus* Boulenger, 1897 et *Protopterus dolloi* Boulanger, 1900) du Pool Malebo à Kingabwa (Kinshasa, RD Congo). *Rev. Cong. Sci. Technol.*, 3 (4): 465 – 477. <https://doi.org/10.59228/rcst.024.v3.i4.113>, 2024.
- [24] ISO 5667 – 6. Qualité de l'eau — Échantillonnage Partie 6: Lignes directrices pour l'échantillonnage des rivières et des cours d'eau. Publiée (Edition 3, 2014), 2014. Cette publication a été révisée et confirmée pour la dernière fois en 2020.
- [25] Rodier J., Legure B., Merlet N. *L'analyse de l'eau*. Dunod, 9eme Edition, Paris, 2009.
- [26] ISO 5667 – 15. Qualité de l'eau — Échantillonnage. Partie 15, Lignes Directrices pour la conservation et le traitement des échantillons de boues et de sédiments, 2009. Cette publication a été révisée et confirmée pour la dernière fois en 2020.
- [27] ISO 11885. Qualité de l'eau — Dosage d'éléments choisis par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-OES), 2007. Cette publication a été révisée et confirmée pour la dernière fois en 2021.
- [28] Frayret J., Mermet J.-M., Paucot H. ICP-OES: couplage plasma induit par haute fréquence – spectrométrie optique. *Technique de l'ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v2-p2719>, 2019.
- [29] Laaboulli M. Évaluation de la qualité environnementale d'un bassin versant agricole à l'aide d'indices de la qualité de l'eau, du sol, des sédiments, de l'hydromorphologie et d'indices intégrateurs (Mémoire). Institut National de la Recherche Scientifique Centre en eau terre et environnement université du Québec (INRS). Md. Galal Uddin, Stephen Nash, Agnieszka I. Olbert (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*. www.elsevier.com/locate/ecolind, 2022.
- [30] Abbasi B., Kimiagar M., Sadeghniiat K., Shirazi M.M., Hedayati M., Rashidkhani B. The effect of magnesium supplementation on primary insomnia in elderly: A double-blind placebo-controlled clinical trial. *J Res Med Sci.*, 17 (12): 1161–1169. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3703169/?report=printable>, 2012.
- [31] Prasad B., Bose J.M. Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environ Geol.* 41: 183–188, 2001.
- [32] Brown R.M., Clelland Mc., Deininger R.A., Tozer R.G. A Water Quality. Index—Do We Dare ?, 117 Water Sewage Works, 339–343, 1970.
- [33] Liou S.-M., Lo S.-L., Wang S.-H. A Generalized Water Quality Index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96, 35-52. <http://dx.doi.org/10.1023/b:emas.0000031715.83752.a1>, 2004.
- [34] Tyag B.S., Prashant S., Rajendra D. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index Shweta. *American Journal of Water Resources*, 2013, Vol. 1, No. 3, 34-38 Available online at <http://pubs.sciepub.com/ajwr/1/3/3> © Science and Education Publishing DOI: 10.12691/ajwr-1-3-3, 2013.
- [35] Abdelghani T., El Hmaidi A., Hajar J., Ousmana H., Manssouri I. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE) pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux Superficielles de l'Oued Moulouya (NE, Maroc). *European Scientific Journal*, 16 (2): ESJ January EDITION, 2004.
- [36] Arora S., Sahab P., Shende D.A. Assessment of heavy metal pollution of surface water through multivariate analysis, HPI and GIS techniques. *Water Practice & Technology*, 20 (1): 148 – 167. Doi: 10.2166/wpt.2025.010, 2025.
- [37] Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33, 566-575. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02414780>, 1980.

- [38] Konan E.M., Niamien M.C.J., Okon O.M., Guetonde F.V., Beibro Y.H.K. Effets de quelques variables environnementales sur la distribution des oiseaux en milieu urbain, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 43 (2024): 1 – 15, 2021.
- [39] Ter Braak C.J.F. The analysis of vegetation – environmental relationship by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, 69: 91 – 108, 1987.
- [40] Boika M.N.A., Lusasi S.W., Nsimanda I.C., Pwema K.V., Musibono E.D. Influence of environmental variables on fish distribution in the flooded swamp forest of the Lake Tumba Micro-basin on the Mbandaka-Research Center in Ecology and Forestry of Mabali (CREF Mabali) Road Axis in Bikoro, Equateur Province (DR Congo). *Annual Research & Review in Biology*. 2022; 37 (7): 25-43. DOI: 10.9734/ARRB/2022/v37i730520, 2022.
- [41] Ter Braak C.J.F., Smilauer P. CANOCO Reference manual and user's guide Canoco for Windows (version 4). Centre for Biometry, Ageningen, Pays Bas, 351 p, 1998.
- [42] Hartley H.O. Smallest composite designs for quadratic response surface. *Biometrics*, 15: 611- 624, 1959.
- [43] Kebir T. Etude de contamination, d'accumulation et de mobilité de quelques métaux lourds dans des légumes, des fruits et des sols agricoles situés près d'une décharge industrielle de l'usine ALZINC de la ville de Ghazaouet. UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID -TLEMCEN. ALGERIE (Thèse), 2012.
- [44] Shen F., Mao L., Sun R., Du J., Tan Z., Ding M. Contamination evaluation and Source identification of heavy metals in the sediments from the Lishui River Watershed, Southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 1 - 14. Doi: 10.3390/ijerph16030336, 2019.
- [45] Scherrer B. Présentation des données. *Biostatique. Morin, G (Eds)*, 850 p, 1984.
- [46] Saville D.J. Multiple comparison procedures: the practical solution. *American Statistician*, 44 (2): 174-180, 1990.
- [47] SNC-LAVALIN International. Etude sur la restauration des mines de cuivre et de cobalt en République Démocratique du Congo, Rapport préliminaire M-6708 (603082), Montréal, 222 p, 2003.
- [48] Vande W.J.-P., Franssen J., Kalambay G., Kramkime J.D., Musibono D. Etude Proil environnemental (PEP) de la République Démocratique du Congo. Délégation de la commission Européenne. EURATA, 228 p, 2005.
- [49] OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth edition incorporating the first Addendum, 631 p, 2017.
- [50] European Drinking Water Directive. 2020.
- [51] ASEF, consulté le 16/08/2025). Les métaux lourds - la synthèse de l'ASEF. <https://www.asef-asso.fr/production/les-métaux-lourds-la-synthese-de-lasef/>.
- [52] OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth edition incorporating the first Addendum, 631 p, 2017.
- [53] ANSES. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés aux dépassements de la limite de qualité du chrome dans les eaux destinées à la consommation humaine, 2012.
- [54] Djade O.J.P., Traore A., Koffi K.J.T., Keumean K.N., Soro G., Soro N.N. Evaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences* 150: 15457 – 15468. <https://doi.org/10.35759/JABS.150.6>, 2020.
- [55] Nahli A., Hebabaze S., Iounes N., Belhouari A., Chlaida M. Etude de la contamination métallique des sédiments de surface de l'Oued Hassar après installation de la station d'épuration (StEp) de Médiouna (Casablanca, Maroc). *Bull. Institut. Sci.*, 38: 1-14. URL: <http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2017/11/Nahli%20et%20al.%201-14.pdf>, 2016.
- [56] Boudjema K., Badis A., Moulai-Mostefa N. Study of heavy metal bioaccumulation in *Mytilus galloprovincialis* (Lamark, 1819) from heavy metal mixture using the CCF design. *Environ. Technol. Innov.*, 25: 102-202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102202>, 2022.
- [57] Kouali H., Chaouti A., Achtak H., Elkalay K., Dahbi A. Trace metal contents in the mussel *Mytilus galloprovincialis* from Atlantic Coastal Areas in Northwestern Morocco: Levels of contamination and assessment of potential risks to human health. *Mar. Pollut.*, 179: 113680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113680>, 2022.
- [58] Bipendu M.N., Lusasi S.W., Tangou T.T., Pwema K.V., Mputu K.J.N., Mulaji K.C. Physico-chemical and microbiological characterization of dairy effluents and water from the N'Djili River in the city of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Orapuh Journal*, 6 (6), e1256. <https://dx.doi.org/10.4314/orapj.v6i6.56>, 2025.