



Évaluation de la contamination par le cuivre et le cobalt et du risque écologique dans les sédiments du bassin versant de la rivière Musonoïe (Kolwezi, RD Congo)

[Assessment of Copper and Cobalt Contamination and Ecological Risk in Sediments of the Musonoïe River Watershed (Kolwezi, DR Congo)]

Jean Jacques Domondo Amogu^{1*}, Jean Paul Mbo Nzundu^{1,3}, Gracias Ikamba Mbokolo^{1,4}, Ketsia Lokonge Yakeko³, Joe Mwinza Nkunda³, Lionel Shotsha Asambo^{1,3}, M'pinga Trudon⁴, Crispin Buveka Ngoma^{4,5}, Pius Tshimankinda Mpiana² & Odette Ngandu Kabena^{1,4}

¹Mention Sciences de la Vie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190, Kinshasa XI, République Démocratique du Congo

²Département de chimie et Industries, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190, Kinshasa XI, République Démocratique du Congo

³Centre d'Excellence Chimique, Biologique, Radiologique et Nucléaire (CoE-CBRN), Ministère de l'Enseignement Supérieur, Universitaire, Recherche Scientifique et Innovations, République Démocratique du Congo

⁴Comité National de Protection contre les Rayonnements Ionisants (CNPRI), Ministère de l'Enseignement Supérieur, Universitaire, Recherche Scientifique et Innovations, République Démocratique du Congo.

⁵Département de physique et de sciences appliquées, Faculté des sciences et technologies, Université pédagogique nationale de Kinshasa, Laboratoire de physique n° 1, B.P. 8815, Kinshasa XI, République Démocratique du Congo

Résumé

Cette étude a consisté à évaluer les niveaux de contamination par le cuivre et le cobalt ainsi que les risques écologiques associés dans les sédiments du bassin versant de la rivière Musonoïe, à Kolwezi, en République Démocratique du Congo. Vingt et un échantillons ont été collectés entre le 24 décembre 2025 et le 31 janvier 2026 repartis en sept échantillons d'eau, sept échantillons de sol et sept échantillons de sédiments. Ces échantillons ont été ensuite analysés par ICP-OES afin de déterminer les concentrations en cuivre et en cobalt. La distribution spatiale des métaux a été étudiée à l'aide de la méthode d'interpolation inverse distance weighting (IDW). Le niveau de contamination a été évalué au moyen du facteur d'enrichissement (FE) et de l'indice de géoaccumulation (I_{geo}), tandis que les risques écologiques ont été estimés à l'aide de l'indice de risque écologique (Eri). Les résultats ont révélé des concentrations élevées de Cuivre et de Cobalt dans les sédiments, avec des zones d'accumulation préférentielle localisées principalement à proximité des reblais miniers et des zones de confluence situées en aval. Les valeurs du facteur d'enrichissement varient de 17 à 274 pour le Cuivre et de 54 à 1225 pour le Cobalt, traduisant une forte contribution anthropique. Les valeurs de l'indice de géoaccumulation oscillaient entre 3 et 7,5 pour le cuivre et entre 5,2 et 9,7 pour le cobalt, classant la majorité des sites comme fortement à extrêmement pollués. L'évaluation du risque écologique a mis en évidence des niveaux de risque très élevés pour les deux métaux, avec des valeurs de Eri comprises entre 149 et 1368 pour le Cu et entre 271 et 6126 pour le Cobalt. Ces résultats démontrent une accumulation importante de métaux dans les sédiments du bassin versant de la rivière Musonoïe.

Mots clés : Risque écologique, Facteur d'enrichissement, indice de géoaccumulation, Rivière Musonoïe, RD Congo.

Abstract

This study assessed the levels of copper and cobalt contamination, as well as the associated ecological risks, in the sediments of the Musonoïe River watershed in Kolwezi, Lualaba Province, in the Democratic Republic of the Congo. Water, soil, and sediment samples were collected and analyzed by ICP-OES to determine the concentrations of copper and cobalt. The spatial distribution of the metals was studied using the inverse distance weighting (IDW) interpolation method. The level of contamination was assessed using the enrichment factor (EF) and the geoaccumulation index (Geo), while ecological risks were estimated using the ecological risk index (Eri). The results revealed high concentrations of Cu and Co in the sediments, with areas of preferential accumulation located primarily near mine tailings and downstream confluence zones. Enrichment factor values range from 17 to 274 for copper and from 54 to 1,225 for cobalt, indicating severe enrichment and highlighting a significant anthropogenic contribution. The geoaccumulation index values ranged from 3 to 7.5 for copper and from 5.2 to 9.7 for cobalt, classifying the majority of sites as heavily to extremely contaminated. The ecological risk assessment revealed very high-risk levels for both metals, with Eri values ranging from 149 to 1,368 for copper and from 271 to 6,126 for cobalt. These results demonstrate a significant accumulation of metals in the sediments of the Musonoïe River watershed and highlight the significant ecological threat posed by mining activities.

Keywords: Ecological risk, Enrichment factor, Geoaccumulation index, Musonoïe River, DR Congo.

*Auteur correspondant : Jean Jacques Domondo Amogu, (jj.amogu@unikin.ac.cd). Tél. : (+243) 82 47 000 24

 <https://orcid.org/0000-0002-2658-154X>; Reçu le 28/04/2026 ; Révisé le 22/05/2026 ; Accepté le 16/06/2026

DOI : <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i3.298>

Copyright: ©2026 Amogu et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

La République Démocratique du Congo est l'un des principaux producteurs mondiaux de cuivre (Cu) et le premier producteur de cobalt (Co), deux métaux stratégiques pour la transition énergétique mondiale (Stoltnow & Schütte, 2024). Cependant, l'intensification des activités minières dans la région Katangaise s'accompagne d'importantes pressions environnementales liées à la dispersion des éléments traces métalliques dans les écosystèmes aquatiques et terrestres (Jugie, 2021). Parmi les compartiments environnementaux affectés, les sédiments jouent un rôle important comme réservoirs et sources secondaires de contamination métallique (Koudjo et al., 2021).

Plusieurs études menées dans la région de Kolwezi et le Copperbelt congolais montrent une contamination élevée des eaux, des sols, des sédiments et des cultures par le cuivre, le cobalt, le cadmium, le plomb, l'arsenic et d'autres éléments traces métalliques, à des niveaux dépassant souvent les normes internationales, ce qui constitue une source majeure de risques écotoxicologiques et sanitaires pour les populations riveraines (Lubala et al., 2020 ; Muimba et al., 2021 ; Languu et al., 2024 ; Kayembe et al., 2026). Dans la ville de Kolwezi, particulièrement dans le bassin versant de la rivière Musonoïe, les données combinant les études d'indices géochimiques (Fen Igéo) et les risques écologiques associés demeurent limitées malgré la forte pression minière exercée dans cette zone. Une meilleure compréhension de la distribution spatiale des métaux et de leurs impacts écologiques est donc nécessaire pour orienter les stratégies de gestion environnementale. La présente étude vise à évaluer la contamination des sédiments par le cuivre et le cobalt dans le bassin versant de la rivière Musonoïe.

Pour ce faire, la quantification des teneurs en cuivre et en cobalt dans les sédiments superficiels, la comparaison des concentrations obtenues aux valeurs de fond géochimique et aux seuils internationaux de qualité des sédiments, la détermination du niveau de contamination des sédiments à l'aide d'indices géochimiques adaptés, l'évaluation des risques écologiques potentiels liés à la contamination métallique des sédiments en appliquant des indices reconnus et une cartographie de la distribution spatiale de la contamination permettra d'identifier les secteurs

prioritaires qui nécessitent des mesures de gestion environnementale.

2. Matériel et méthodes

2.1. Milieu

Le quartier Musonoïe est situé dans la commune de Dilala, dans la ville de Kolwezi, aux coordonnées GPS suivants : Latitude 10°45'5''S et Longitude 25°25'29.5''E. Il couvre une superficie d'environ 2,3 km² et se caractérise par sa proximité avec plusieurs infrastructures minières actives et anciennes.

Il est limité : - à l'Est par la rivière Musonoïe, à l'Ouest par le remblai de la Général Carrières et des Mines (Gécamines), au Nord par le remblai SKM et au sud par le lac Golf et la rivière Kaitenge.

La vue aérienne du Quartier Musonoïe est présentée dans la figure 1 ci-dessous.

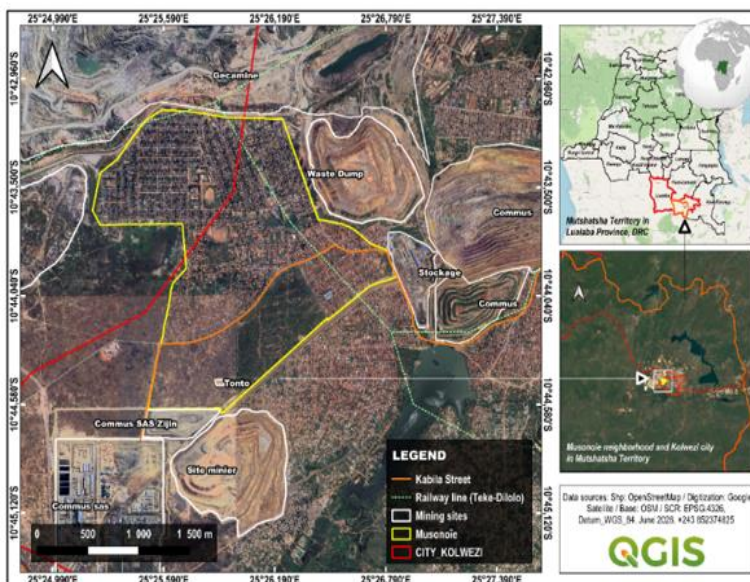


Figure 1 : Localisation de Musonoïe
(GoogleSatellite/Fond : OSM/SCR : EPSG : 4326,
Datum_ WGS_84

2.2. Echantillonnage des sédiments

Afin d'évaluer la contamination par le cuivre et le cobalt, des échantillons de sédiments de surface ont été prélevés en janvier 2026 dans sept sites d'échantillonnage.

Les échantillons d'eaux et des sédiments ont été prélevés sur les points de mêmes coordonnées géographiques, selon (N'siala et al., 2026). Tandis que les échantillons de sols ont été prélevés à partir de la zone proche de terroir jusqu'à la zone résidentielle.

Sept sites (S1, S2, S3, S4, S5, S6 et S7) au total ont été choisis suivant leur proximité des installations

minières, dont 4 en amont du bassin versant de la rivière Musonoïe, et 3 en aval, à partir du lieu de déjection d'eau de l'Entreprise COMMUS tel que l'illustre les figures 2 a et b pour la collecte des sédiments et l'eau.



Figure 2 : (a) et (b) : Bassin versant de la rivière Musonoïe en amont (a) et en aval (b).

2.3. Évaluation de la pollution des sédiments

L'évaluation de la pollution des sédiments a été réalisée à l'aide de deux indicateurs géochimiques largement reconnus :

- Le facteur d'enrichissement (EF),
- L'indice de géoaccumulation (Igeo) et
- L'indice de risque écologique (Eri).

Ces indices permettent de distinguer les niveaux de fond géochimiques naturels des apports anthropiques d'éléments traces dans les sédiments.

Le facteur d'enrichissement (EF) a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$FE = \frac{\left(\frac{C_x}{C_{réf}}\right) / \text{Echantillon}}{\left(\frac{B_x}{B_{réf}}\right) \text{ fond}}$$

C_x : Concentration de l'élément étudié dans l'échantillon

$C_{réf}$: Concentration de l'élément de référence dans l'échantillon

B_x : concentration de l'élément étudié dans le fond géochimique.

$B_{réf}$: Concentration de l'élément de référence dans le fond géochimique.

Dans cette étude, le Sc (scandium) est utilisé comme élément de référence pour la normalisation en raison de son comportement géochimique conservateur.

Les valeurs de fond pour les métaux et le Sc ont été basées sur la composition en métaux de la croûte

continentale supérieure, telle que rapportée par McLennan (N'siala et al., 2026).

Le degré de contamination des sédiments a ensuite été évalué à l'aide de l'indice de géoaccumulation (Igeo), calculé selon la formule suivante :

Où C_x est la concentration du métal « x » dans les sédiments, B_x est la concentration de fond correspondante, et la constante 1,5 sert de facteur de sécurité pour tenir compte des variations lithogéniques des valeurs de fond naturelles.

2.3. Évaluation des risques écologiques

Afin de quantifier les niveaux de contamination de chaque oligo-élément dans les échantillons de sédiments, on a utilisé le facteur de contamination (CF), défini comme suit :

$$CF = (C_x/B_x)$$

Où C_x est la concentration de l'oligo-élément « x » dans l'échantillon et B_x est sa concentration de fond (valeur UCC).

La charge globale de contamination polymétallique a été évaluée à l'aide du degré de contamination (CD), calculé comme suit :

$$CD = \sum CF_i$$

Où CF_i est le facteur de contamination pour le métal i. Pour le calcul de la valeur CD, les éléments traces suivants ont été pris en compte : Hg, Cd, As, Co, Cu, Pb, Cr et Zn.

Pour évaluer l'impact écologique de chaque métal, l'indice de risque écologique (Eri) a été appliqué. Cet indice intègre à la fois le niveau de contamination et l'importance toxicologique de chaque métal, et il a été calculé comme suit :

$$Eri = Tr_i \times CF_i$$

Où Tr_i est le facteur de réponse toxique pour chaque métal : Co, Cu.

La menace écologique cumulative posée par l'ensemble des métaux étudiés a été évaluée par le calcul de l'indice de risque écologique potentiel (RI), qui additionne les indices de risque individuels :

$RI = \sum Eri$, où Eri est l'indice de risque écologique pour le métal « i ». Ce paramètre reflète les effets combinés de la toxicité du métal, de sa concentration et de la sensibilité écologique du milieu récepteur.

De plus, le risque écotoxicologique lié à la contamination des sédiments par les métaux a été évalué en comparant les concentrations mesurées de métaux aux lignes directrices sur la qualité des sédiments (SQG) et aux niveaux d'effet probable (PEL) établis pour la protection de la vie aquatique,

conformément aux recommandations des autorités environnementales canadiennes.

2.4. Analyse statistique des données

Les analyses ont été effectuées dans l'environnement Jupyter Notebook en utilisant le langage Python et ArcGIS et QGIS).

3. Résultats et Discussion

3.1. Evaluation des risques écologiques liés au Cuivre (Cu) et au Cobalt (Co)

3.1.1. Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans l'eau

La figure 3 (a) et (b) présente les cartes de répartition des concentrations de Cu et Co dans l'eau, révélant les gradients de contamination et les éventuels foyers d'accumulation de ces éléments traces métalliques.

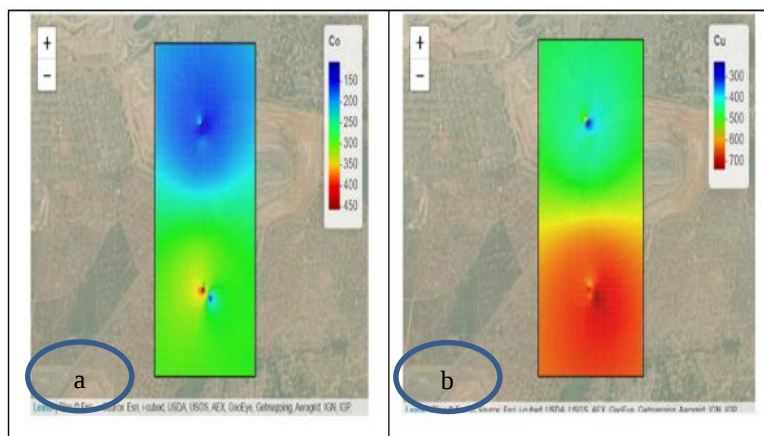


Figure 3 (a) et (b) : Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans l'eau

Les cartes IDW du Cu et du Co dans les eaux de surface montrent un gradient spatial commun orienté nord-sud. Les concentrations les plus faibles sont observées au nord ($\text{Cu} \approx 300 \text{ mg/L}$; $\text{Co} \approx 150 \text{ mg/L}$) et augmentent progressivement vers le sud, où les valeurs maximales atteignent plus de 700 mg/L pour le Cuivre et plus de 450 mg/L pour le Cobalt.

L'ensemble de ces valeurs dépasse largement le seuil réglementaire congolais fixé par le Décret minier n°038/2003 ($1,0 \text{ mg/L}$ pour le Cuivre ; $0,30 \text{ mg/L}$ pour le Cobalt), avec des facteurs de dépassement allant de 300 à 700 fois pour le Cuivre et de 500 à 1 500 fois pour le Cobalt.

La distribution spatiale du Cuivre est diffuse, couvrant une large superficie du secteur sud, tandis que celle du Cobalt est plus ponctuelle, concentrée autour d'un hotspot localisé au sud. Les deux métaux présentent au nord un point isolé affichant les valeurs

minimales de l'échantillon ($\text{Cu} \approx 300 \text{ mg/L}$; $\text{Co} \approx 150 \text{ mg/L}$), qui, bien que les plus faibles de la série, demeurent respectivement 300 et 500 fois supérieures aux seuils réglementaires applicables.

Ces résultats concordent avec ceux de Atibu et al. (2013) qui ont observé une contamination importante des cours d'eau du Katanga par le cuivre et le cobalt en aval des exploitations minières. De même, Banza et al. (2009) ont montré que les rejets miniers constituent la principale source de métaux dessous dans les eaux de surface du Copperbelt congolais. Par ailleurs, les travaux de Tarras-Wahlberdg et al. (2002) soulignent que les activités minières entraînent souvent des concentrations métalliques très supérieures aux normes environnementales, avec des effets écotoxiques majeurs sur les organismes aquatiques.

3.1.2. Significativité du Cu et du Co

La figure 4 (a) et (b) illustre la distribution spatiale de la significativité statistique des concentrations de Cu et de Co



Figure 4 (a) et (b) : Carte de significativité du Cu et du Co

Les cartes de significativité du Cuivre et du Cobalt dans les eaux de surface montrent une distribution similaire : sur 7 points échantillonnés le long de la rivière Musonoïe, les points significatifs sont exclusivement localisés en aval, à la confluence de Kabila Rue. Le Cobalt présente 2 points significatifs (Sig) au sud contre 1 seul pour le Cuivre, tandis que 3 points amont sont classés Not Sig pour les deux métaux. Le seuil réglementaire congolais (Décret n°038/2003 : 0,30 % pour le Cobalt et 0,0001 % pour le Cuivre) est dépassé uniquement en aval, confirmant un gradient de contamination croissant du nord vers le sud le long du cours d'eau, cohérent avec la localisation du Waste Dump et de la zone de l'Entreprise COMMUS en amont immédiat des points significatifs.

La présence d'anomalies spatiales significatives en aval est caractéristique des bassins affectés par les rejets miniers. Selon [Helali et al. \(2009\)](#), les métaux lourds transportés par les eaux s'accumulent préférentiellement aux points de ralentissement hydrodynamique et aux confluences. Des observations similaires ont été rapportées par [Bird et al. \(2010\)](#) dans plusieurs systèmes fluviaux miniers africains. Ces résultats confirment le rôle du drainage minier dans la dispersion du cuivre et du cobalt.

3.1.3. Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans les Sédiments

La [figure 4](#) présente la répartition spatiale des concentrations de cuivre (Cu) et de cobalt (Co) dans les sédiments de la zone d'étude, obtenue par interpolation IDW. Elle met en évidence les zones d'accumulations préférentielle de ces éléments ainsi que leur variabilité spatiale en lien avec les activités minières environnementales.

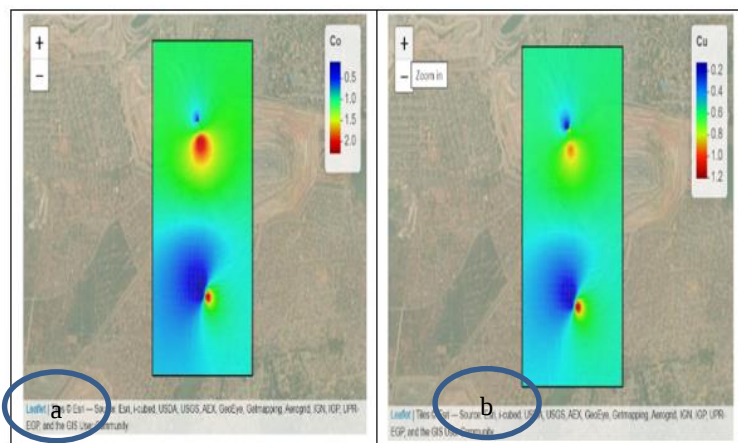


Figure 5 (a) et (b) : Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans les Sédiments

Les cartes IDW du Cuivre et du Cobalt dans les sédiments présentent une distribution spatiale similaire. Les concentrations s'échelonnent de 0,2 à 1,2 % pour le Cu (2 000 à 12 000 mg/kg) et de 0,5 à 2,0 % pour le Co (5 000 à 20 000 mg/kg). Deux hotspots sont identifiables sur chaque carte : un au centre-nord (Cu > 1,0 % ; Co > 2,0 %) et un second au sud de moindre intensité, chacun accompagné d'un point adjacent à valeur minimale traduisant une forte hétérogénéité locale. Par rapport au seuil retenu (2 % Cu ; 3 % Co), les valeurs maximales restent en dessous, mais excèdent de plusieurs centaines à milliers de fois le fond géochimique mondial des sédiments non pollués (< 20 mg/kg).

Les sédiments jouent un rôle majeur dans le stockage des contaminants métalliques. Les travaux de [Ouattara et al. \(2012\)](#) montrent que les métaux rejetés

dans les cours d'eau sont rapidement adsorbés sur les particules fines et accumulés dans les sédiments. Dans le Copperbelt, [Mukendi et al. \(2018\)](#) ont observé des concentrations similaires de cuivre et du cobalt dans les zones recevant les effluents miniers. Cette accumulation constitue une source secondaire potentielle de contamination lors de la remise en suspension des sédiments.

3.1.4. Significativité du Cu et du Co dans les sédiments

La [figure 5](#) présente les cartes de significativité statistique des concentrations de cuivre (Cu) et de cobalt (Co) dans les sédiments de la zone d'étude. Ces cartes permettent d'identifier les secteurs où les teneurs observées diffèrent significativement des valeurs de référence, mettant ainsi en évidence les zones présentant les anomalies géochimiques les plus marquées et les plus susceptibles d'être influencées par les activités minières.

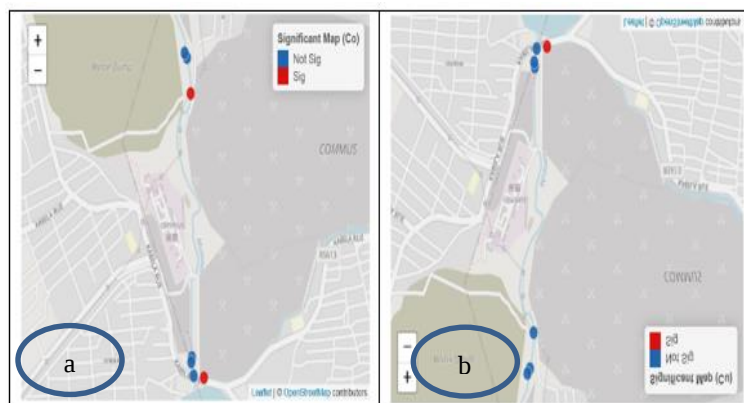


Figure 6 (a) et (b) : Les cartes de significativité du Cu et du Co dans les sédiments

Les cartes de significativité du Cu et du Co dans les sédiments de la rivière Musonoïe montrent une distribution cohérente sur les 5 points échantillonnés. Pour le Co, 1 point significatif (Sig) est localisé en position centrale, à la sortie immédiate du Waste Dump, et 1 second au sud à la confluence de Kabila Rue. Pour le Cu, un seul point significatif est identifié à l'extrême sud. Les points amont sont classés Not Sig pour les deux métaux. Par rapport au seuil retenu (2 % pour Cu ; 3 % pour Co, littérature Copperbelt katangais), les anomalies significatives sont spatialement associées aux zones de drainage direct du Waste Dump au nord et à la confluence aval au sud, suggérant deux zones de dépôt préférentiel des métaux dans les sédiments le long du tronçon étudié. Selon [Mukendi et al. \(2026\)](#), les sédiments constituent les principaux récepteurs des métaux transportés par les eaux contaminées. Des résultats similaires ont été rapportés par [Ouattara et al. \(2022\)](#), qui ont identifié les

zones de confluence et de drainage minier comme des sites privilégiés d'accumulation métallique. La présence simultanée d'anomalies en Cu et Co confirme l'origine commune des contaminants.

3.1.5. Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans les Sédiments

La figure 7 présente la répartition spatiale des concentrations de cuivre et de cobalt dans les sédiments de la zone d'étude, obtenue par interpolation spatiale.

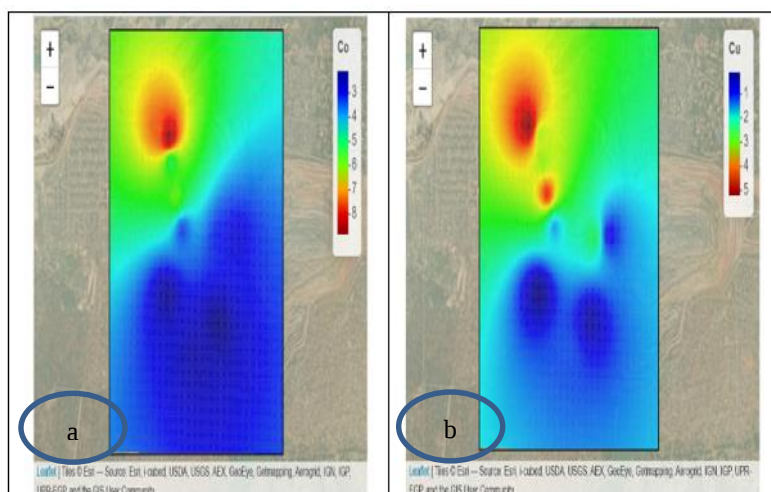


Figure 7 (a) et (b) : Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans les Sédiments

Les cartes IDW du Cuivre et du Cobalt dans les sols présentent des distributions spatiales partiellement similaires mais avec des nuances notables. Les concentrations s'échelonnent de 1 à 5 % pour le Cuivre (10 000 à 50 000 mg/kg) et de 3 à 8 % pour le Cobalt (30 000 à 80 000 mg/kg).

Les deux cartes montrent un hotspot majeur au nord-ouest, en bordure directe du Waste Dump, dépassant 5 % pour le Cuivre et 8 % pour le Cobalt. Cependant, la carte Cu révèle un second hotspot distinct au centre-nord (> 4 %) absent sur la carte Cobalt, ainsi que deux zones de valeurs minimales (bleu intense) au sud, traduisant une distribution spatiale plus hétérogène du Cuivre que du Cobalt dans les sols. Le Cobalt présente quant à lui un gradient plus régulier et progressif du nord-ouest vers le sud-est, avec une large zone à valeurs faibles (~3 %) couvrant les deux tiers sud de la zone.

Par rapport au seuil retenu (2 % pour Cuivre ; 3 % pour Cobalt), le hotspot nord-ouest dépasse significativement ces valeurs pour les deux métaux. Les zones sud, bien qu'affichant les valeurs les plus faibles de l'échantillon (~1 % Cuivre ; ~3 % Cobalt),

restent au niveau ou au-dessus du seuil de référence, et excèdent de plusieurs centaines à milliers de fois le fond géochimique mondial des sols non pollués (Cu < 30 mg/kg ; Co < 20 mg/kg).

Les concentrations élevées observées témoignent du rôle des sédiments comme principaux réservoirs des contaminants métalliques transportés par les eaux de ruissellement et les particules en suspension.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de Mbaya et al. (2026), qui ont rapporté un enrichissement important des sédiments en métaux dans des cours d'eau impactés par l'exploitation minière en RDC, ainsi qu'avec les observations récentes de Muchez et al. (2024) soulignant l'abondance naturelle et la dispersion conjointe du Cu et du Co dans les formations géologiques du Copperbelt.

3.1.6. Répartition spatiale et variation des concentrations Cu et Co dans les Sédiments

La figure 8 présente les cartes de significativité statistique des concentrations de cuivre et de cobalt dans les sols de la zone d'étude.



Figure 8 (a) et (b) : Cartes de significativité du Cu et du Co dans les sols

Les cartes de significativité du Cu et du Co dans les sols montrent une distribution identique : sur 10 points échantillonnés dans la zone Musonoïe, 2 points sont classés Sig et 8 Not Sig pour les deux métaux. Les 2 points significatifs sont colocalisés en bordure nord du Waste Dump pour les deux métaux, dépassant le seuil retenu (2 % pour Cuivre ; 3 % pour Cobalt, littérature Copperbelt Katangais).

Les points Not Sig sont dispersés dans le quartier résidentiel de Musonoïe et le long de Kabila Rue, avec des concentrations inférieures aux seuils retenus mais excédant largement le fond géochimique mondial (Cuivre < 30 mg/kg ; Cobalt < 20 mg/kg). La co-localisation des anomalies significatives Cu et Co aux mêmes points en bordure du Waste Dump confirme une

source commune liée aux résidus miniers entreposés. Bien que les neufs autres points soient classés non significatifs selon les seuils retenus pour le Copperbelt Katangais, leurs teneurs demeurent largement supérieures aux fonds géochimiques mondiaux, indiquant une contamination diffuse de l'environnement urbain.

Ces observations corroborent les travaux de [Banza et al. \(2009\)](#) et de [Useni et al. \(2019\)](#), qui ont montré que les sols situés à proximité des sites miniers du Katanga présentent fréquemment des enrichissements importants en Cu et Co, résultant de la dispersion des poussières et des résidus miniers. Ainsi, la distribution observée traduit à la fois l'influence directe du Waste Dump sur les zones adjacentes et la persistance d'une contamination métallique plus étendue dans le quartier de Musonoïe.

3.2. Evaluation de la pollution par les métaux et les paramètres de risque écologique

Les indices d'indice de géoaccumulation (Igéo) et de facteur d'enrichissement (FE) ont été calculés afin de distinguer les concentrations de métaux et de métalloïdes d'origine géogénique de celles provenant de sources anthropiques, et de classer les niveaux de pollution ainsi que le degré d'enrichissement en éléments dans les échantillons de sédiments.

3.2.1. Facteur d'enrichissement

Le [tableau I](#) présente les facteurs d'enrichissement (FE) du cuivre et du cobalt calculés pour les différents échantillons étudiés. Cet indicateur permet d'évaluer le degré d'enrichissement de ces métaux par rapport aux concentrations de référence naturelles et de distinguer les contributions d'origine anthropique des variations liées au fond géochimique local. Les valeurs obtenues fournissent ainsi une appréciation du niveau de contamination et de l'influence potentielle des activités minières sur les différents compartiments environnementaux étudiés.

Tableau I : Facteur d'enrichissement (FE) du cuivre et du cobalt (Co) dans les échantillons étudiés

FE		
Echantillons	Cu	Co
S1	73	111
S2	30	93
S3	51	54
S4	274	1225
S5	208	1113
S6	197	681
S7	17	210

Tableau II : Niveau de contamination en rapport avec les valeurs du FE

FE < 3	Enrichissement mineur
FE compris entre 3 et 5	Enrichissement modéré
FE compris entre 5 et 10	Enrichissement modérément sévère
FE compris entre 10 et 25	Enrichissement sévère
FE compris entre 25 et 50	Enrichissement très sévère
FE > 50	Enrichissement extrêmement sévère

Les valeurs du facteur d'enrichissement (FE) du Cu et du Co sont très élevées et varient entre 17 et 274 pour le cuivre et entre 54 et 1225 pour le cobalt.

Selon la classification adoptée, ces valeurs traduisent un enrichissement sévère pour la quasi-totalité des échantillons. Ces résultats indiquent une forte contribution des activités minières aux concentrations observées suggèrent une origine principalement anthropique des métaux présents dans les sols ou des résidus étudiés.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux de [Sutherland \(2000\)](#), qui indiquent qu'un facteur d'enrichissement supérieur à 10 reflète généralement une influence anthropique importante.

De même, [Pourret & Hursthouse \(2019\)](#) ont montré que les sols situés autour des exploitations minières métallifères présentent fréquemment des facteurs d'enrichissement supérieurs à 50, témoignant d'une contamination sévère liée aux activités extractives.

3.2.2. Indice géochimique

Le [tableau III](#) présente les valeurs de l'indice géo accumulatif (Igéo) du cuivre et du cobalt calculés pour les différents échantillons étudiés.

Cet indicateur permet d'évaluer le degré de contamination des milieux analysés en comparant les concentrations mesurées aux valeurs de fond géochimique, afin de mettre en évidence l'intensité et la distribution spatiale de l'accumulation des métaux dans la zone d'étude.

Tableau III : Indices géo accumulatif du Cu et Co

Igéo		
Echantillons	Cu	Co
S1	5,6	6,2
S2	4,3	5,9
S3	5,1	5,2
S4	7,5	9,7
S5	7,1	9,5
S6	7,0	8,8
S7	3,5	7,1

Tableau IV : Différentes classes selon Müller cité par Bouida et al. (2025)

$0 < \text{Igéo} < 1$	Classe 1 : non pollué à modérément pollué
$1 < \text{Igéo} < 2$	Classe 2 : modérément pollué
$2 < \text{Igéo} < 3$	Classe 3 : modérément à fortement pollué
$3 < \text{Igéo} < 4$	Classe 4 : fortement pollué
$4 < \text{Igéo} < 5$	Classe 5 : fortement à extrêmement pollué
$5 < \text{Igéo}$	Classe 6 : extrêmement pollué

Les valeurs d'Igéo du cuivre varient entre 3,5 et 7,5 tandis que celles du cobalt oscillent entre 5,2 et 9,7. La majorité des échantillons présentent des valeurs supérieures à 5, correspondant à la classe 6, caractérisée par des milieux extrêmement pollués, ce qui met en évidence une accumulation importante de métaux dans l'environnement étudié. Des observations similaires ont été rapportées par Banza et al. (2009) et Mpinda et al. (2022), dont les études dans les zones minières de la République Démocratique du Congo ont révélé des niveaux élevés du Cu et du Co associés à une forte accumulation dans les sols et les poussières environnementales. Ces similitudes suggèrent que les activités minières constituent la principale source de pollution observée.

3.2.3. Indice de risque écologique (Ecological Risk Index)

Le **tableau V** présente l'indice de risque écologique utilisé pour évaluer le niveau de risque potentiel associé à la présence du Cu et du Co dans les milieux étudiés.

Cet indice permet d'intégrer la toxicité relative des métaux et leur degré de contamination afin d'apprécier l'impact global sur les sols et les sédiments de la zone étudiée.

Il a été calculé selon la formule proposée par Lars Hakanson (N'siala et al., 2026).

Tableau V : Indice de risque écologique (Ecological Risk Index)

Echantillons	Eri	
	Cu	Co
S1	367	553
S2	149	463
S3	256	271
S4	1368	6126
S5	1038	5566
S6	983	3405
S7	86	1050

Tableau VI : Critère pour le degré de risque écologique basé sur le facteur de risque écologique

$\text{Eri} \leq 40$	Risque écologique faible
$40 < \text{Eri} < 80$	Risque modéré
$80 < \text{Eri} < 160$	Risque considérable
$160 < \text{Eri} < 320$	Risque élevé
$\text{Eri} \geq 320$	Risque très élevé

Les valeurs de l'indice de risque écologique (Eri) sont comprises entre 149 et 1368 pour le cuivre et entre 271 et 6126 pour le cobalt. Toutes les valeurs dépassent largement le seuil de 320, correspondant à un risque écologique très élevé. Ces résultats indiquent un potentiel significatif d'effets négatifs sur les organismes vivants et fonctionnement des écosystèmes locaux.

Des études réalisées dans des régions minières fortement impactées ont montré des valeurs comparables pour les métaux associés à l'exploitation du Cu et du Co. Mubemba et al. (2017) et Wang et al. (2023) soulignent que les concentrations excessives de cuivre et de cobalt peuvent perturber les communautés microbiennes du sol, réduire la biodiversité et affecter durablement les chaînes trophiques.

4. Conclusion

Le but de cette étude était d'évaluer la contamination par le cuivre et le cobalt ainsi que du risque écologique dans les sédiments du bassin versant de la rivière Musonoïe. Les résultats obtenus ont mis en évidence un enrichissement extrêmement sévère et un niveau de pollution très élevé pour la majorité des échantillons analysés. Les facteurs d'enrichissement variaient de 17 à 274 pour le cuivre et de 54 à 1 225 pour le cobalt, ce qui témoigne d'une influence anthropique. Par ailleurs, les indices de géoaccumulation s'étendaient de 3 à 7,5 pour le cuivre et de 5,2 à 9,7 pour le cobalt indiquant que ces sites sont fortement à extrêmement pollués. Les valeurs de l'indice de risque écologique (Eri) indiquent un risque écologique très élevé associés au cuivre et surtout au cobalt, suggérant des impacts potentiels importants sur les organismes aquatiques et le fonctionnement des écosystèmes locaux.

L'analyse spatiale a également permis d'identifier plusieurs zones critiques de contamination, localisées principalement à proximité du Waste Dump et des secteurs de confluence, confirmant le rôle des activités minières dans la dispersion et l'accumulation des métaux dans l'environnement. Ces résultats

démontrent que les sédiments de la rivière Musonoïe constituent à la fois un réservoir et une source potentielle de remobilisation des contaminants métalliques.

Remerciements

Nous remercions le comité de Gestion du Comité National de Protection contre les Rayonnements Ionisants (CNPRI) pour l'autorisation ainsi que la logistique.

A l'ingénieur Ibolobolo Mobali Christian pour son apport dans l'analyse statistique des données ; ainsi qu'aux Inspecteurs CNPRI/Lualaba dont Patrick Kambwandj et Grace Katombe pour leur accompagnement sur terrain. Au Docteur Aaron Pambu Lelo pour avoir accepté de lire ce manuscrit.

Financement

Les auteurs déclarent n'avoir reçu aucun financement spécifique de la part d'un organisme public, commercial ou à but non lucratif.

Conflit d'intérêts

Les Auteurs rapportent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt.

Considérations éthiques

Les auteurs déclarent avoir obtenu l'approbation du Comité National de Protection contre les Rayonnements Ionisants, ainsi que celle des autorités locales (Gouvernorat de la province, mairie de la ville de Kolwezi, l'autorité municipale de la commune de Dilala et le chef du quartier Musonoïe).

Contribution des auteurs

JJAD, OKN, CNB & PTM : conception, collecte des données sur terrain.

TM, KYL, GMI : Enquête.

LAS, JNM & JNM : rédaction.

ORCID des auteurs

Jean Jacques D.A : <https://orcid.org/0000-0002-2658-154X>

Jean Paul MN : <https://orcid.org/0009-0001-9519-2193>

Gracias I.M : <https://orcid.org/0009-0007-1083-1560>

Kestia L.Y : <https://orcid.org/0009-0008-2462-8528>

Joe M.M : <https://orcid.org/0009-0006-8358-3652>

Lionel S.A : <https://orcid.org/0009-0005-2633-5348>

Trudon M : <https://orcid.org/0009-0007-8224-7267>

Crispin N.B : <https://orcid.org/0000-0001-9205-8098>

Pius T.M : <https://orcid.org/0000-0002-8590-6017>

Odette N.K : <https://orcid.org/0009-0003-8576-7613>

Références bibliographiques

- Atibu, E. & Devarajan, N. & Mwanamoki, P. & Tshibanda, J. & Mpiana, P.T. & Prabakar, K. & Wildi, W. & Poté, J. (2013). Concentration of metals in surface water and sediment of Luilu and Musonoie Rivers, Kolwezi-Katanga, *Democratic Republic of Congo*. *Applied Geochemistry*. 39. 26-32. 10.1016/j.apgeochem.2013.09.021.
- Banza, C. & Nawrot, T. & Haufroid, V. & Decrée, S. & Putter, T. & Smolders, E. & Kabyla, B. & Luboya, N. & Ilunga, A. & Mutombo, A. & Nemery, B. (2009). High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo. *Environmental research*. 109. 745-52. 10.1016/j.envres.2009.04.012.
- Bird, G. (2016). The influence of the scale of mining activity and mine site remediation on the contamination legacy of historical metal mining activity. *Environmental science and pollution research international*. 23. 10.1007/s11356-016-7400-z.
- Ekoa B. et al. (2024). Spatial variation, ecological risk, and point sources of environmental trace metals in Lacustrine ecosystems. *Soil and sediment contamination*, 33 (1062-1086).
- Helali, MA. & Added, A. & Zaaboub, N. & Oueslati, W. (2009). Géochimie des métaux lourds dans les sédiments marins de surface du delta de l'Oued Mejerda. *Revue Méditerranéenne de l'Environnement*. 484-495.
- Jugie, Y. (2021). *Les enjeux sécuritaires et environnementaux de l'exploitation minière en République Démocratique du Congo*. [Mémoire de Master 2. Faculté de Droit et Science Politique Université de Bordeaux].
- Kianza FM., Kembisa NL., Mulonso H., Mpingaja MC., & Pasa MJ. (2026). Évaluation des risques écologiques liés aux éléments potentiellement toxiques (métaux lourds) dans les eaux et les sédiments du fleuve Congo : variations

- saisonniers et dominance du cadmium. *Rev. Cong. Sci. Technol.*, Vol. 05, No. 02, pp. 834-847.
- Koudjo AK., Ouro-Sama, Hodabalo DS., Gnon T., Sadikou A. et al. (2021) Etat de la contamination en éléments traces des sédiments du Lac du barrage hydroélectrique de Nangbéto (Togo). 2021. <hal-03182947v1>.
- Langunu S., Mwanasomwe JK., Colinet G., Shutcha MN (2024). Are Ecological risk indices for trace metals relevant for characterizing polluted substrates in the Katangese Copperbelt (DR Congo) and for assessment for the performance of remediation trials? *Environnements*, 11(6),122. <https://doi.org/10.3390/environments11060122>.
- Mbaya, M. (2026). Étude de la pollution par les éléments traces métalliques des sédiments de la rivière YOLO à Kinshasa en République Démocratique du Congo. *Revue Congolaise des Sciences & Technologies*. 5. 856-865. 10.59228/rcst.026.v5.12.291.
- Mpinda T., M. Mujinya, B.B. & Mees, Florias & Kasangij, Patrick & Van Ranst, Eric. (2022). Patterns and forms of copper and cobalt in Macrotermes falciger mounds of the Lubumbashi area, DR Congo. *Journal of Geochemical Exploration*. 238. 107002. 10.1016/j.gexplo.2022.107002.
- Mubemba, M., & Mununga, F. & Kaumbu K., JM & Mwilambwe, K. & Maloba, K. & Banza, I. & Mukunto, K. (2017). Influence des sols contaminés en cuivre sur le développement de deux variétés (locale et améliorée) de légumes dans la région de Lubumbashi (RD. Congo). *Journal of Applied Biosciences*. 115. 11410. 10.4314/jab.v115i1.1.
- Mukendi, RM, & Banza, C., & Mukeng, C., & Ngwe, J., & Kalenga, P. (2018). Exposition de l'homme aux éléments tracés métalliques et altération du sperme : étude menée dans les zones minières du Haut-Katanga en République Démocratique du Congo. *Pan African Medical Journal*. 30. 10.11604/pamj.2018.30.35.13694.
- Ngweme NB., Nieme AB., et al. (2024). Heavy metals content and ecotoxicity of sediments from the Congo River. *American journal of environmental sciences*.
- Nsiala, Gurvitch O., Crispin K. Mulaji, Fernando P. Carvalho, Emmanuel M. Biey, John Poté and Emmanuel K. Atibu (2026). Trace metals and rare earth elements in sediments along the Muanda River estuary and coastal ocean continuum in an oil exploitation area. *Discover Sustainability* 7:140 <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02481-2>.
- Ouattara, AA & Naminata, S. & N'goran, P. & Yao, Koffi M., & Trokourey, A. & Diaco, T. (2022). Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire : Assessment of trace metals contamination in sediments of N'zi River, Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 15. 2199-2208. 10.4314/ijbcs.v15i5.38.
- Ouattara, AA & Naminata, S. & N'goran, PA. & Yao, Koffi M. & Trokourey, A. & Diaco, T. (2022). Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire : Assessment of trace metals contamination in sediments of N'zi River, Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 15. 2199-2208. 10.4314/ijbcs.v15i5.38.
- Stoltnow, M. & Schütte, P. (2024). République démocratique du Congo - Étude de cas d'un pays. WP9 - Task 9.4. *Africa Maval*.
- Tarras-WN. & Flachier, A. & Fredriksson, G. & Lane, Stuart & Lundberg, Bo & Sangfors, O. (2009). Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 29. 484-491. 10.1579/0044-7447-29.8.484.
- Thamagaba KH., et al. (2026). Monitoring the impacts of mining activities on land cover using remote sensing technologies and machine learning in the Musonoie copper-cobalt deposit in the Democratic Republic of Congo. *International Journal of Remote Sensing*.
- Tshilanda JB., Atibu EK., Mulamba AM., et al. (2024). Persistent organic pollutants in sediment of the N'djili river (DR Congo). *Discover Applied Sciences*.
- Useni SY., & Boisson, S. & Kaleba, S., & Khonde, C., & Malaisse, F., & Halleux, JM., & Bogaert, J., & Kankumbi, F. (2019). Dynamique de l'occupation du sol autour des sites miniers le long du gradient urbain-rural de la ville de Lubumbashi, RD Congo. *BASE*. 14-27. 10.25518/1780-4507.18306.

Wang, L. & DU, Yuhang & ZHAO, Z. & ZHANG, W.
& MA, Baozhong & W., Cheng-yan. (2023).
Application of geometallurgical modeling in
SICOMINES refractory copper-cobalt deposit in
Congo (Kinshasa). *工程科学学报*. 45.
10.13374/j.issn 2095-9389.2023.01.02.001.