



Evaluation de la contamination aux métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) des sédiments du bassin hydrographique de la rivière Lufira à Likasi, RD Congo

Boris UNYUMBE YANGA KALALA^{1,2}, Willy LUSASI SWANA³, René GIZANGA VALU^{1,2}, Thierry TANGOU TABOU¹, Camile NSIMANDA IPEY¹ & 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, R.D. Congo

²Département de Contrôle Environnement, Office Congolais de Contrôle (OCC), Kinshasa, R.D 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, R.D. Congo

Correspondance : Lusasi Swana Willy ; willy.lusasi@unikin.ac.cd ; Tél.: +243) 813 662 026 ; ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2526-7903>.

Submitted 22/04/2026, Published online on 31/07/2026 in the <https://www.m.elewa.org/journals/journal-of-applied-biosciences-about-jab/> <https://doi.org/10.35759/JABs.222.6>

RESUME

Objectif : Cette étude a pour objectif de quantifier la pollution polymétallique dans le bassin hydrographique de la Lufira dans la province du Haut-Katanga en RD Congo par les analyses chimiques des ETMs (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele dans le but de quantifier les risques chimiques et toxicologiques encourus aux organismes benthiques qui y vivent et qui sont des composantes essentielles des chaînes alimentaires dont l'homme est au sommet.

Méthodologie et Résultats : L'échantillonnage des sédiments a eu lieu dans douze rivières et le lac Tshangalele entre 2022 et 2024 suivis du dosage de dix (10) éléments traces métalliques par la technique de la spectrométrie optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES). Les résultats obtenus révèlent la présence d'une contamination métallique globalement importante dans les sédiments, dominée le plus souvent par Al, Cu, Cr, Co, Mn, Pb et Zn. Les indices de contamination démontrent une forte contamination presque dans tout le bassin. Les indices de pollution évalués présentent des risques élevés pour les écosystèmes et la santé humaine. L'utilisation de quelques indices montrent que les sédiments des quelques rivières sont dangereux pour les organismes aquatiques. Les facteurs de contamination les plus élevés sont relevés dans les sédiments des rivières Kapemba (Cr = 47,24 ; Cu = 6,4), Kapulande (Cu = 6,1 ; Pb = 7,70), CLP (Co = 6,9), Buluo (Co = 6,9), Panda 1 (Cu = 6,1 et Pb = 7,7), Panda 3 (Mn = 7,1) et Lufira 2 (Cu = 6,2 et Pb = 7,5). Les pics de PLI sont observés dans la rivière Kapemba (PLI = 1,5), la rivière Panda 2 (PLI = 1,3) et la rivière Lufira au point 1 (PLI = 0,9). La faible concentration est celle de la rivière Mura (PLI = 0,6). Les valeurs élevées de l'IPS sont relevées dans la rivière Kapemba (IPS = 2,5) et le

lac Tshangalele (IPS = 1,08). Les teneurs > PEL sont portées par divers éléments dont les risques les plus importants en termes du nombre élevé des ETMs qui apportent le risque de toxicité élevée sont : les rivières Kapemba (risque de toxicité élevée apporté par le Cr, le Cu, le Fe et le Ni), Mura (risque de toxicité élevée est lié au Cu, Fe, Mn et Pb), Kamilopa (As, le Cu, le Fe et Zn apportent le risque élevé de toxicité) et Kapulande (Cr, Cu, Fe, et Pb apportent un risque élevé de toxicité). Du point de vue qualitatif, les résultats des différents indices de pollution évalués sont concordants et montrent une contamination des sédiments par les polluants métalliques ; traduisant un environnement pollué.

Conclusion et application des résultats : Les résultats relevés dans la présente étude sont d'une grande importance dans le cadre de la gestion des écosystèmes aquatiques et leurs ressources vis-à-vis de l'exploitation minière. Les informations apportées contribuent à renforcer les axes prioritaires dans la protection de la population locale des zones minières, qui exploitent ces écosystèmes aquatiques et leurs ressources. Dans les perspectives de la mise pratique concrète de la redevance minière au pays, cette recherche éclaire les impacts de l'exploitation de certains minerais dans la pollution des milieux récepteurs des effluents mal traités.

Mots-Clés : Métaux lourds, Pollution, Sédiments, Indices toxicités, Bassin Lufira, Haut Katanga

Assessment of heavy metal contamination (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se and Zn) in sediments from the Lufira River catchment area in Likasi, DR Congo

ABSTRACT

Objective : The aim of this study is to quantify polymetallic pollution in the Lufira catchment in Haut-Katanga province, DR Congo, through chemical analyses of heavy metals (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se and Zn) in river sediments and Lake Tshangalele, with the aim of quantifying the chemical and toxicological risks to the benthic organisms living there, which are essential components of food chains of which humans form the apex.

Methodology and Results : Sediment sampling took place in twelve rivers and Lake Tshangalele between 2022 and 2024, followed by the analysis of ten (10) trace metals using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The results reveal the presence of generally significant metal contamination in the sediments, most commonly dominated by Al, Cu, Cr, Co, Mn, Pb and Zn. The contamination indices indicate high levels of contamination across almost the entire catchment. The pollution indices assessed indicate high risks to ecosystems and human health. The use of certain indices shows that the sediments in some of the rivers are hazardous to aquatic organisms. The highest levels of contamination were found in the sediments of the Kapemba (Cr = 47.24; Cu = 6.4), Kapulande (Cu = 6.1; Pb = 7.70), CLP (Co = 6.9), Buluo (Co = 6.9), Panda 1 (Cu = 6.1 and Pb = 7.7), Panda 3 (Mn = 7.1) and Lufira 2 (Cu = 6.2 and Pb = 7.5). The highest PLI values are observed in the Kapemba River (PLI = 1.5), the Panda 2 River (PLI = 1.3) and the Lufira River at point 1 (PLI = 0.9). The lowest concentration is found in the Mura River (PLI = 0.6). High IPS values are recorded in the Kapemba River (IPS = 2.5) and Lake Tshangalele (IPS = 1.08). Concentrations exceeding the PEL are associated with various elements; the most significant risks, in terms of the high number of ETMs contributing to a high risk of toxicity, are found in: the Kapemba River (high risk of toxicity due to Cr, Cu, Fe and Ni), the Mura (high toxicity risk associated with Cu, Fe, Mn and Pb), the Kamilopa (As, Cu, Fe and Zn pose a high toxicity risk) and the Kapulande (Cr, Cu, Fe and Pb pose a high toxicity risk). From a qualitative perspective, the results of the various pollution indices assessed are consistent and indicate contamination of the sediments by metallic pollutants, reflecting a polluted environment.

Conclusion and application of the results : The findings of this study are of great importance in the context of managing aquatic ecosystems and their resources in relation to mining. The information provided helps to reinforce the priority areas for protecting the local population in mining areas, who make use of these aquatic ecosystems and their resources. With a view to the practical implementation of mining royalties in the country, this research sheds light on the impacts of the extraction of certain minerals on the pollution of environments caused by poorly treated effluents.

Keywords: Heavy metals, Pollution, Sediments, Toxicity indices, Lufira Basin, Upper Katanga

INTRODUCTION

Le bassin hydrographique de la rivière Lufira, dans sa partie supérieure, est impacté de manière chronique par des déchets miniers rejetés par des industries minières implantées en amont, dans la ville de Likasi et environs, dans la province du Haut-Katanga, en République Démocratique du Congo (Unyumbe, 2021a). Et pourtant, ce bassin est déclaré depuis le 31 décembre 2017, site Ramsar à cause de ses zones humides, ses tourbières et de ses rôles sociaux économiques auprès des populations riveraines (Unyumbe *et al.*, 2025). En effet, la plupart de ces industries qui exploitent le cuivre et le cobalt rejettent directement (effluents liquides) et/ou indirectement (lixiviat, drainage acide minier, etc.) contenant d'importantes quantités de substances polluées aux métaux lourds dont certains, même à faible concentration, sont toxiques et finissent par s'accumuler dans les sédiments de surface et biotes aquatiques qui sont des constituants des chaînes alimentaires (Katemo *et al.*, 2010 ; Unyumbe *et al.*, 2019). La bioaccumulation dans les sédiments présente des risques importants pour les écosystèmes aquatiques et la santé humaine, car ils sont connus pour être des réservoirs ultimes des métaux lourds rejetés dans l'environnement (Malferrari *et al.*, 2009). Les sédiments sont des matériaux solides, transportés et déposés, qui jouent un rôle crucial dans la formation des paysages et la santé des écosystèmes aquatiques. Ils sont le lieu de vie et de reproduction de nombreux organismes, mais ils peuvent aussi être une source de contamination à long terme et cette

réalité devient une préoccupation majeure (Wang *et al.*, 2012). La contamination est exacerbée par le phénomène lié au réchauffement climatique qui modifie les propriétés chimiques des métaux lourds et l'acidification des eaux, surtout dans les zones minières lesquels favorisent la disponibilité des métaux lourds et leur accumulation dans les biotes et en particulier, dans les matrices sédimentaires (Clozel, 2008). Les sédiments contaminés peuvent modifier les caractéristiques physiques des masses d'eau, perturber les communautés aquatiques et entraîner des déséquilibres écologiques en affectant la santé et la reproduction des espèces, notamment celles qui se nourrissent dans les sédiments ou qui dépendent de ces derniers pour leur cycle de vie comme des organismes benthiques (Wang *et al.*, 2012). Cette situation peut exposer les humains qui consomment ces organismes contaminés à des risques pour la santé, tels que des troubles neurologiques, des problèmes de reproduction et même des cancers (Louise, 2008 ; Mounia, 2013). Quelques recherches antérieures réalisées dans le bassin hydrographique de la Lufira se sont limitées à prouver la présence des métaux lourds avec des phénomènes inquiétants de leur accumulation dans les sédiments et dans les poissons consommés par des populations (Katemo *et al.*, 2010 ; Unyumbe, 2019) sans procéder à une évaluation globale et intégrée de la pollution et des effets probables de la toxicité de matrices aquatiques notamment les sédiments sur les organismes vivants. Par ailleurs, plusieurs

indices sont utilisés pour évaluer le niveau d'exposition et de contamination des sédiments par les Eléments Traces Métalliques (ETMs) parmi lesquels (Coulibaly *et al.*, 2014) : le Facteur de Contamination (FC), l'indice de charge polluante (Pollution Load Index : PLI), le Facteur d'Enrichissement (FE), l'Indice de Pollution des Sédiments (IPS), l'Indice de géo-accumulation (Igeo), sont utilisés pour évaluer les risques chimiques. Pour les risques toxicologiques, le Threshold Effect Level (TEL) (concentration d'un contaminant en dessous de laquelle les effets nocifs sont rares ou très peu probables) et Probable Effect Level (PEL) (concentration au-dessus de laquelle les effets néfastes sont fréquemment attendus) et tant d'autres sont exploitées pour estimer la toxicité des sédiments vis-à-vis des organismes benthiques (Coulibaly *et al.*, 2014). Sachant

que la contamination métallique dans les systèmes aquatiques se traduit généralement par l'accumulation progressive des métaux dans les sédiments de surface (Coulibaly *et al.*, 2014), il est important que des études approfondies soient menées dans les rivières aquatiques qui constituent le bassin hydrographique de la rivière Lufira. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude qui a pour objectif de quantifier la pollution polymétallique dans le bassin hydrographique de la Lufira par les analyses chimiques des ETMs (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Fe et Zn) dans les sédiments de différentes rivières et lac Tshangalele dans le but de quantifier les risques chimiques et toxicologiques encourus aux organismes benthiques qui y vivent et qui sont des composantes essentielles des chaînes alimentaires dont l'homme est au sommet.

MATERIEL ET METHODES

Milieu d'étude : La campagne d'échantillonnage a été réalisée pendant trois ans, entre 2022 et 2024, sur treize (13) écosystèmes aquatiques constitués des rivières

Kapemba, Mura, Kamilopa, Kapulande, CLP, Kimiba, Buluo, Panda 1, Panda 2, Panda 3, Lufira 1, Lufira 2 et du lac Tshangalele (Figure 1).

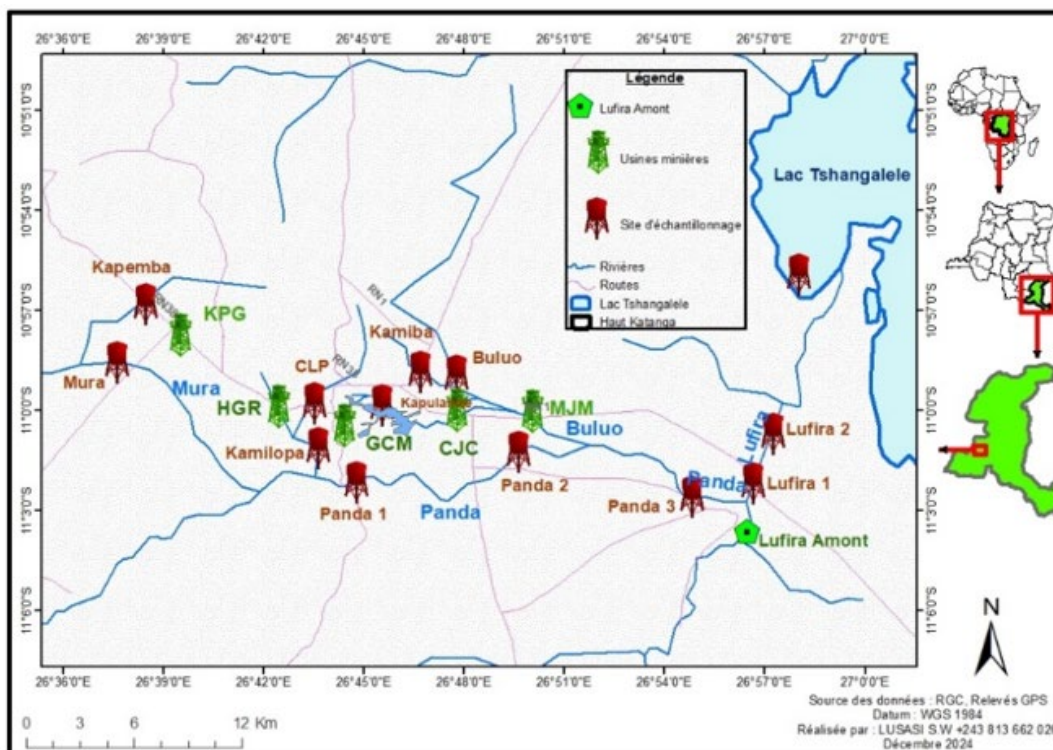


Figure 1 : Stations d'échantillonnage du Bassin hydrographique (supérieur) de la Lufira.

Méthodologie

Echantillonnage des sédiments : Tous les échantillons de sédiments de surface (0 à 5 cm de profondeur) ont été prélevés à l'aide d'une truelle en plastique polyéthylène préalablement nettoyées et rincées avec des eaux de chaque station sélectionnée sur base de l'accessibilité, des activités domestiques, de pêche qui s'y déroulent mais surtout en fonction de l'impact des industries minières installées dans leurs sous bassins respectifs. Les échantillons ont été conservés dans des sachets en polyéthylène de 500 mL, préalablement décontaminé à l'aide d'une solution de HNO_3 à 10% pendant une semaine puis rincé 5 fois à l'eau désionisée et à l'eau de chaque station. Tous les sachets des échantillons ont été placés dans les glacières contenant des blocs de glace pour maintenir la température à 4 °C environs (ISO 5667-12, 2017). Pour la détermination du bruit de fond, étant donné que la littérature ne nous donne pas suffisamment d'informations y relatives, des échantillons des sédiments de la rivière Lufira, sur la partie non impactée par des activités minières, ont été prélevés afin de déterminer les concentrations géochimiques (Cgeo) de chaque ETMs. Les résultats des analyses chimiques seront confrontés aux résultats de la composition chimique des échantillons impactés par des industries minières.

Minéralisation des sédiments : mise en solution des métaux : Avant de procéder aux analyses quantitatives des ETMs totaux au moyen d'un ICP-OES, les sédiments ont été séchés à l'étuve pendant 24 heures et à 40 °C. Une partie de sédiments secs a été utilisée pour l'analyse granulométrique et une autre broyée dans un mortier, homogénéisée, et enfin tamisée à 63 μm afin d'obtenir la fraction fine utilisée pour des analyses des éléments métalliques. Les échantillons des sédiments ont été soumis à une digestion acide à chaud qui a consisté à minéraliser la fraction fine

sédimentaire 63 μm . Cette attaque est effectuée selon le protocole proposé par la norme ISO 11885 (2007) validé par l'Office Congolais de Contrôle (OCC). Environ 200 mg de sédiment ont été introduits dans un réacteur en téflon pour être digérés à l'eau régale (1,5 ml HCl « suprapur » à 30,9% + 0,5 mL HNO_3 « suprapur » à 65,5 %) et 2 mL d' HF « suprapur » (à 65 %). La minéralisation est effectuée à la micro-onde (CEM Corporation, Mars 5 x-pres) à 180 °C pendant 25 minutes. L'acide fluorhydrique est neutralisé en ajoutant de l'acide borique 4 % et à la fin de la neutralisation, le minéralisât est versé dans un tube en téflon de 50 mL qui est complété avec de l'eau ultra pure au volume puis filtré. C'est dans cette solution que les ETMs totaux ont été dosés.

Analyses chimiques des ETMs : L'analyse quantitative des ETMs (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Fe et Zn) a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) de marque PERKIN ELMER série 8300 permettant de détecter des éléments en trace à des concentrations minimales de 10^{-3} $\mu\text{g/L}$. Le principe de l'ICP-OES consiste à mesurer l'émission de lumière par une technique de spectroscopie optique. Les échantillons sont nébulisés et l'aérosol ainsi produit est transporté dans une torche à plasma où se produit l'excitation. Les spectres d'émission caractéristiques à chaque élément sont produits par un plasma à couplage inductif par haute fréquence. Les spectres sont dispersés par un spectromètre à réseau et l'intensité des raies est évaluée par un détecteur. Les signaux des détecteurs sont traités et contrôlés par un système informatique. Lors du dosage des éléments à l'état de traces, une correction appropriée du bruit de fond est utilisée pour compenser les variations des contributions du bruit de fond (Frayret *et al.*, 2019). Les

concentrations en ETMs ont été exprimées en mg/kg.

Quantification des risques chimiques et estimation des risques toxicologiques

Evaluation des risques chimiques : Les résultats des analyses chimiques des ETMs dans les sédiments préalablement minéralisés ont servi de calculer un certain nombre d'indices de contamination pour chaque ETMs et de manière globale dans le bassin de la Lufira. Ces indices sont : Facteur de Contamination (FC), l'Indice de Charge Polluante ou Pollution Load Index (PLI), le Facteur d'Enrichissement (FE), l'Indice de Pollution Sédimentaire (IPS) ainsi que l'Indice géochimique (Igeo) (Kouakou *et al.*, 2021). L'utilisation combinée de ces indices ou facteurs permet une évaluation complète et précise de la pollution des sédiments des rivières, ce qui est crucial pour la protection des milieux aquatiques, la gestion durable des ressources en eau et la préservation de la biodiversité. Ces indicateurs de contamination jouent un rôle crucial en politique environnementale, car ils permettent d'évaluer l'état de l'environnement, de suivre les progrès vers les objectifs environnementaux et d'orienter les décisions politiques. Ils fournissent des informations essentielles pour identifier les sources de pollution, mesurer les concentrations de substances nocives et évaluer l'efficacité des mesures de contrôle de la pollution. Ces outils sont essentiels pour orienter les politiques environnementales et les actions de dépollution (MELCCFP, 2024).

Facteur de contamination : L'évaluation et l'interprétation de la contamination d'un sédiment dépend de la connaissance des teneurs de références pour chaque contaminant, bien qu'il soit parfois difficile à l'établir en raison de la grande hétérogénéité liée aux facteurs géochimiques et lithologiques des sédiments (Belamie *et al.* 1982), mais aussi, aux multiples méthodes analytiques préconisées. Pour pallier à cette difficulté, les teneurs de référence doivent être établies à

l'échelle régionale sur un site dépourvu de toute pollution anthropique (Boust *et al.*, 1981). Pour notre étude, les sédiments de la partie en amont, en dehors de la zone de contamination des déchets miniers ont été échantillonnés et dosés dans les mêmes conditions que les échantillons de la zone contaminée. Le FC exprime le niveau de contamination d'un métal spécifique dans les sédiments en le comparant à une concentration de référence naturelle (fond géochimique) (Nadem *et al.*, 2015 ; Batoul, 2018 ; Mohamed, 2022). Le FC se calcule par la formule suivante (Batoul, 2018) : $CF = \frac{Ci}{C_{ref}}$ où :

FC = Facteur de Concentration ; Ci = Concentration de l'élément (mg/kg) dans le sédiment et Cref = valeur de fond naturelle (ou géochimique en mg/kg). Le FC permet de qualifier la contamination en faible ($CF < 1$) ; modérée ($1 \leq CF < 3$), considéré ou élevé ($3 \leq CF < 6$) et très élevé ($CF \geq 6$).

Indice de charge polluante ou Pollution Load Index (PLI) : C'est Tomlinson *et al.* (1980), cité par Kouakou *et al.* (2021), qui ont introduit la notion d'indice de charge de pollution qui est la moyenne géométrique des valeurs de CF de chaque métal lourd. Il met en exergue de manière globale l'impact des activités anthropique sur la qualité des sédiments :

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

Cet indice est interprété de la manière suivante : $PLI = 1$: Niveau de pollution de référence ; $PLI \leq 1$ = Pas de détérioration ; $PLI > 1$ = Détérioration progressive des sédiments (Coulibaly *et al.* 2014 ; Nadem *et al.*, 2015 ; Kouakou *et al.*, 2021).

Facteur d'enrichissement : Le Facteur d'Enrichissement (FE) a été présenté par Tam *et al.* (1998), puis établi par la relation de Sutherland (2000). Il distingue la contamination due aux activités humaines de la concentration naturelle des éléments dans les sédiments et permet de quantifier précisément l'enrichissement en métaux lourds ou autres contaminants en rapport au matériau de

référence du fait que les métaux sont principalement associés aux particules fines (argiles, oxydes et hydroxydes de fer, matières organiques, sulfures, etc.) (Cheikh Diop *et al.*, 201 ; Brady *et al.*, 2015). Le FE facilite ainsi la classification des zones selon leur degré de pollution (Miguel et Salvarredy, 2008). Dans cette étude, l'aluminium est pris comme élément de référence étant donné que l'analyse chimique des sédiments a révélé une prédominance de l'aluminium (Windom *et al.*, 1989 ; Sutherland, 2000 ; Dahri *et al.*, 2018). Il a été calculé au niveau de chaque site et pour chaque métal, en utilisant les concentrations de l'aluminium comme élément de référence, à partir de la formule :

$$FE = \frac{C_i / C_{Al}}{C_{i,fond} / C_{Al,fond}}$$

Où C_i est la teneur (mg/kg) du métal dans le sédiment et $C_{i,fond}$ est la teneur du même métal dans le fond géochimique de la zone d'étude ; C_{Al} est la teneur (mg/kg) de l'aluminium dans le sédiment et $C_{Al,fond}$ est la teneur (mg/kg) du même métal de référence dans le fond géochimique de référence. Ainsi, on n'observe aucun enrichissement lorsque $EF \leq 1$; Enrichissement mineur si $1 < EF \leq 3$; Enrichissement modéré si $3 < EF \leq 5$; Enrichissement modérément sévère si $5 < EF \leq 10$; Enrichissement sévère si $10 < EF \leq 25$; Enrichissement très sévère si $25 < EF \leq 50$.

Indice de pollution de sédiments : Pour donner une idée globale de la pollution des sédiments dans le bassin de la Lufira, en tenant compte de la toxicité relative à chaque métal, Rubio *et al.* (2000) ont introduit l'Indice de Pollution des Sédiments (IPS), déjà initié par Müller (1969) (Batoul, 2018 ; Singh *et al.*, 2002) sera. C'est un indice qui est aussi qualifié d'indice de risque écologiques (IRE), c'est la fonction linéaire de la somme des facteurs d'enrichissement : $IPS = \frac{\sum_{i=1}^n (FE \times Pi)}{\sum_{i=1}^n Pi}$

Où IPS = Indice de Pollution de Sédiment ; P_i = Facteur de toxicité du métal. En tenant compte des valeurs seuils de toxicité de chaque métal (S_i) selon les directives de l'OMS, plus

Si est faible, plus le métal est considéré très toxique ($P_i = 1/S_i$) l'IPS classe les sédiments en cinq (5) catégories : $0 \leq IPS < 2$ = sédiment sain ; $2 \leq IPS < 5$ = sédiment faiblement pollué ; $5 \leq IPS < 10$ = sédiment moyennement pollué ; $10 \leq IPS < 20$ = Sédiment très pollué et $IPS \geq 20$ = sédiment dangereux.

Indice de géo-accumulation : Cet indice permet d'évaluer la pollution des sédiments en tenant compte du bruit de fond naturel. Il est plus précis que le FC pour détecter la contamination polymétallique. L'Igeo a été introduit par Muller (1969) selon Batoul (2018) dans le but de déterminer le degré de contamination métallique dans les sols ou même dans les sédiments de Danube. Il est calculé selon l'équation suivante :

$Igeo = \log_2 \left(\frac{C_i}{1,5 \times C_{geo}} \right)$ où : C_i = Concentration (mg/kg) mesurée dans l'échantillon ; C_{ig} = Fond géochimique (mg/kg) de l'élément i ; 1,5 = Constante qui associe les variations naturelles de la concentration d'un élément dans un milieu et les faibles pressions anthropiques (Il tient compte des variations naturelles qui est en fait un facteur de correction du fond géochimique). Cet indice identifie six (06) classes de contamination et est interprété de la manière suivante : $Igeo \leq 0$ = Non pollué ; $0 < Igeo \leq 1$ = Faiblement pollué ; $1 < Igeo \leq 2$ = Modérément pollué ; $2 < Igeo \leq 3$ = Modérément à fortement pollué ; $3 < Igeo \leq 4$ = Fortement pollué ; $4 < Igeo \leq 5$ = Très fortement pollué et $Igeo > 5$ = Extrêmement pollué.

Indice pondéré de géoaccumulation : Cet indice donne l'idée sur la géo-accumulation globale (IPgeo) des polluants dans les sédiments. Il est calculé par : $IPgeo = \sum_{i=1}^n Igeo,i \times P_i / \sum_{i=1}^n P_i$. Les mêmes classes de pollutions sont observées comme dans l'indice géochimique.

Evaluation des risques toxicologiques : En sédimentologie, le Threshold Effect Level (TEL) et le Probable Effect Level (PEL), ou respectivement le niveau de seuil d'effet et le niveau d'effet probable, proposés par Smith et

al. (1996), et obtenues sur base d'approches intégrée (chimie, bioessais et études de terrain) (Chapman, 1989 ; Ingersoll *et al.*, 1996b ; Jones *et al.*, 1997), sont des valeurs seuils utilisées pour évaluer le risque de toxicité des sédiments pour la faune aquatique due à la présence des contaminants, notamment, des ETMs dans les sédiments de rivière. Cette évaluation tient compte du fait que la concentration en contaminants d'un sédiment n'est pas toujours représentative de la biodisponibilité réelle des contaminants dans cette matrice complexe suite aux multiples matières qui les fixent (matière organique, argiles, oxydes de fer et de manganèse, sulfures...) réduisant ainsi leur biodisponibilité (MacDonald *et al.*, 1992 ; Persaud *et al.*, 1992 ; MacDonald *et al.*, 2000). Sur base des valeurs disponibles, la toxicité de l'As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et du Zn a été évalué dans le contexte de cette étude.

L'utilisation de ces seuils permet donc de délimiter trois niveaux de concentrations (Smith *et al.*, 1996) : Concentration < TEL = Aucune toxicité attendue ; TEL < Concentration < PEL = Zone d'incertitude (effets toxiques possibles mais pas certains) ; Concentration > PEL = Risque élevé de toxicité pour les organismes benthiques.

Toutefois, ces seuils sont empiriques et doivent être utilisés en combinaison avec d'autres outils (tests biologiques, indices de qualité, etc.). Ils ne remplacent pas les tests biologiques mais fournissent une première estimation du risque écotoxicologique.

Analyses en composantes principales (ACP) : L'analyse en composantes principales 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 (Ter Braak, 1987). 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 (Ter Braak et Smilauer, 1998 ; Boika *et al.*, 2022). Dans le cadre de cette étude, l'ACP a été appliquée pour déterminer les ETMs qui contribuent activement à l'enrichissement et la pollution des sédiments des rivières et lac Tshangalele prospectés en utilisant exclusivement les données de facteur d'enrichissement et l'indice de pollution des sédiments.

Analyses et traitements statistiques des données : La cartographie de la zone d'investigation a été réalisée en utilisant le logiciel ArcGIS, grâce aux coordonnées de longitude et latitude collectées sur chaque site d'investigation avec un GPS Garmin Etrex. Les données obtenues à partir des diverses manipulations ont été encodées sur le tableur Excel 2013, suivi du calcul de la moyenne et l'écart-type des paramètres chimiques. La normalité des données destinées aux analyses statistiques a été évaluée au moyen du test de Hartley (1959), dans le but de vérifier l'homogénéité des variances. Afin de déterminer la disparité entre les moyennes des paramètres physico-chimiques, nous avons employé l'Analyse de Variance à un seul facteur (ANOVA 1) (Scherrer (1984), complétée par le test de la Différence Minimale Significative (LSD) (Saville, 1990) à l'aide du logiciel Statistix. Les résultats issus de diverses manipulations et analyses sont présentés à travers des tableaux et des graphiques. L'analyse en composantes principales a été effectuée à l'aide du logiciel PAST.

RESULTATS

Variation des teneurs en métaux lourds en fonction des rivières et lac échantillonnés:

Les résultats sur la variation des teneurs moyennes en éléments traces métalliques

dosés dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele du bassin hydrographique de la Lufira prospectés dans le cadre de cette étude, leurs poids toxiques obtenus sur base de leurs

seuils de toxicité sont consignés au tableau 1. L'aluminium étant considéré comme valeur de référence dans le calcul des facteurs d'enrichissement. Le nombre de dosage pour chaque ETM dans le sédiment est de quatre (4) répétitions dans chaque rivière et lac étudié.

Les teneurs moyennes des ETMs qui portent les mêmes lettres alphabétiques ne présentent pas de différence statistique significative ($p > 0,05$) à la différence des valeurs qui portent des lettres différentes qui, sont statistiquement significative ($p < 0,05$) les unes des autres.

Tableau 1 : Variation moyenne des ETMs dosés, concentration de fond dans les sédiments des rivières et lac prospectés, valeurs de références (TEL et PEL) et poids de toxicité (Pi)

ETMs (mg/kg)	Rivières et lac prospectés													Cgéo	Poids de toxicité (W)	TEL	PEL
	Kapemba	Mura	Kamilopa	Kapulande	CLP	Kimiba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	Lac Tshangalele				
As (mg/kg)	30,38d	15,57 ^e	47,85b	28,21d	37,99c	71,07a	45,24b	25,82d	28,64d	72,31a	31,66cd	27,65d	98,07e	34,34	10	7,24	41,6
Cd (mg/kg)	2,78b	0,17c	4,15a	0,31c	0,23c	0,08c	0,26c	0,33c	3,79a	0,01c	3,84a	0,02c	0,1c	10,53	30	0,676	4,24
Co (mg/kg)	1273,75c	230,07h	856,22e	374,89g	1869,75b	1093,25d	2123,68a	384,6g	616,28f	1216,22c	969,77e	380,14g	1278,61c	306,5	5	-	-
Cr (mg/kg)	4431,25a	82,25b	60,73b	125,51b	243,45b	89,95b	81,81b	126,02b	102,46b	85,34b	49,92b	113,88b	95,89b	93,8	5	52,3	160
Cu (mg/kg)	9667,25a	1317,73i	4703,95f	9302,53ab	5872,93e	7636,98c	9094,5b	9234b	3112,6h	6521,9d	4312,93g	9357,6ab	6269,33d	1521	5	18,7	108
Mn (mg/kg)	362,66d	1146,17b	377,35d	659,45c	1589,5b	1660,6b	1376,86b	670,02c	621,88c	5522,19a	402,6c	646,23c	976,29b	774,3	1	-	-
Ni (mg/kg)	79,24b	32,83f	41,66e	38,58ef	53,73d	51,65d	125,71a	36,29ef	60,35c	51,79d	41,67e	40,99e	40,88e	48,25	5	15,9	42,8
Pb (mg/kg)	122,12c	331,88b	90,17cde	665,49a	53,04fg	57,96efg	30,74g	656,83a	77,44def	46,28fg	95,57cd	650,09a	322,05b	86,39	10	30,2	112
Fe (mg/kg)	30843,5e	30630cd	19040e	28810bc	23370a	33650cd	48740cde	28810ab	402240de	21570cde	22476f	29860f	12310f		1		
Zn (mg/kg)	59,74h	158,18f	501,47b	377,5c	189,73e	187,63ef	97,11g	381,55c	395,77c	124,47g	259,45d	374,45c	643,43a	524,1	1	124	272
Al (mg/kg)	18900de	30630c	19040d	28810cd	23370d	33650c	48740a	28810cd	402240b	21570d	22476d	29860c	12310f	10450			

Les sédiments analyses présente une variation de contamination d'un élément à l'autre et d'une rivière à l'autre. Les résultats consignés dans le tableau 1 ci-dessus renseignent que :

La contamination la plus élevée en As avec une différence statistique très hautement significative ($F = 56,1$; $p = 0,0000$; $LSD = 6,9031$) est observée dans les rivières Kimiba ($71,07 \pm 3,87a$ mg/kg) et Panda 3 ($72,31 \pm 2,32a$ mg/kg) suivie des rivières Kamilopa ($47,85 \pm 4,97b$ mg/kg) et Buluo ($45,24 \pm 4,10b$ mg/kg) puis les autres rivières. Les faibles concentrations sont relevées dans la rivière Mura ($15,57 \pm 1,23e$ mg/kg) et le lac Tshangalele ($98,07 \pm 3,30e$ mg/kg) ;

Le Cd présente une forte contamination avec une différence statistique très hautement significative ($F = 142$; $p = 0,0000$) entre les concentrations moyennes relevées sans les rivières et lacs étudiés. Avec une valeur critique de comparaison de 0,4079, le LSD test montre que les eaux des rivières Kamilopa avec $4,15 \pm 0,41a$ mg/kg, Lufira 1 ($3,84 \pm 0,17a$ mg/kg) et Panda 2 avec $3,79 \pm 0,43b$ mg/kg sont plus les chargées en cadmium suivies des eaux de la rivière Kamilopa (soit $2,78 \pm 0,41b$ mg/kg). Les eaux des autres rivières et le lac Tshangalele sont faiblement contaminées en Cd ;

L'analyse de la variance à un facteur appliqué aux teneurs de Cobalt montre une différence statistique très hautement significative ($F = 211$; $p = 0,0000$; $LSD = 115,55$) entre les valeurs relevées dans les sédiments des différentes rivières et lac Tshangalele. La forte contamination est relevée dans l'eau de la rivière Buluo ($2123,68 \pm 95,18a$ mg/kg) suivie de celle relevée dans la rivière CLP ($1869,75 \pm 151,25b$ mg/kg) puis Kamilopa ($1273,75 \pm 31,81c$ mg/kg) et le lac Tshangalele ($1278,61 \pm 24,64c$ mg/kg) et la rivière Panda 3 ($1216,22 \pm 100,97c$ mg/kg) par rapport aux sédiments des autres rivières sont faiblement contaminées en Co ;

La teneur en chrome est plus élevée avec une différence statistique très hautement

significative ($F = 11,3$; $p = 0,0000$; $LSD = 1021,2$) dans la rivière Kamilopa (soit $4431,25 \pm 13,63a$ mg/kg) suivie des autres rivières notamment : CLP ($243,45 \pm 15,13b$ mg/kg), Panda 1 ($126,02 \pm 7,82b$ mg/kg) puis Kapulande ($125,51 \pm 7,74b$ mg/kg) et la faible contamination est relevée dans l'eau de la rivière Lufira 1 ($49,92 \pm 4,57b$ mg/kg) ;

La contamination de cuivre est très élevée dans plusieurs écosystèmes aquatiques avec une différence statistique très hautement significative ($F = 431$; $p = 0,0000$) entre les concentrations moyennes. La comparaison multiple avec le test de LSD (373,03) montre que les sédiments de la rivière Kapemba ($9667,25 \pm 38,25a$ mg/kg) suivie des rivières Kapulande ($9302,53 \pm 237,47ab$ mg/kg) et Lufira 2 ($9357,6 \pm 284,24ab$ mg/kg) puis la rivière Buluo ($9094,5 \pm 61b$ mg/kg) et d'autres rivières et lac Tshangalele. La faible contamination est obtenue dans le sédiment de la rivière Mura ($1317,73 \pm 18,77i$ mg/kg) ;

La forte teneur moyenne de Manganèse avec une différence statistique très hautement significative ($F = 3,65$; $P = 0,0010$) est mise en évidence. Avec une valeur critique de comparaison de 2041,8 ; le LSD Test montre que le sédiment de la rivière Panda 3 ($5522,19 \pm 456,41a$ mg/kg) accumule des fortes concentrations suivies des rivières Kimiba ($1660,6 \pm 53,15b$ mg/kg), CLP ($1589,5 \pm 13,25b$), Buluo ($1376,86 \pm 20,96b$ mg/kg), Mura ($1146,17 \pm 39,1b$ mg/kg) et lac Tshangalele ($976,29 \pm 20,67b$ mg/kg). Les sédiments des rivières Kapemba ($362,66 \pm 2,35d$ mg/kg) et Kamilopa ($377,35 \pm 15,59d$ mg/kg) sont faiblement contaminés en Mn ;

L'analyse de la variance à un facteur appliqué aux contaminations de Ni met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 117$; $P = 0,0000$) entre les valeurs moyennes relevées dans les différentes rivières et lac Tshangalele. La valeur critique de comparaison du LSD test (6,5934) montre que la forte contamination est relevée dans la

rivière Buluo ($125,71 \pm 4,45a$ mg/kg) suivie de la rivière Kapemba ($79,24 \pm 2,11b$ mg/kg) puis Panda 2 ($60,35 \pm 2,6c$ mg/kg) et viennent ensuite les autres rivières. Les faibles contaminations sont relevées dans la rivière Mura ($32,83 \pm 2,58f$ mg/kg), Panda 1 ($36,29 \pm 3,36ef$ mg/kg) et Kapulande ($38,58 \pm 2,49ef$ mg/kg) ;

La contamination la plus élevée en Pb avec une différence statistique plus significative ($F = 420$; $p = 0,0000$) d'une rivière à l'autre. La comparaison multiple des teneurs de contamination (LSD = 35,379) montre que le taux de contamination le plus élevé est obtenu dans le sédiment des rivières Kapulande ($665,49 \pm 23,23a$ mg/kg), Panda 1 ($656,83 \pm 19,13a$ mg/kg) et Lufira 2 ($650,09 \pm 12,98a$ mg/kg) suivies de la rivière Mura ($331,88 \pm 11,73b$ mg/kg) ainsi que du lac Tshangalele ($322,05 \pm 22,55b$ mg/kg) et d'autres rivières. La faible teneur de contamination est obtenue dans le sédiment de la rivière Buluo ($30,74 \pm 2,62g$) ;

De manière générale, le fer présente des fortes teneurs de contamination dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele avec une différence statistique très significative ($F = 16,7$; $p = 0,0000$; LSD = 18373) où la contamination la plus élevée (soit $85388,25 \pm 210,63a$ mg/kg) est obtenue dans le sédiment de la rivière CLP suivie de celle de la rivière Panda 1 (soit $77408 \pm 60,25ab$ mg/kg) puis la rivière Kapulande (soit $59912 \pm 26084,63bc$ mg/kg) et les plus faibles concentrations sont relevées dans la Lufira 1 ($4184,8 \pm 9,25$ f mg/kg) et Lufira 2 ($4627,3 \pm 12,75f$ mg/kg) ;

Des fortes concentrations de Zinc avec une différence statistique très hautement

significative ($F = 281$; $p = 0,0000$; LSD = 29,578) entre les valeurs moyennes dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele prospectés. Il ressort que le sédiment du lac Tshangalele ($643,43 \pm 22,38a$ mg/kg) est le plus contaminé suivi de sédiment de la rivière Kamilopa ($501,47 \pm 40,72b$ mg/kg) puis viennent les rivières Panda 2 ($395,77 \pm 9,91c$ mg/kg), Kapulande ($377,5 \pm 6,88c$ mg/kg), Lufira 2 ($374,45 \pm 2c$ mg/kg) ainsi d'autres rivières et, la faible contamination est celle de la rivière Kapemba ($59,74 \pm 4,1h$) ;

L'aluminium présente de très forte taux de contamination avec une différence statistique très hautement significative ($F = 432$; $p = 0,0000$; LSD = 18,134) entre la teneur moyenne de contamination. Le LSD test montre que le sédiment de la rivière Buluo ($48740 \pm 2,5a$ mg/kg) est le plus contaminé suivi de celui des rivières Panda 2 ($402240 \pm 1,25b$ mg/kg), Kimiba ($33650 \pm 26,5c$ mg/kg), Mura ($30630 \pm 35,13c$ mg/kg) et Lufira 2 ($29860 \pm 4,5c$ mg/kg) ainsi que d'autres rivières. Le sédiment du lac Tshangalele présente une faible contamination en Al ($12310 \pm 4,5f$ mg/kg). Vu les résultats de la granulométrie moyenne des sédiments du bassin de la Lufira, les concentrations de l'Al ont été utilisées comme référence dans le calcul de facteurs d'enrichissement.

Evaluation des risques chimiques

Facteur de contamination et indice de charge polluante : Les résultats sur le Facteur de Contamination (FC) et d'Indice de Charge Polluante (PLI) évalués dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele dans le bassin hydrographique de la Lufira sont repris dans le tableau 2.

Tableau 2 : Facteur de Contamination (FC) et Indice de Charge Polluante (PLI)

ETMs (mg/kg)	Rivières et lac prospectés												
	Kapemba	Mura	Kamilopa	Kapulande	CLP	Kimiba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	Lac Tshangalele
As	0,9	0,5	1,4	0,8	1,1	2,1	1,3	0,8	0,8	2,1	0,9	0,8	2,9
Cd	0,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0
Co	4,2	0,8	2,8	1,2	6,1	3,6	6,9	1,3	2,0	4,0	3,2	1,2	4,2
Cr	47,2	0,9	0,6	1,3	2,6	1,0	0,9	1,3	1,1	0,9	0,5	1,2	1,0
Cu	6,4	0,9	3,1	6,1	3,9	5,0	6,0	6,1	2,0	4,3	2,8	6,2	4,1
Fe	1,4	1,4	0,9	1,3	1,0	1,5	2,2	1,3	18,0	1,0	1,0	1,3	0,6
Mn	0,5	1,5	0,5	0,9	2,1	2,1	1,8	0,9	0,8	7,1	0,5	0,8	1,3
Ni	1,6	0,7	0,9	0,8	1,1	1,1	2,6	0,8	1,3	1,1	0,9	0,8	0,8
Pb	1,4	3,8	1,0	7,7	0,6	0,7	0,4	7,6	0,9	0,5	1,1	7,5	3,7
Zn	0,1	0,3	1,0	0,7	0,4	0,4	0,2	0,7	0,8	0,2	0,5	0,7	1,2
PLI	1,5	0,6	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,3	0,7	0,9	0,8	1,0

Légende :

CF < 1 = Faible
1 ≤ CF < 3 = Modérée
3 ≤ CF < 6 = Elevée
CF ≥ 6 = Très élevée

Les informations sur le facteur de contamination consignées dans le tableau 2 ci-haut montrent que les sédiments des rivières et lac Tshangalele présentent une contamination élevée ($CF = 3 \leq CF < 6$) et forte ($CF \geq 6$) presque dans la plupart des rivières et le lac Tshangalele avec un pic élevé dans la rivière Panda 2 où la contamination est très élevée ($CF > 3$). Les facteurs de contamination les plus élevées sont relevés dans les sédiments des rivières Kapemba (Cr = 47,24 ; Cu = 6,4), Kapulande (Cu = 6,1 ; Pb = 7,70), CLP (Co = 6,9), Buluo (Co = 6,9), Panda 1 (Cu = 6,1 et Pb = 7,7), Panda 3 (Mn = 7,1) et Lufira 2 (Cu = 6,2 et Pb = 7,5). Quant à l'indice de charge

polluante (PLI), les résultats obtenus montrent une variation du PLI dans les rivières et lac prospectés du bassin hydrographique de la Lufira (Figure 2). De manière générale, il se dégage que les valeurs de PLI sont comprises entre 0,6 et 1,5 ; ce qui témoigne que les sédiments des rivières et lac Tshangalele connaissent une dégradation progressive et, présentent une détérioration. Par ailleurs, les pics de PLI sont observés dans la rivière Kapemba (PLI = 1,5), la rivière Panda 2 (PLI = 1,3) et la rivière Lufira au point 1 (PLI = 0,9). La faible concentration est celle de la rivière Mura (PLI = 0,6).

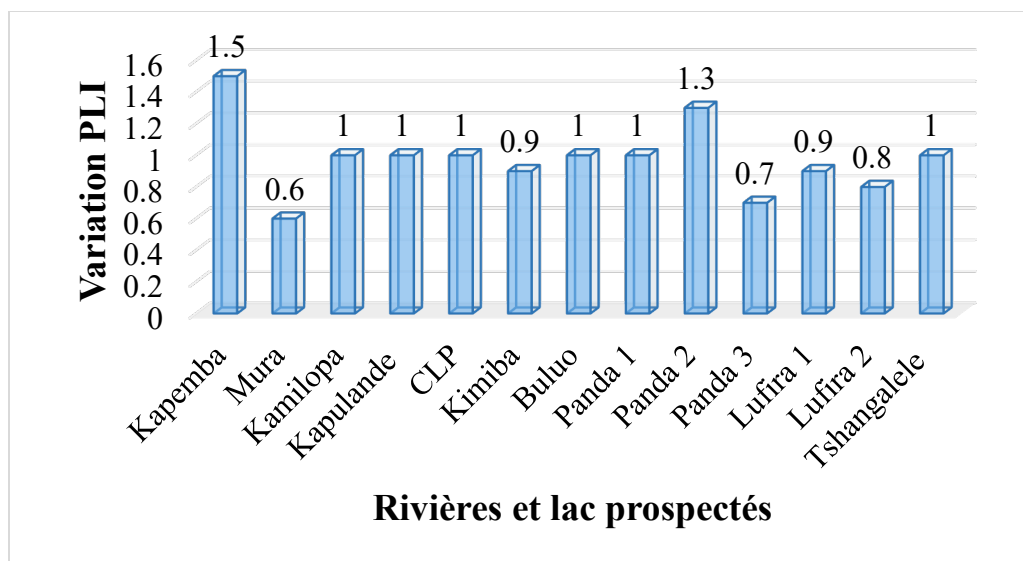


Figure 2 : Variation de PLI dans les sédiments des rivières du bassin versant de la rivière Lufira

Facteur d'Enrichissement et Indice de Pollution des Sédiments : Les résultats obtenus sur le Facteur d'Enrichissement (FE) et d'Indice de Pollution de Sédiments (IPS) dans les rivières du bassin hydrographique de la Lufira sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Facteur d'Enrichissement (FE) et Indice de Pollution de Sédiments (IPS)

ETMs(mg/kg)	Rivières et lac prospectés													Poids de toxicité (W)
	Kapemb a	Mura	Kamilop a	Kapulan de	CLP	Kimiba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	Lac Tshangal	
As	0,5	0,2	0,8	0,3	0,5	0,6	0,3	0,3	0,0	1,0	0,4	0,3	2,4	10
Cd	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	30
Co	2,3	0,3	1,5	0,4	2,7	1,1	1,5	0,5	0,1	1,9	1,5	0,4	3,5	5
Cr	26,1	0,3	0,4	0,5	1,2	0,3	0,2	0,5	0,0	0,4	0,2	0,4	0,9	5
Cu	3,5	0,3	1,7	2,2	1,7	1,6	1,3	2,2	0,1	2,1	1,3	2,2	3,5	5
Fe	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
Mn	0,3	0,5	0,3	0,3	0,9	0,7	0,4	0,3	0,0	3,5	0,2	0,3	1,1	1
Ni	0,9	0,2	0,5	0,3	0,5	0,3	0,6	0,3	0,0	0,5	0,4	0,3	0,7	5
Pb	0,8	1,3	0,6	2,8	0,3	0,2	0,1	2,8	0,0	0,3	0,5	2,6	3,2	10
Zn	0,1	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,2	0,3	1,0	1
IPS	2,5	0,3	0,6	0,7	0,5	0,4	0,3	0,7	0,0	0,6	0,4	0,6	1,4	73

Légende :

$EF \leq 1$: Aucun enrichissement
$1 < EF \leq 3$: Enrichissement mineur
$3 < EF \leq 5$: Enrichissement modéré
$5 < EF \leq 10$: Enrichissement modérément sévère
$10 < EF \leq 25$: Enrichissement sévère
$25 < EF \leq 50$: Enrichissement très sévère

Tenant compte du facteur d'enrichissement des sédiments, les résultats repris au tableau 3 ci-haut renseignent la présence de quatre catégories de facteur d'enrichissement sur les six catégories existants dans les sédiments des hydrosystèmes : le premier groupe est constituée des rivières et le lac Tshangalele dont les sédiments ne sont pas enrichis ($EF \leq 1$), le deuxième groupe est constitué des rivières ainsi que le lac Tshangalele dont les sédiments présentent un enrichissement mineur ($EF = 1 < EF \leq 3$), le troisième groupe

est constitué des écosystèmes aquatiques ayant des sédiments enrichis de manière modérée ($EF = 3 < EF \leq 5$) et le quatrième groupe, la dernière catégorie identifiée est constituée de la rivière Kapemba dont les sédiments sont très sévèrement enrichis ($EF = 25 < EF \leq 50$) par le Chrome. L'évaluation de l'Indice de Pollution des Sédiments (IPS) dans le cadre de cette étude a permis de mettre en évidence deux classes de qualité basées sur l'état de pollution des rivières et lac Tshangalele dans le bassin versant de la Lufira (figure 3).

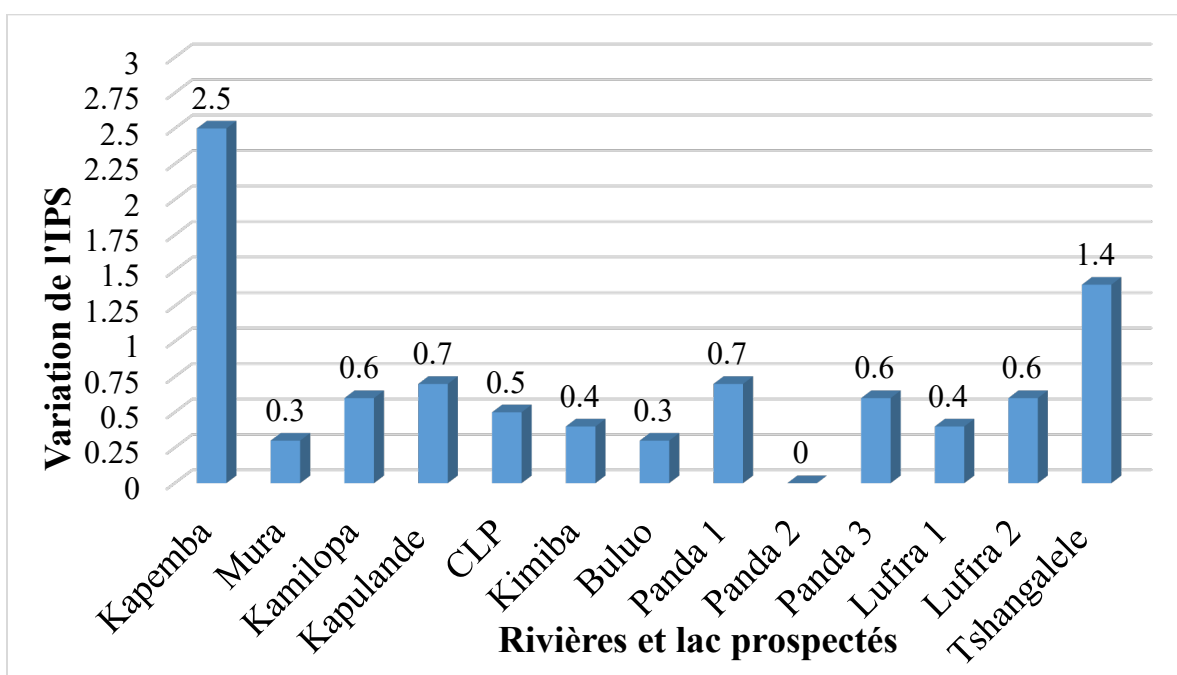
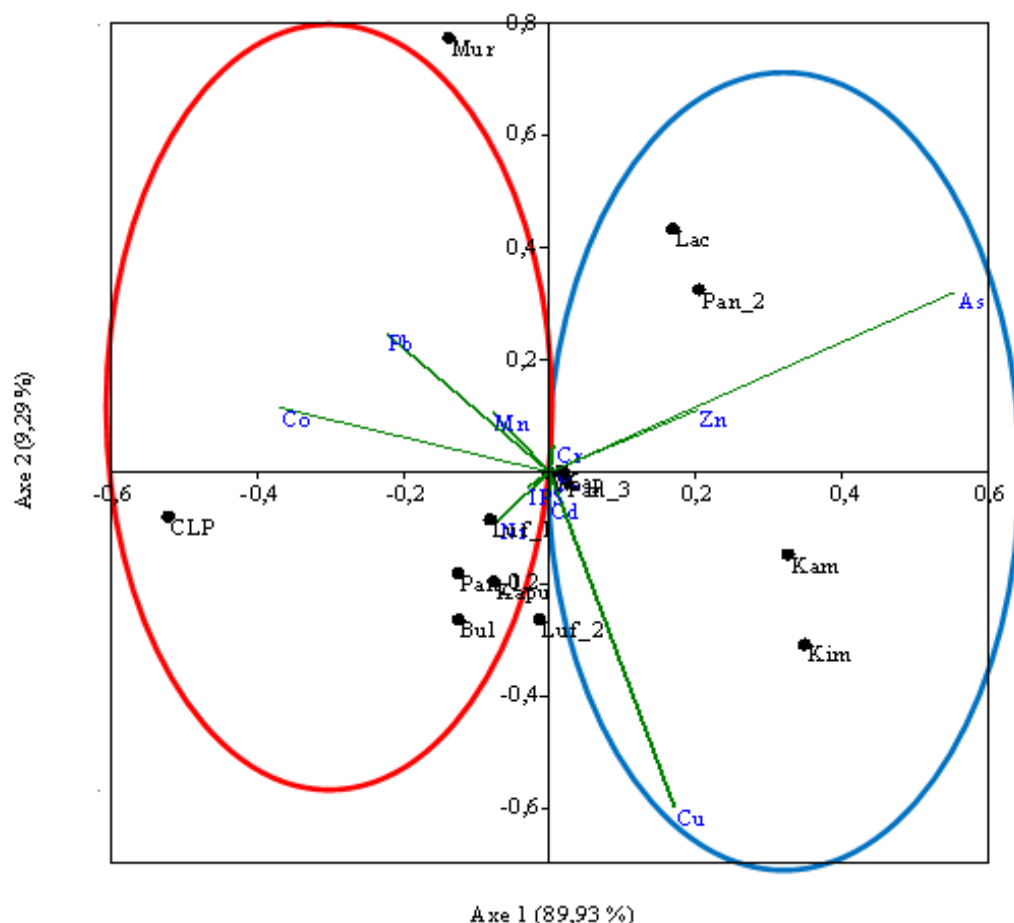


Figure 3 : Variation de l'IPS dans les sédiments des rivières du bassin versant de la rivière Lufira

Il s'observe des résultats obtenus sur la figure 3 ci-dessus que la première classe de qualité ($IPS = 0 \leq IPS < 2$; traduisant des sédiments sains) est constituée par onze rivières ainsi que le lac Tshangalele à la différence de la deuxième classe de qualité ($IPS = 2 \leq IPS < 5$; traduisant de sédiments faiblement pollués) qui est constituée par une seule rivière, la Kapemba. En tenant compte de l'analyse en composantes principales basée sur le facteur d'enrichissement et l'indice de pollution des sédiments dans les rivières et lac Tshangalele prospectés, les résultats consignés sur la figure

4 ci-dessous renseignent que l'enrichissement ainsi que la pollution de sédiments dans le lac Tshangalele, les rivières Panda 1, Panda 3, Kamilopa et Kimiba sont influencés en grande partie par les teneurs élevées de six (6) ETMs notamment : As, Zn, Cu, Cr, Cd et Fe qui, sont corrélés positivement à l'axe 1 de la matrice d'ACP (regroupant 89,93 % des valeurs propres). L'axe 2 (représentant 9,29 % des valeurs propres de la matrice), regroupe les rivières CLP, Buluo, Lufira 2, Panda 2, Kapulande, Lufira 1 ainsi que Mura dont l'enrichissement ainsi que la pollution de

sédiments sont favorisés par les concentrations de quatre (4) ETMs : Pb, Mn, Co et Ni.



Légende : Mur = Mura, Lac = Lac Tshangalele, Pan_2 = Panda 2, As = Arsenic, Zn = Zinc, Cr = Chrome, Pan_3 = Panda 3, Kam = Kamilopa, Kim = Kimiba, Cu = Cuivre, Luf_2 = Lufira 2, Bul = Buluo, Kapu = Kapulande, Pand_2 = Panda 2, Ni = Nickel, Cd = Cadmium, Co = Cobalt, Mn = Manganèse, Pb = Plomb

Figure 4 : Analyse en composantes principales basée sur le facteur d'enrichissement et l'indice de pollution des sédiments

Indice de géo-accumulation et indice pondéré de géo-accumulation : Les informations sur les résultats des indices de géo-accumulation (Igeo) et pondéré de géo-

accumulation (IPgeo) évalués dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele prospectés dans le bassin de la Lufira sont consignées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Variation des indices de géo-accumulation et pondéré de géo-accumulation évalués dans les sédiments des rivières et lac prospectés

ETMs (mg/kg)	Rivières et lac prospectés													Poids de toxicité (W)
	Kapemba	Mura	Kamilopa	Kapulande	CLP	Kimiba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	Lac Tshangalele	
As	9,4	8,5	10,1	9,3	9,8	10,7	10,0	9,2	9,4	10,7	9,5	9,3	11,1	10
Cd	4,3	0,3	4,9	1,1	0,5	-0,8	0,9	1,2	4,7	-3,8	4,8	-2,8	-0,5	30
Co	18,0	15,5	17,4	16,2	18,5	17,8	18,7	16,3	16,9	17,9	17,6	16,2	18,0	5
Cr	18,1	12,3	11,9	12,9	13,9	12,5	12,3	12,9	12,6	12,4	11,6	12,8	12,5	5
Cu	23,2	20,3	22,2	23,2	22,5	22,9	23,1	23,2	21,6	22,7	22,1	23,2	22,6	5
Fe	28,8	28,8	28,1	28,7	28,4	28,9	29,4	28,7	32,5	28,3	28,3	28,7	27,4	1
Mn	17,5	19,2	17,6	18,4	19,6	19,7	19,4	18,4	18,3	21,4	17,7	18,3	18,9	1
Ni	11,3	10,0	10,4	10,3	10,8	10,7	12,0	10,2	10,9	10,7	10,4	10,4	10,4	5
Pb	12,8	14,2	12,3	15,2	11,6	11,7	10,8	15,2	12,1	11,4	12,4	15,2	14,2	10
Zn	14,3	15,8	17,4	17,0	16,0	16,0	15,1	17,0	17,1	15,4	16,5	17,0	17,8	1
Igeo	10,5	7,682	10,18	8,991	8,502	7,978	8,614	9,0051	10,07	6,701	10,035	7,356	8,486	73

Légende :

Igeo ≤ 0 : Pollution nulle
0 < Igeo ≤ 1 : Faiblement pollué
1 < Igeo ≤ 2 : Modérément pollué
2 < Igeo ≤ 3 : pollué
3 < Igeo ≤ 4 : Fortement pollué
4 < Igeo ≤ 5 : Très fortement pollué
Igeo > 5 : Extrêmement pollué

L'évaluation du niveau de pollution dans le bassin de la Lufira fait apparaître toutes les sept (7) classes de l'Igeo de Müller. Cette classification empirique (en élément non polluant et polluant) permet à la fois une approche quantitative et qualitative du niveau de pollution dans le bassin de la Lufira. Du point de vue qualitative, les résultats obtenus montrent que les sédiments des rivières et lac

Tshangalele prospectés sont extrêmement pollués, avec un indice Igeo > 5.

Evaluation des risques toxicologiques : Les résultats sur l'évaluation des risques toxicologiques des sédiments analyses dans les rivières et lac du bassin de la Lufira dans le cadre de cette étude sont consignés au tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Résultats sur les risques toxicologiques des sédiments des rivières et lac prospectés

ETMs (mg/kg)	Rivières et lac prospectés													TEL	PEL
	Kapemba	Mura	Kamilopa	Kapulande	CLP	Kimiba	Buluo	Panda 1	Panda 2	Panda 3	Lufira 1	Lufira 2	Lac Tshangalele		
As	30,38	15,57	47,85	28,21	37,99	71,07	45,24	25,82	28,64	72,31	31,66	27,65	98,07	6	33
Cd	2,78	0,17	4,15	0,31	0,2	0,08	0,26	0,33	3,79	0,01	3,84	0,02	0,1	0,6	10
Co	1273,75	230,07	856,22	374,89	1869,75	1093,25	2123,68	384,6	616,28	1216,22	969,77	380,14	1278,61	-	-
Cr	4431,25	82,25	60,73	125,51	243,45	89,95	81,81	126,02	102,46	85,34	49,92	113,88	95,89	26	110
Cu	9667,25	1317,73	4703,95	9302,53	5872,93	7636,98	9094,5	9234	3112,6	6521,9	4312,93	9357,6	6269,33	16	110
Fe	30843	30630	19040	28810	23370	33650	48740	28810	402240	21570	22476	29860	12310	2	4
Mn	362,66	1146,17	377,35	659,45	1589,5	1660,6	1376,86	670,02	621,88	5522,19	402,6	646,23	976,29	460	1100
Ni	79,24	32,83	41,66	38,58	53,73	51,65	125,71	36,29	60,35	51,79	41,67	40,99	40,88	16	76
Pb	122,12	331,88	90,17	665,49	53,04	57,96	30,74	656,83	77,44	46,28	95,57	650,09	322,05	31	250
Zn	59,74	158,18	501,47	377,5	189,73	187,63	97,11	381,55	395,77	124,47	259,45	374,45	643,43	120	850
Al	18900	30630	19040	28810	23370	33650	48740	28810	402240	21570	22476	29860	12310		

Légende : C < TEL : Aucune toxicité attendue

TEL < C < PEL : Zone d'incertitude

C > PEL : Risque élevé de toxicité

Les concentrations chimiques des ETMs dosées au laboratoire dans les sédiments des rivières et lac prospectés dans le bassin hydrographique de la Lufira, comparés aux seuils toxicologiques selon Smith *et al.* (1996) montrent que :

Les concentrations > PEL qui peuvent être responsables des risques élevés de toxicité pour les organismes benthiques d'un écosystème aquatique à l'autre et, sont portées par divers éléments dont les risques les plus importants en termes du nombre élevé des ETMs qui apportent le risque de toxicité élevé sont : les rivières Kapemba (risque de toxicité élevé apporté par le Cr, le Cu, le Fe et le Ni), Mura (risque de toxicité élevé est lié au Cu, Fe, Mn et Pb), Kamilopa (As, le Cu, le Fe et Zn apportent le risque élevé de toxicité), Kapulande (Cr, Cu, Fe, et Pb apportent un risque élevé de toxicité), CLP (As, Cr, Cu, Fe et Mn), Kamilopa (As, Cu, Fe et Mn), Buluo (As, Cu, Fe, Mn et Ni), Panda 1 (Cr, Cu, Fe et

Pb), Panda 3 (As, Cu, Fe et Mn) et Lufira 1 (Cr, Cu, Fe et Pb) ;

Les concentrations intermédiaires entre TEL et PEL où sont classées les zones d'incertitude, c'est-à-dire, possibles effets toxiques mais pas certains, sont portées par l'As (rivières Kapemba, Mura, Kapulande, CLP, Panda 1 et 2, Lufira 1 et 2), par le Ni (rivières Mura, Kamilopa, Kapulande et Lac Tshangalele) et par le Pb dans la rivière Buluo ;

Les Concentration < TEL ne présentant aucune toxicité attendue sont quant à elles portées par le Cd dans toutes les rivières et le lac Tshangalele, Mn et Zn dans quelques rivières et lac Tshangalele. Ces résultats démontrent de manière globale que les sédiments des rivières et le lac Tshangalele dans le bassin hydrographique de la Lufira sont extrêmement dangereux du fait que ces résultats donnent 70 % de risques élevés de toxicité pour des organismes benthiques et 11% des risques probables.

DISCUSSION

Au cours de cette étude, des fortes concentrations des ETMs variant d'un écosystème aquatique à l'autre ont été mises en évidence dans les sédiments des rivières et lac Tshangalele prospecté dans le bassin de la rivière Lufira. De manière générale, les pics de contamination ont été relevés pour tous les ETMs à l'exception de Cd et As. Considérant l'importance d'accumulation dans le bassin hydrographique sous étude, l'ordre décroissant de contamination de ces ETMs se présente comme suit : Fe > Al > Co > Cr > Cu > Mn > Pb > Ni > Zn > As > Cd. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Muteba *et al.* (2011) ; Atibu *et al.* (2013) ; Kashimbo *et al.* (2016) ; Unyumbe *et al.* (2025) qui ont menées des recherches sur la contamination de l'eau, des sédiments et organismes aquatiques dans plusieurs écosystèmes aquatiques de la province du Haut Katanga en RD Congo. En premier lieu, il est important de noter que la présence des métaux lourds dans les rivières et

lac Tshangalele prospectés au cours de cette étude constitue un fait normal par le fait que la zone d'étude se trouve dans une zone minière riche de la RD Congo, exploitée depuis de décennies de manière industrielle (Chalet, 2007 ; Mukobo, 2007 ; Banza et Nemery, 2010 ; Ghislain, 2015). En effet, le fer est l'élément le plus abondant trouvé dans les sédiments de notre étude, sa présence dans les sédiments d'eau douce non pollués peut être liée à la structure des silicates dont font partie des principaux constituants des sédiments (Forstner et Wittmann, 1979). Dans les sédiments d'eau douce non contaminée, la concentration en fer est susceptible d'atteindre les valeurs allant jusqu'à 12000 mg.kg⁻¹ (Arbouille *et al.*, 1989 ; Pardos *et al.*, 2008). Par ailleurs, les activités anthropiques plus particulièrement l'exploitation minière est responsable de la contamination et/ou pollution des écosystèmes aquatiques où sont rejetés les effluents issus de ces exploitations

(Unyumbe *et al.*, 2025). Les rejets de grandes quantités d'eaux provenant de diverses activités métallurgiques de la STL, ainsi que du Four Électrique de Lubumbashi, sont responsables des concentrations élevées des métaux examinés dans le sol et l'eau. D'après Mukobo (2007), ces eaux résiduelles transportent des particules qui, sous l'action de la précipitation, se déposent sur le lit de la rivière Lubumbashi et ses rives. Dans la ville de Lubumbashi, située dans la province du Haut Katanga, l'activité de production de cuivre menée par Gécamines sur une période proche de cinquante ans a mené à l'acidification et à l'enrichissement des sols et des eaux en métaux lourds dans les zones délimitées par le cône de pollution (Kaya, 2007). Selon Muteba *et al.* (2011), « ...Les exploitants agricoles de la vallée de la Kafubu ont reproché à ces sociétés minières d'avoir rejeté des matières toxiques dans le cours d'eau. » L'inondation causée par cette rivière avait produit de nombreux effets délétères sur les habitants des rives. « Selon les plaignants, ces substances toxiques ont ravagé leurs champs, leurs bassins d'élevage de poissons et même la faune piscicole de la rivière Kafubu... ». Dans le cadre de cette étude, les sédiments des rivières Kapulande, Kamilopa, Panda, Buluo, Mura et Lufira sont les exposés et, reçoivent régulièrement les effluents bruts et traités des exploitations minières dans la zone d'étude avec comme conséquence, l'accumulation des teneurs en ETMs. Même rejetés dans le sol, ces effluents ont entraîné une contamination de l'eau, de sédiment, des poissons et des végétaux par le fait de deux phénomènes majeurs : érosion et transport des matériaux de surface Kashimbo *et al.* (2016). Ces observations marchent de paires avec celles faites dans le bassin hydrographique de la Lufira où, les rejets de la plupart des industries minières finissent par atteindre les rivières qui sont à proximité des installations minières causant ainsi des dysfonctionnements et drames écologiques (Unyumbe, 2021a;

2021b). L'évaluation des effets néfastes potentiels des métaux dans un substrat sédimentaire tient compte des critères de qualités des sédiments des écosystèmes d'eau douce fournis par le guide pour la qualité des sédiments et élaborés par Long *et al.* (2006). Cette évaluation permet donc d'estimer les risques liés à la présence des sédiments contaminés pour les organismes aquatiques et la santé humaine (Tchaa, 2021). D'après ces études, des effets toxiques probables sont possibles au-dessus des valeurs limites des concentrations (MacDonald *et al.*, 2000). Pour estimer le danger des sédiments sur le biote, on procède à l'évaluation des effets toxiques potentiels des métaux lourds sur les organismes benthiques faisant une application des recommandations pour la qualité des sédiments (MacDonald *et al.*, 2000 ; Long *et al.*, 2006).

Dans le cadre de cette étude, les concentrations de la plupart des métaux dans les sédiments dépassent les valeurs recommandées par certaines normes sur la qualité de sédiments des eaux douces. L'utilisation de quelques indices de pollution ont permis d'évaluer le niveau de contamination des sédiments par les métaux lourds ciblés dans le cadre de cette étude. Ces paramètres permettent de comprendre et d'évaluer le risque potentiel environnemental dû à la teneur du métal étudié en la comparant à sa valeur de fond (Maanan *et al.*, 2004 ; Varol, 2011 ; Laffite *et al.*, 2020). Les résultats sur le facteur de contamination ont montré que les sédiments des rivières et lac Tshangalele présentent une contamination élevée ($CF = 3 \leq CF < 6$) et forte ($CF \geq 6$) presque dans la plupart des rivières et le lac Tshangalele avec un pic élevé dans la rivière Panda 2 où la contamination est très élevée ($CF > 3$). Les facteurs de contamination les plus élevés ont été relevés dans les sédiments des rivières Kapemba ($Cr = 47,24$; $Cu = 6,4$), Kapulande ($Cu = 6,1$; $Pb = 7,70$), CLP ($Co = 6,9$), Buluo ($Co = 6,9$), Panda 1 ($Cu = 6,1$ et $Pb = 7,7$), Panda 3 ($Mn = 7,1$) et Lufira 2 ($Cu =$

6,2 et Pb = 7,5). Mavakala *et al.* (2016) ; Mwanamoki *et al.* (2014) ; Kilunga *et al.* (2017) ; Laffite *et al.* (2020) suggèrent que l'origine des métaux Cu, Zn et Pb serait anthropique, tandis que le Cr et l'As auraient comme origine les sources naturelles et anthropiques. Les concentrations > PEL qui peuvent être responsables des risques élevés de toxicité pour les organismes benthiques d'un écosystème aquatique à l'autre (Tchaa, 2021). D'après Long *et al.* (1998b, 1998a ; Tchaa, 2021), les valeurs de PEL peuvent également servir à évaluer le risque de toxicité pour les êtres vivants dans les sédiments et à organiser ou établir un classement des sites en fonction de la contamination des sédiments et du danger de toxicité pour les organismes benthiques. Dans le contexte de cette étude, les teneurs > PEL sont portées par divers éléments dont les

risques les plus importants en termes du nombre élevé des ETMs qui apportent le risque de toxicité élevé sont : les rivières Kapemba (risque de toxicité élevé apporté par le Cr, le Cu, le Fe et le Ni), Mura (risque de toxicité élevé est lié au Cu, Fe, Mn et Pb), Kamilopa (As, le Cu, le Fe et Zn apportent le risque élevé de toxicité), Kapulande (Cr, Cu, Fe, et Pb apportent un risque élevé de toxicité), CLP (As, Cr, Cu, Fe et Mn), Kamilopa (As, Cu, Fe et Mn), Buluo (As, Cu, Fe, Mn et Ni), Panda 1 (Cr, Cu, Fe et Pb), Panda 3 (As, Cu, Fe et Mn) et Lufira 1 (Cr, Cu, Fe et Pb). Il y a lieu de reconnaître que les sédiments de quelques écosystèmes aquatiques prospectés au cours de cette étude sont dangereux pour la stabilité et l'équilibre des organismes hydrobiologiques dans ces écosystèmes.

CONCLUSION ET APPLICATION DES RESULTATS

Le présent travail avait pour objectif principal de connaître l'état de contamination des sédiments par les éléments traces métalliques et leur toxicité, il constitue un premier état des lieux dans le bassin hydrographique de la Lufira. Les résultats obtenus montrent que la pollution métallique du bassin de la Lufira se traduit par une accumulation des métaux dans les sédiments de surface. Considérant l'importance d'accumulation dans le bassin hydrographique sous étude, l'ordre décroissant de contamination de ces ETMs se présente comme suit : Fe > Al > Co > Cr > Cu > Mn > Pb > Ni > Zn > As > Cd. Par ailleurs, des indices de pollution et de contamination ont été calculés à partir des teneurs métalliques obtenus. Les résultats issus de ces indices sont tous concordants, et montrent une contamination des sédiments par les polluants métalliques. Les valeurs d'indices de FC, PLI, FE, IPS, Igeo et IPgeo calculés ont montré que

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les responsables et cadres du Grand Laboratoire de l'Office Congolais de Contrôle de la ville de

les sédiments devaient être considérées comme sévèrement contaminées en Cu, Co, Cr, Mn, Ni et Pb, modérément contaminées en Al, Cu, Cr, Co, Mn, Pb et Zn. Au regard de la pollution cumulative (PLI et IPS) et des risques écologiques potentiels, les sédiments du bassin hydrographique de la Lufira se sont avérés être pollués. Les résultats relevés dans la présente étude sont d'une grande importance dans le cadre de la gestion des écosystèmes aquatiques et leurs ressources vis-à-vis de l'exploitation minière. Les informations apportées contribuent à renforcer les axes prioritaires dans la protection de la population locale des zones minières, qui exploitent ces écosystèmes aquatiques et leurs ressources. Dans les perspectives de la mise pratique concrète de la redevance minière au pays, cette recherche éclaire les impacts de l'exploitation de certains minerais dans la pollution des milieux récepteurs des effluents mal traités.

Lubumbashi dans la province du Haut Katanga en RD Congo pour leur contribution dans l'analyse des échantillons.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atibu K.E., Devarajan N., Thevenon F., Mwanamoki P.M., Tshibanda J.B., Mpiana T.P., Prabakar K., Mubedi I.J., Wildi W. & Poté J. (2013). Concentration of metals in surface water and sediment of Luilu and Musonoie Rivers, Kolwezi- Katanga, Democratic Republic of Congo. *Sciences Direct Géochimie Appliquée*, 26 – 32.
- Belamie R. & Phelippot S. (1982). Etude du niveau de contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin Parisien (France) par les métaux et les composés organochlorés CEMAGREF, division qualité des eaux, pêche et pisciculture. Rap. N° 16, 8 p.
- Boika M.N.A., Lusasi S.W., Nsimanda I.C., Pwema K.V. & Musibono E.D. (2022). 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.
- Boust D., Jouanneau J.M. & Latouche C. (1981). Méthodologie d'interprétation des teneurs totales en métaux traces contenus dans les sédiments estuariens et littoraux. *Bull. Inst. géol. Bassin d'Aquitaine*, 30 : 72 - 78.
- Chalet J.M. (2007). Etude géologique de l'arc cuprifère du Shaba. In Progrès réalisés entre 1950 et Davey J.C., Bodwell J.E, Gosse J.A., Hamilton J.W. (1997). 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*, 98: 75–86,
- Chapman P.M. (1989). Current approaches to developing sediment quality criteria. *Environmental Toxicology and chemistry*, 8:589-599.
- Clozel D., Derrien J. & Riffault J. (2008). Atelier Santé Environnement : Evaluation des risques liés à l'exposition aux poussières de manganèse. Mémoire d'Ingénieur du Génie Sanitaire, Ecole des Hautes études en Santé Publique, France, 79 p.
- Coulibaly A.S., Amani E.M., Akobé A.C., Monde S., Aka K. & Gérard B. (2014). Caractérisation des indices de pollution (Igeo, Pli, Tec et Pec) d'un environnement estuarien à forte pression anthropique : la Baie de Bietry (Côte d'Ivoire, Golf de Guinée). *International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST)*, 3(12). DOI:10.15693/ijaist/2014.v3i12.135-139.
- Frayret J., Mermet J.M., Paucot H. (2019). Principe de la technique de la spectrométrie optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES). Disponible sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-nucleaires-d-analyse-42389210/icp-oes-couplage-plasma-induit-par-haute-frequence-spectrometrie-optique-p2719/applications-p2719v2niv10008.html>.
- Ghislain Y. (2015). Traitement métallurgique. In Les expatriés de Lubumbashi. Disponible sur <http://lubum2.free.fr/umhk/gecomin/traitement.htm>.

- Ingersoll C.G., Ankley G.T., Benoit D.A., Brunson E.L., Burton G.A., Dwyer F.J., Hoke R.A., Landrum P.F., Norberg-King T.J. & Winger P.W. (1996). Toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants using freshwater invertebrates: a review of methods and applications. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14:1885-1894.
- Jones D.S., Suter I.G.W. & Hull R.N. (1997). Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on sediment-associated biota: revision. *ES/ER/TM-95/R4*. 30 p.
- Kashimbo K.S., Mukanya S.S., Mukoj K.A., Mwenge T.L., Kesonga N.M., Meli K. & Kiyukeno K.Y. (2016). 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.
- Katemo M.B., Colinet G., André L., Chocha M.A., Marquet J-P. & Micha J-C. (2010). 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.
- Kaya D. (2007). Contribution à l'étude des facteurs de distribution spatiale des teneurs en éléments traces métalliques dans les sols et les sédiments dans le quartier Gécamines. Mémoire de DEA, Université de Lubumbashi, RD Congo, 63 p.
- Kouakou S.K., Kouakou B.K., Koffi K.F., Boussou C.K. & Kouassi Lazare Kouakou K.L. (2021). Pollution des eaux à usages domestiques par les éléments traces métalliques des activités anthropiques : cas du sous bassin versant du fleuve Sassandra en amont du barrage de Buyo, Côte d'Ivoire. *Proc. IAHS*, 384, 85–92, 2021 <https://doi.org/10.5194/piahs-384-85-2021>.
- Long E.R. & Morgan I.J. (1998b). The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. In: NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA.
- Long E.R., Field L.J. & MacDonald D.D. (1998a). Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines. *Environ. Toxicol. Chem.* 17, 714-727.
- Macdonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems, *Arch. Environ. Con. Tox.* 39 : 20-31. 2000.
- MacDonald D.D., Smith S.L., Wong M.P. & Mudroch P. (1992) The development of Canadian marine environmental quality guidelines. *Marine International quality series n° 1*, 121 p.
- MELCCFP (2024). Guide de caractérisation des terrains Ministère de l'Environnement de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs.
- Mohamed L. (2022). 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. INRS (Mémoire).
- Mukobo R. (2007). Evaluation et cartographie des contaminations des sols autour du site de la Gécamines. Mémoire de DEA, Université de Lubumbashi, RD Congo, 50 p.

- Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2C: 109-118.
- Muteba L.J- P., Kitoko N. F., Moma T.M.B. & Mande S.M. (2011). Pollution de la rivière Kafubu. *Rapport d'enquête*, 97 p.
- Persaud D. & Jaagumagi R. (1993). *Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario*. Water Resources Branch. Ontario Ministry of the Environment, Toronto, ON, Canada, ISBN 0-7778-9248-7, 27 p.
- Rubio B., Nombela M.A. & Vilas F. (2000). Geochemistry of Major and Trace Elements in Sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 40, (11) : 968 - 980.
- Salvarredy A.M.M. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, France, Planète et Univers, 490 p.
- Saville D.J. (1990). Multiple comparaison procedures : the pratical solution. *American Statistician*, 44 (2) : 174-180.
- Scherrer B. (1984). Présentation des données. *Biostatique. Morin, G (Eds)*, 850 p.
- Singh K.P., Mohan D., Singh V.K. & Malik A. (2005). Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediment-a tributaryon the Ganges, India. *Journal of hydrology*, 312 : 14 – 27.
- Smith S.I., MacDonald D.D., Keenleyside K.A., Ingersoll C.G. & Field J. (1996). A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *J. Great Lake. Res.*, 22 : 624 - 638.
- Sutherland R.A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ Geol*, 39 : 330 – 341.
- Tchaa B. (2021). Evaluation de la contamination des éléments traces dans les eaux et sédiments de la lagune de Lomé et bioaccumulation chez deux espèces de poisson. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT, Université de Lomé (Togo), NNT : 2021INPT0042. tel-04170656, 196 p.
- Ter Braak C.J.F. & Smilauer P. (1998). CANOCO Reference manual and user's guide Canoco for Windows (version 4). *Centre for Biometry, Akeningen, Pays Bas*, 351 p.
- Ter Braak C.J.F. (1987). The analysis of vegetation – environmental relationship by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, 69 : 91 – 108.
- Unyumbe Y.K.B. (2021a). 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.
- Unyumbe Y.K.B. (2021b). Industries minières, ses impacts et outils d'évaluation environnementale : Risques professionnels, drainage miniers acides et devenir des métauxlourds. *Editions universitaires europeennes*, ISBN: 978-620-3-44594-7.
- Unyumbe Y.K.B., Gizanga V.R., Lusasi S.W., Tangou T.T., Nsimanda I.C. & Musibono E.A.D. (2025). 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). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 47(2) : 189 – 208.
- Unyumbe Y.K.B., Musibono E.D., Tangou T.T., Gizanga V.R. & Kusunika N.A. (2019). Use of principal component analysis (PCA) for the physico-chemical characterization of waters of the Panda River/City of Likasi (Haut-Katanga/DRC) contaminated by mining effluents. *International Journal of Latest Research in Humanities and Social Science (IJLRHSS)*, 2(7) : 25 – 33.
- Wang C., Liu S., Zhao Q., Deng L. & Dong S. (2012). Spatial variation and contamination assessment of heavy metals in sediments in the Manwan Reservoir, Lancang River. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 82 : 32–39.
- Windom H.L., Schropp S.J. Calder F.D., Ryan J.D., Smith R.G. & Burney L.C. (1989). Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States. *Environ. Sci. Technol.*, 23 : 314 – 320.