

1 ORIGINAL ARTICLE

CARACTÉRISATION GÉO-ENVIRONNEMENTALE, DISTRIBUTION ET COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES DANS LES EAUX, SÉDIMENTS ET SOLS DES ENVIRONS DU GISEMENT DE Cu-Pb-Zn DE BAMBA-KILENDA (KONGO-CENTRAL, R.D. CONGO)



GEO-ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION, DISTRIBUTION AND BEHAVIOR OF TRACE METAL ELEMENTS IN WATER, SEDIMENTS AND SOILS AROUND THE BAMBA-KILENDA Cu-Pb-Zn DEPOSIT (KONGO-CENTRAL, D.R. CONGO)

| Clement N'zau Umba-di-Mbudi ^{1, 2 *} | Junior Savoureux Lutete Savu ¹ | C. Kapinga Ntumba ¹ | M.Yindi Likiti ¹, | et | C. Penge Ongendangenda ¹ |

¹ Groupe Géo-Hydro-Energie, Faculté des Sciences et Technologies | Mention Géosciences | B.P. 190 Kinshasa XI, Université de Kinshasa, Kinshasa | R.D. Congo |

² Faculté Polytechnique | Université d'Etat Président Joseph Kasa-Vubu | B.P. 314, Boma, | R.D. Congo |

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17279063> | Received September 19, 2025 | Accepted September 22, 2025 | Published September 29, 2025 | ID Article | Clement-Ref3-3-21ajira160925 |

RÉSUMÉ

Contexte : La contamination par les éléments traces métalliques (ETM) dans les environnements aquatiques et terrestres représente un problème environnemental majeur qui menace non seulement les écosystèmes, mais aussi la santé humaine. **Objectif :** Évaluer le risque de contamination des eaux, sédiments et sols par des éléments traces métalliques susceptibles d'être présents sous forme d'anomalies géochimiques positives induites par le gisement Cu-Pb-Zn de Bamba-Kilenda au Kongo-Central en République Démocratique du Congo. **Méthodes :** Une évaluation géo-environnementale a été conduite à travers le prélèvement d'échantillons d'eau (n=4), de sédiments (n=6) et de sols (n=19) dans les cours d'eau et sols environnant le gisement. Les éléments traces métalliques ont été dosés par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie. L'indice de géoaccumulation de Müller a été calculé pour évaluer le niveau de contamination. **Résultats :** Les sols et sédiments présentent des contaminations significatives en Cu, Pb, Zn, Ba, Sb, Zr, Fe, Pd, Rb, Cd, As, Sr et Sn. Les concentrations moyennes de cuivre (71,21 mg/kg), plomb (29,5 mg/kg), arsenic (48,8 mg/kg) et cadmium (16,32 mg/kg) excèdent les normes de l'OMS. Ces teneurs sont largement supérieures à la moyenne mondiale des sols et diminuent progressivement avec l'éloignement du gisement. Le pH acide (sols) à hyper-acide (sédiments) favorise la mobilité des ETM. L'indice de géoaccumulation identifie une station (KBG002) comme fortement polluée par le cuivre, et cinq stations comme modérément polluées. Les analyses de corrélation révèlent que 90% des ETM présentent des associations positives suggérant une origine commune. **Conclusion :** La qualité environnementale des eaux, sédiments et sols de Bamba-Kilenda est compromise par les fortes concentrations en ETM, principalement d'origine géogénique liée au gisement polymétallique. La consommation d'eaux non traitées et la culture sur sols contaminés présentent des risques sanitaires. Des études complémentaires sur la spéciation des métaux, la bioaccumulation végétale et les technologies de remédiation sont recommandées.

Mots-clés : *Éléments traces métalliques, contamination, risque sanitaire, Bamba-Kilenda, remédiation, géochimie environnementale*

ABSTRACT

Background: Contamination by trace metal elements (TME) in aquatic and terrestrial environments represents a major environmental problem threatening both ecosystems and human health. **Objective:** To assess the contamination risk of water, sediments and soils by trace metal elements likely to be present as positive geochemical anomalies induced by the Cu-Pb-Zn deposit of Bamba-Kilenda in Kongo-Central, Democratic Republic of Congo. **Methods:** A geo-environmental assessment was conducted through sampling of water (n=4), sediments (n=6) and soils (n=19) from watercourses and soils surrounding the deposit. Trace metal elements were determined by energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry. Müller's geoaccumulation index was calculated to assess contamination levels. **Results:** Soils and sediments showed significant contamination with Cu, Pb, Zn, Ba, Sb, Zr, Fe, Pd, Rb, Cd, As, Sr and Sn. Mean concentrations of copper (71.21 mg/kg), lead (29.5 mg/kg), arsenic (48.8 mg/kg) and cadmium (16.32 mg/kg) exceed WHO standards. These contents are largely superior to global soil averages and decrease progressively with distance from the deposit. Acidic pH (soils) to hyper-acidic (sediments) promote TME mobility. The geoaccumulation index identifies one station (KBG002) as highly polluted by copper, and five stations as moderately polluted. Correlation analyses reveal that 90% of TMEs show positive associations suggesting a common origin. **Conclusion:** Environmental quality of water, sediments and soils at Bamba-Kilenda is compromised by high TME concentrations, primarily of geogenic origin related to the polymetallic deposit. Consumption of untreated water and cultivation in contaminated soils present health risks. Complementary studies on metal speciation, plant bioaccumulation and remediation technologies are recommended.

Keywords: *Trace metal elements, contamination, health risk, Bamba-Kilenda, remediation, environmental geochemistry*

1. INTRODUCTION

Les métaux et métalloïdes sont omniprésents dans les sols, les sédiments, les eaux de surface et les plantes comestibles. Leur présence naturelle provient principalement de l'altération physique et chimique des roches mères sous-jacentes, dont 80% des apports sont d'origine géogénique [1,2], ou de la dispersion géochimique à partir de gisements environnants. Artificiellement, leur accumulation résulte d'apports anthropiques liés aux pratiques agricoles (fertilisants, pesticides), aux activités industrielles, à l'exploitation minière et aux activités urbaines, modifiant substantiellement les concentrations dans l'atmosphère, l'eau, les sédiments et les sols, avec des perturbations significatives de la pédofaune [3-6]. Ces éléments, considérés comme toxiques pour l'homme et l'environnement [7], sont désignés par le terme général « éléments traces métalliques » (ETM) en l'absence de définition plus spécifique.

Le site de Bamba-Kilenda, situé dans la province du Kongo-Central en République Démocratique du Congo, est particulièrement sensible aux émissions métalliques liées à l'exploitation minière du cuivre (Cu), du plomb (Pb) et du zinc (Zn). Il est donc crucial d'évaluer la distribution et le comportement des ETM dans les eaux, sédiments et sols environnants. Des recherches antérieures ont démontré que les sédiments de zones minières peuvent accumuler des concentrations significatives d'ETM, influencées par les activités anthropiques telles que l'exploitation minière et les résidus industriels [8,9].

La caractérisation géochimique des sédiments est essentielle pour comprendre les mécanismes de bioaccumulation et de toxicité associés aux ETM. Les études indiquent que la spéciation chimique des métaux, déterminée par les conditions environnementales telles que l'enrichissement en matière organique et la dynamique sédimentaire, présente des implications majeures pour leur comportement et leur mobilité [9,10]. Une étude a révélé que les ETM subissent des redistributions post-dépositionnelles affectant leur biodisponibilité et leur toxicité dans les sédiments [8]. Ces processus sont souvent exacerbés dans les environnements soumis à des pressions anthropiques, soulignant la nécessité d'évaluations régulières de la qualité sédimentaire et des risques associés [11]. De plus, les interactions entre les ETM et les organismes aquatiques, notamment les poissons, constituent un domaine de préoccupation particulier. L'accumulation métallique dans les tissus musculaires des espèces aquatiques représente un indicateur puissant de la santé écosystémique [12,13]. Des recherches dans des environnements similaires témoignent de concentrations élevées d'ETM dans les espèces piscicoles, fournissant des informations cruciales sur l'impact des activités minières sur la chaîne alimentaire locale et la biodiversité [14].

La contamination métallique d'un cours d'eau se traduit généralement par une accumulation progressive des métaux dans les sédiments de surface. Les contaminants peuvent rester partiellement biodisponibles pour le biote malgré la présence de sulfures dans les sédiments qui précipitent efficacement de nombreux métaux tels que Cu, Cd, Co, Ni, Pb et Zn. Ces sulfures résultent de la réduction des sulfates par les bactéries sulfato-réductrices à l'interface eau-sédiment, mais sont généralement réoxydés partiellement par la bioturbation, la diffusion d'oxygène dans les eaux interstitielles et la remise en suspension des sédiments de surface.

Cependant, malgré un effet d'accumulation évident, le transfert métallique vers la profondeur est également observé et généralement déduit des comparaisons de teneurs totales entre les différents horizons pédologiques. Parmi les éléments métalliques, certains sont des oligo-éléments essentiels comme le Zn et le Cu, mais deviennent toxiques à fortes concentrations. Le Pb et le Cd sont toxiques dès l'état de trace. Leur accumulation et leur transfert constituent donc un risque sanitaire majeur [15] via la contamination de la chaîne alimentaire plante-animal [16], mais également pour le milieu naturel dans son ensemble [17,18].

Ce travail vise à réaliser une étude sur la caractérisation géoenvironnementale, la distribution et le comportement des ETM dans les eaux, sédiments et sols des environs du gisement de Cu-Pb-Zn de Bamba-Kilenda. L'objectif principal consiste à évaluer la contamination ou le risque d'une contamination métallique par les ETM (Cd, Cu, Pb, Zn, Rb, Sr, Sb, Pd, Fe) dans l'environnement immédiat de ce gisement, afin de mieux comprendre la sensibilité des eaux, sédiments et sols aux dépôts de polluants métalliques et de déterminer si ces écosystèmes jouent un rôle d'immobilisation des ETM ou de transfert vers les végétaux et animaux (biodisponibilité), donc vers l'homme. Il s'agit aussi de proposer des recommandations pour la remédiation de ces écosystèmes contaminés, car la Province du Kongo-Central, particulièrement le village de Bamba-Kilenda, suscite une attention particulière concernant les diverses substances minérales (Cuivre, Plomb, Zinc, Vanadium) exploitées par intermittence depuis l'époque coloniale, dont toutes les étapes de traitement des minerais sont sources de pollution environnementale. Enfin, il est impératif de relier les conclusions scientifiques à des stratégies de gestion durable des ressources minérales tenant compte des implications environnementales potentielles des opérations extractives [8,13], nécessitant une collaboration étroite entre chercheurs, gestionnaires environnementaux et parties prenantes locales pour développer des cadres réglementaires adaptatifs protégeant la santé humaine et l'intégrité écosystémique.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

2.1.1. Localisation et caractéristiques géographiques

La zone d'étude est située dans le territoire de Madimba, district de Lukala, province du Kongo-Central, en République Démocratique du Congo, à environ 70 kilomètres au sud-ouest de Kinshasa. Le site du gisement de Bamba-Kilenda se localise précisément aux coordonnées géographiques 4°55'15" de latitude Sud et 15°29'48" de longitude Est, à une altitude de 514 mètres au-dessus du niveau de la mer (Figure 1a). La région est caractérisée par un climat tropical de type Aw selon la classification de Köppen-Geiger, avec une température moyenne annuelle de 25°C et une pluviométrie moyenne comprise entre 1200 et 1400 mm par an. Le régime climatique présente une alternance marquée entre une saison sèche s'étendant de juin à septembre et une saison des pluies d'octobre à mai, cette alternance jouant un rôle déterminant dans la mobilité et la dispersion des éléments traces métalliques dans l'environnement.

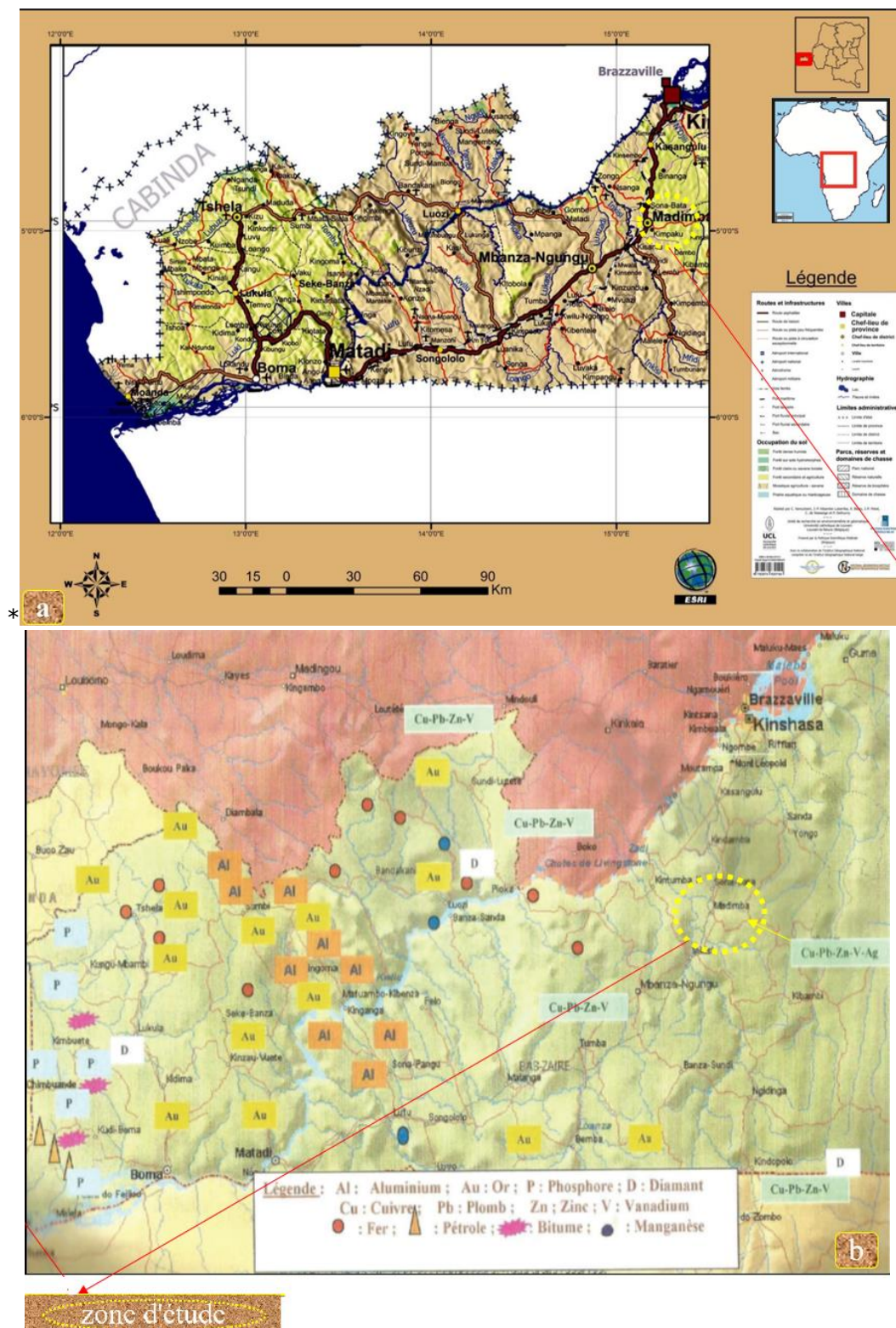


Figure 1 a et b : Localisation de la zone d'étude présentant respectivement la carte administrative (a) et de minéralisation du site étudié (b).

2.1.2. Contexte géologique et minéralogique

Le gisement polymétallique de Bamba-Kilenda constitue l'une des manifestations métallogéniques les plus significatives de la province du Kongo-Central (figure 1b). Ce gisement appartient au système du Karroo, représenté localement par la Série du Kwango qui repose en discordance sur le soubassement schisto-gréseux et schisto-calcaire [19,20]. La structure géologique de la région a été profondément affectée par l'orogénèse Ouest-Congolienne (Panafricaine), ayant généré un réseau complexe de failles dont la principale, la faille de Masungu, d'orientation générale est-ouest, contrôle directement la mise en place de la minéralisation [21,22]. Cette faille normale résulte de la réactivation d'une zone faillée ancienne et s'étend sur environ 3,5 kilomètres de longueur, créant un contact anormal entre les formations schisto-gréseuses et le sommet du schisto-calcaire.

La minéralisation du gisement présente une zonation spatiale caractéristique avec, dans la partie occidentale, une minéralisation essentiellement cuprifère dominée par la chalcosine (Cu_2S), accompagnée accessoirement de chalcopryrite (CuFeS_2) et de bornite (Cu_5FeS_4), préférentiellement localisées dans les niveaux calcaires. Dans la partie orientale, on observe une minéralisation plus complexe de type cupro-plombo-zincifère associant la blende (ZnS), la galène (PbS) et la pyrite (FeS_2), principalement concentrées dans les quartzites feldspathiques [23-27]. La paragenèse primaire se développe en trois phases successives incluant la pyrite, suivie des sulfures de cuivre et de la tétraédrite-tennantite, puis de la galène et du quartz. Une phase de minéralisation supergène superpose des oxydes de fer, des carbonates et silicates de zinc et de cuivre, ainsi que des vanadates complexes. Les réserves géologiques sont estimées à 2 millions de tonnes de réserves probables et entre 220 000 et 240 000 tonnes de réserves certaines de minerais non enrichis.

2.2. Stratégie et méthodes d'échantillonnage

2.2.1. Conception du plan d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage a été conçue pour évaluer la distribution spatiale des éléments traces métalliques en fonction de la distance par rapport au gisement et selon les axes de drainage naturels. Un échantillonnage systématique a été réalisé suivant un transect radiaire centré sur le gisement, en privilégiant les cours d'eau comme vecteurs potentiels de dispersion géochimique des métaux. Cette approche permet d'appréhender l'influence du gisement sur la qualité environnementale des matrices eau-sédiment-sol dans un rayon d'investigation de 10 kilomètres. La campagne de terrain s'est déroulée durant la saison sèche du mois d'août 2018, période choisie stratégiquement pour minimiser l'effet de dilution par les eaux de ruissellement et obtenir des concentrations représentatives des conditions d'étiage. Au total, vingt-neuf échantillons ont été collectés selon un protocole standardisé, comprenant quatre échantillons d'eau de surface, six échantillons de sédiments fluviaux et dix-neuf échantillons de sols superficiels, tous géolocalisés précisément à l'aide d'un récepteur GPS de marque Garmin (Figure 2).

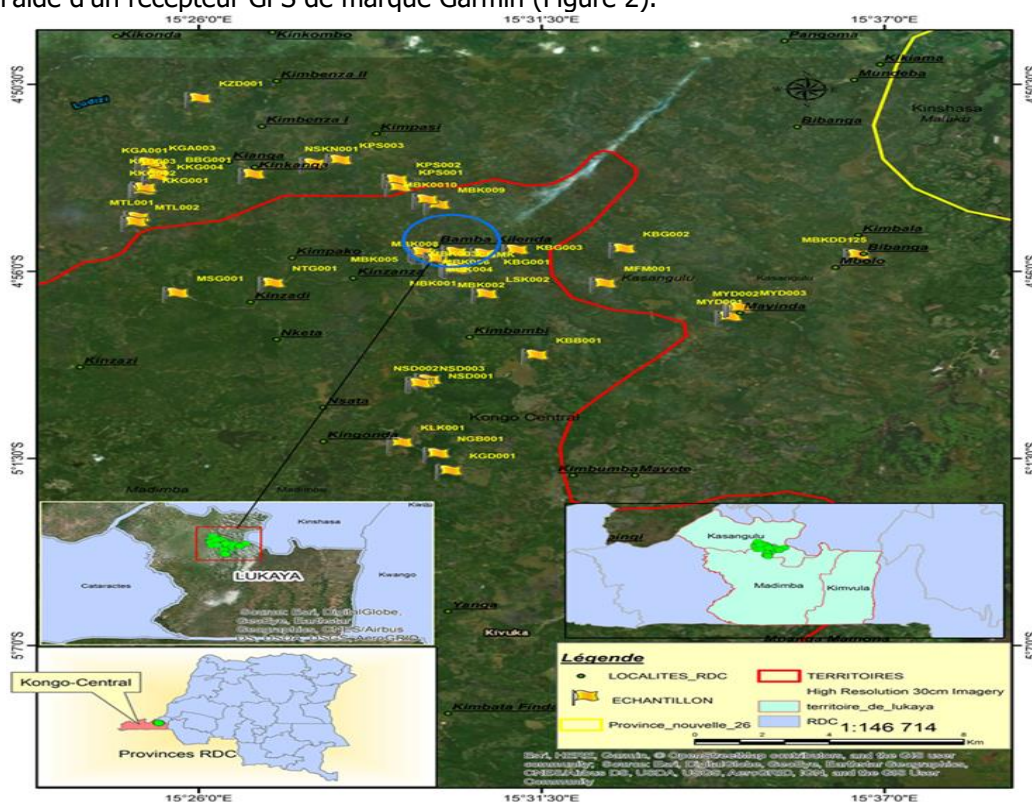


Figure 2 : Carte d'échantillonnage d'eaux, des sédiments et des sols.

2.2.2. Prélèvement des échantillons d'eau de surface

Quatre stations hydrologiques ont été établies selon un gradient croissant de distance par rapport au gisement pour capturer la dispersion géochimique des éléments traces métalliques dans le réseau hydrographique. La station BBG001, située à la source de la rivière Bwanga à moins d'un kilomètre du gisement, constitue le point de prélèvement le plus proximal susceptible de refléter l'impact direct des minéralisations affleurantes. La station KGA003, implantée dans la rivière Taba, affluent de la N'djili, à cinq kilomètres du gisement, permet d'évaluer la dispersion à moyenne distance. La station MTL002, établie dans la rivière Mobi, affluent de la Lukunga séparant les villages de Montali et Masinga, se situe à trois kilomètres dans la partie sud-ouest du site. Enfin, la station KPS001, la plus distale, a été positionnée dans la rivière Kibaric, affluent de la Lukunga dans le secteur nord-est, à une distance de dix kilomètres du gisement.

À chaque station, un litre d'eau a été prélevé manuellement à mi-profondeur dans des flacons en polyéthylène de 250 millilitres préalablement décontaminés selon un protocole rigoureux. Ces contenants ont d'abord été lavés à l'eau courante additionnée de dix pourcents d'acide nitrique concentré, puis abondamment rincés à l'eau distillée et séchés à l'air libre dans un environnement contrôlé pour éviter toute contamination croisée avant d'être hermétiquement fermés jusqu'à leur utilisation. Sur le terrain, avant chaque prélèvement effectué en double, les flacons ont été préalablement rincés trois fois avec l'eau à échantillonner pour conditionner les parois du contenant. Immédiatement après la collecte, les échantillons ont été filtrés pour éliminer les particules en suspension, puis acidifiés par addition de quelques gouttes d'acide nitrique concentré afin d'abaisser le pH en dessous de deux et ainsi inhiber les activités biologiques et prévenir la précipitation ou l'adsorption des métaux sur les parois. Les échantillons ont été immédiatement placés dans une glacière et maintenus à une température maximale de 4°C pendant le transport et jusqu'à leur analyse au laboratoire.

2.2.3. Prélèvement des sédiments fluviaux

Les échantillons de sédiments ont été prélevés au niveau des berges dans le lit actif des cours d'eau, cette localisation permettant de collecter des matériaux récemment déposés reflétant les conditions géochimiques actuelles du bassin versant. Les prélèvements ont été effectués manuellement dans la couche superficielle des sédiments sur une profondeur de zéro à dix centimètres. Une masse d'environ cinq cents grammes de sédiment a été collectée à chaque station à l'aide d'une pelle en acier inoxydable préalablement nettoyée entre chaque prélèvement pour éviter les contaminations croisées. Les échantillons ont été immédiatement conditionnés dans des sachets en polyéthylène hermétiques étiquetés avec précision, mentionnant le code de la station, les coordonnées GPS, la date et l'heure du prélèvement. Une conservation à 4°C dans une glacière a été maintenue pendant le transport et jusqu'au traitement au laboratoire.

2.2.4. Prélèvement des sols superficiels

Dix-neuf échantillons de sols ont été prélevés sur le site du gisement et dans ses environs immédiats selon une grille d'échantillonnage conçue pour caractériser la variabilité spatiale des concentrations en éléments traces métalliques. Les prélèvements ont été réalisés dans l'horizon superficiel du sol entre zéro et vingt centimètres de profondeur, après avoir soigneusement éliminé la litière végétale et les débris organiques de surface. Chaque échantillon composite, d'une masse approximative d'un kilogramme, a été constitué par la combinaison homogène de trois à cinq sous-échantillons prélevés dans un rayon de cinq mètres autour de chaque point géolocalisé par GPS. Les échantillons ont été collectés à l'aide d'une pelle en acier inoxydable, puis conditionnés dans des sachets en plastique robustes correctement étiquetés.

2.3. Préparation des échantillons et caractérisation physicochimique

2.3.1. Traitement des échantillons solides

Les échantillons de sols et de sédiments ont fait l'objet d'une préparation minutieuse au laboratoire afin d'obtenir des fractions granulométriques homogènes adaptées aux analyses géochimiques. Dans une première étape, les échantillons ont été étalés en couche mince et séchés à l'air libre à température ambiante comprise entre vingt et vingt-cinq degrés Celsius pendant une durée de sept jours, cette méthode de séchage naturel permettant d'éviter toute modification thermique de la structure minéralogique. Après séchage complet, les échantillons ont été tamisés à deux millimètres pour éliminer les éléments grossiers. Une fraction représentative de cent grammes de chaque échantillon tamisé a ensuite été prélevée par quartage et broyée finement à l'aide d'un broyeur à billes en agate. La poudre obtenue a été tamisée à soixante-trois micromètres pour obtenir une granulométrie fine et homogène garantissant une surface d'analyse uniforme lors des dosages par fluorescence X.

2.3.2. Analyses physicochimiques fondamentales

Les paramètres physicochimiques fondamentaux ont été déterminés selon des protocoles standardisés pour caractériser l'environnement géochimique des différentes matrices échantillonnées. Pour les échantillons d'eau, les mesures de pH et de température ont été effectuées directement sur le terrain immédiatement après le prélèvement. Pour les échantillons de sols et de sédiments, les mesures ont été réalisées au laboratoire de Pédogéochimie sur des suspensions

préparées selon un rapport sol-eau d'un pour deux virgule cinq en masse par volume. Les mesures de pH ont été effectuées à l'aide d'un pH-mètre de marque METTLER TOLEDO préalablement calibré avec des solutions tampons certifiées de pH 4,01 ; 7,00 et 10,01. Les caractéristiques organoleptiques des eaux, incluant la couleur, l'odeur et la turbidité, ont également été évaluées qualitativement sur le terrain.

2.4. Analyses géochimiques des éléments traces métalliques

2.4.1. Dosage par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie

La détermination quantitative des concentrations en éléments traces métalliques dans les échantillons de sols et de sédiments a été réalisée par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) au Centre d'Expertise, d'Évaluation et de Certification des substances minérales précieuses et semi-précieuses (CEEC) de Kinshasa. Les éléments dosés incluent Cu, Pb, Zn, Cd, As, Fe, Ba, Sb, Zr, Sn, Rb, Pd et Sr. La préparation des échantillons pour l'analyse par ED-XRF a nécessité plusieurs étapes critiques. Cinq grammes de poudre fine inférieure à soixante-trois micromètres ont été prélevés de chaque échantillon et homogénéisés. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve à une température de quarante degrés Celsius pendant vingt-quatre heures pour éliminer toute humidité résiduelle. Après séchage, la poudre a été transférée dans un moule métallique et comprimé sous une presse hydraulique à quinze tonnes de pression pendant soixante secondes pour former des pastilles compactes de trente-deux millimètres de diamètre présentant une surface plane et homogène.

Les analyses ont été effectuées en utilisant un spectromètre de fluorescence X à dispersion d'énergie équipé d'un détecteur semi-conducteur. Le principe de la méthode repose sur l'excitation des atomes de l'échantillon par un faisceau de rayons X primaires de haute énergie, provoquant l'émission de rayons X secondaires caractéristiques.

2.5. Évaluation de la contamination et indices géochimiques

2.5.1. Indice de géoaccumulation de Müller

L'évaluation quantitative du niveau de contamination des sols et sédiments par les éléments traces métalliques a été réalisée en calculant l'indice de géoaccumulation développé par Müller [32]. Cet indice permet de quantifier l'enrichissement en métaux par rapport au fond géochimique naturel. L'indice de géoaccumulation est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{geo} = \log_2[C_n / (1,5 \times B_n)] \quad (1)$$

Où :

C_n : représente la concentration mesurée de l'élément dans l'échantillon,

B_n : correspond à la valeur de référence géochimique,

Facteur 1,5 : constitue un coefficient de correction pour les variations naturelles du fond géochimique.

La classification de Müller définit sept classes : $I_{geo} \leq 0$ (non pollué), $0 < I_{geo} \leq 1$ (non pollué à modérément pollué), $1 < I_{geo} \leq 2$ (modérément pollué), $2 < I_{geo} \leq 3$ (modérément à fortement pollué), $3 < I_{geo} \leq 4$ (fortement pollué), $4 < I_{geo} \leq 5$ (fortement à extrêmement pollué), $I_{geo} > 5$ (extrêmement pollué).

2.5.2. Valeurs de référence et normes de comparaison

Les concentrations en éléments traces métalliques mesurées ont été comparées aux directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (2006, 2014) pour les sols agricoles, aux valeurs moyennes mondiales compilées par Reimann et de Caritat [34], et aux seuils établis par la FAO/WHO pour la sécurité alimentaire.

2.6. Traitement statistique et représentation cartographique des données

2.6.1. Analyses statistiques descriptives et corrélationnelles

Le traitement statistique des données géochimiques a débuté par le calcul des paramètres statistiques descriptifs (moyennes arithmétiques, médianes, écarts-types, valeurs minimales et maximales, coefficients de variation) pour chaque élément trace métallique dans les différentes matrices analysées. Une analyse de corrélation bivariable a été réalisée en calculant les coefficients de corrélation de Pearson entre tous les couples d'éléments traces métalliques afin d'identifier les associations géochimiques significatives pouvant renseigner sur les sources de contamination.

2.6.2. Classification hiérarchique et dendrogrammes

Une analyse de classification hiérarchique ascendante a été appliquée aux données de concentrations élémentaires pour regrouper les éléments traces métalliques en fonction de leurs similitudes de distribution dans les sols et les sédiments. Cette méthode permet de construire des dendrogrammes illustrant les relations d'affinité entre les différents éléments sur la base de la distance euclidienne.

2.6.3. Cartographie et analyses spatiales

La distribution spatiale des concentrations en éléments traces métalliques a été cartographiée en utilisant les logiciels QGIS et ArcGIS. Les coordonnées GPS de chaque station d'échantillonnage ont été intégrées dans une base de données géoréférencée. Une carte synthétique d'échantillonnage a été produite présentant la répartition spatiale de l'ensemble des prélèvements. Des graphiques illustrant la variation des teneurs métalliques le long des axes de drainage ont été construits pour mettre en évidence les tendances en fonction de la distance par rapport aux zones minéralisées sources.

2.6.4. Outils informatiques utilisés

L'ensemble du traitement des données a été réalisé en utilisant les logiciels QGIS et ArcGIS pour la cartographie numérique et l'analyse spatiale, SPSS Statistics pour les calculs statistiques et la classification hiérarchique, et Microsoft Excel pour la gestion des bases de données, les calculs d'indices de contamination et la production de graphiques.

3. RÉSULTATS

3.1. Caractéristiques physicochimiques des échantillons

Au total, 29 échantillons ont fait l'objet d'analyses de laboratoire : 4 échantillons d'eau, 6 échantillons de sédiments et 19 échantillons de sols, tous localisés dans la minute de terrain.

Les mesures de pH et température pour les différents échantillons de sols sont présentées dans le Tableau 1. La température des échantillons varie entre 24°C et 28°C, conforme aux normes saisonnières de la région (moyenne de 25°C). Le pH des sols oscille entre 4,2 et 5,8, caractérisant un milieu acide. Pour les sédiments, le pH est encore plus bas (hyper-acide), tandis que les eaux présentent également un pH acide.

Tableau 1. Mesure du pH et de la température au niveau des 14 sites de prélèvement des sols.

Numéro	Échantillon	Mesure pH	Température (°C)
1	NTG001	1.768	26.1
2	MBK002	1.873	27.3
3	KPS003	2.767	27.8
4	KBG003	6.096	25.0
5	LSG001	4.015	26.6
6	LSK002	4.515	27.7
7	MBK005	5.201	27.7
8	KLS002	4.41	28.5
9	KGD001	3.864	28.1
10	KKG003	3.752	27.7
11	MBK006	5.59	28.2
12	NSK001	4.014	28.5
13	KKG004	3.734	28.2
14	NTG001	3.657	28.3

3.2. Concentrations en éléments traces métalliques

3.2.1. Spectres de fluorescence X

Les analyses spectrales par fluorescence X ont permis d'identifier et de quantifier les éléments traces métalliques présents dans les échantillons. La Figure 3 présente les spectres caractéristiques obtenus pour le cuivre (a), le plomb (b), le zinc (c), le cadmium (d) et l'arsenic (e), montrant des pics d'émission bien définis pour chaque élément.

Une analyse de périodogramme a été réalisée pour caractériser les périodicités temporelles de cinq métaux lourds (cuivre [Cu], plomb [Pb], zinc [Zn], cadmium [Cd], et arsenic [As]) sur des périodes s'étendant de 0,60 à 2,61 unités temporelles.

Le panneau (a) montre que le cuivre présente un pic spectral principal à la période 1,41 (amplitude $1,6 \times 10^{-3}$), avec une composante tendancielle marquée s'étendant jusqu'à la période 2,61. Les concentrations de plomb (panneau b) ont démontré la variabilité spectrale la plus élevée, avec un pic dominant à la période 1,21 (amplitude $4,0 \times 10^{-3}$) et des oscillations secondaires significatives, indiquant une dynamique temporelle complexe. Le périodogramme du zinc (panneau c) révèle un pic primaire à la période 0,81 (amplitude $3,5 \times 10^{-3}$) avec une variabilité de fond modérée et une tendance ascendante vers les périodes longues.

Le cadmium (panneau d) présente une dominance distincte des courtes périodes avec une amplitude maximale ($2,0 \times 10^{-3}$) à la période 0,81, suivie d'une atténuation progressive et d'une récupération tardive du spectre. L'arsenic

(panneau e) exhibe une augmentation monotone unique de la puissance spectrale depuis la ligne de base jusqu'à $4,0 \times 10^{-3}$, suggérant des composantes basse fréquence prédominantes sans périodicités distinctes.

Ces signatures spectrales indiquent des patterns temporels spécifiques aux éléments dans la distribution environnementale des métaux, reflétant potentiellement des sources d'émission différentielles, des mécanismes de transport, et des processus de cycles biogéochimiques distincts. Les périodicités observées pourraient avoir des implications pour l'évaluation de l'exposition et la caractérisation du risque dans les programmes de surveillance en santé environnementale.

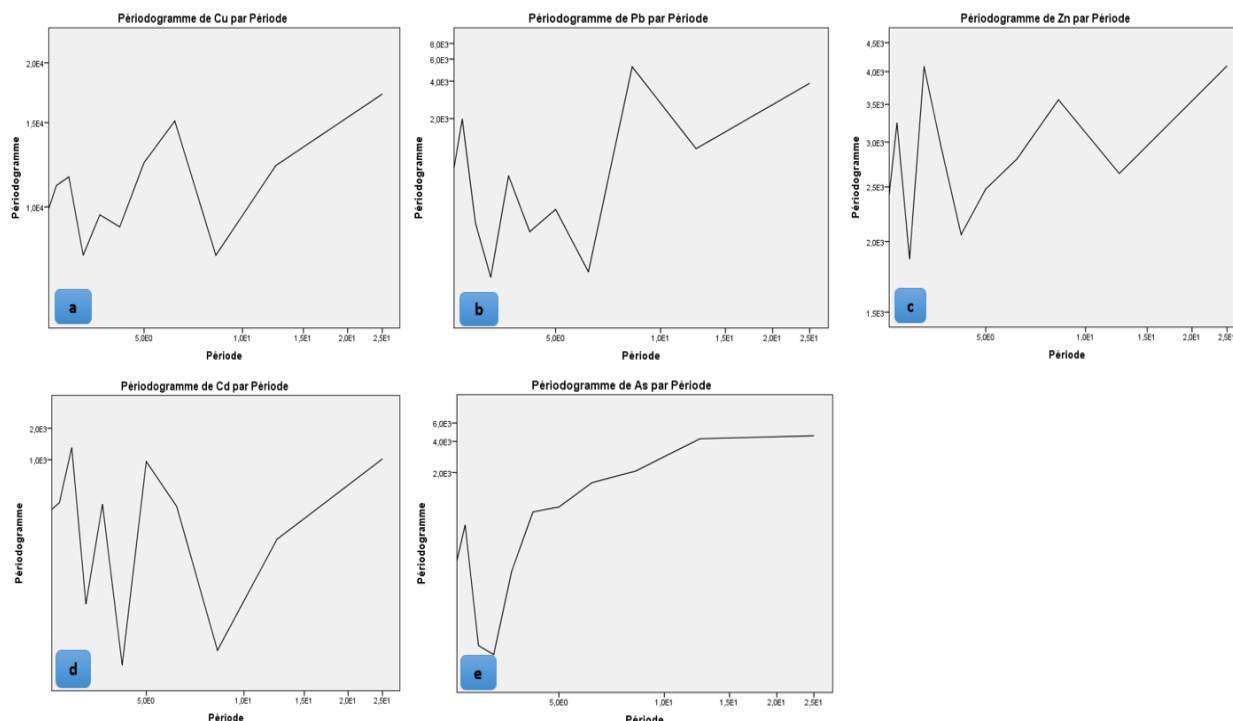


Figure 3 : Analyse spectrale des concentrations en métaux lourds par décomposition de périodogramme.

3.2.2. Teneurs en ETM dans les sols

Le Tableau 2 présente les concentrations en éléments traces métalliques mesurées dans les 19 échantillons de sols (figure 4), comparées aux normes de l'OMS (2006, 2014) et aux teneurs maximales estimées dans le monde.

Tableau 2 : Teneurs des éléments dans les échantillons de sols et valeurs estimées par l'OMS et FAO.

Élément	Type	KBG003	KBG003a	Boya001a	KKG003	MSG001	NTG001	KBB001	KGD001	Moyenne	Valeur maximum	Unités
Cu	Sol	125	87	72	77	55	71	51	77	24.84	100	mg/kg
Pb	Sol	31	42	41	42	33	25	43	36	12.65	100	mg/kg
Zn	Sol	30	32	29	29	25	30	25	26	45.13	300	mg/kg
Ba	Sol	199	199	168	181	295	158	400	185	175	/	mg/kg
Sb	Sol	-	-	-	61	51	43	-	61	/	/	mg/kg
Cd	Sol	34	38	-	25	29	23	40	-	0.44	3	mg/kg
Zr	Sol	87	209	229	185	67	78	378	31	237	/	mg/kg
Fe	Sol	18800	11100	12300	2234	4317	6795	2965	4365	41000	/	mg/kg
Sn	Sol	55	51	63	59	49	64	73	44	/	/	mg/kg
Pd	Sol	16	16	17	18	17	18	17	17	/	/	mg/kg
As	Sol	11	11	40	-	11	19	11	15	/	/	mg/kg
As	Sol	9	11	10	-	10	11	9	11	5	40	mg/kg
Sr	Sol	11	9	8	10	9	11	9	8	100	/	

Hormis le fer, très abondant (2000 à 18800 mg/kg), le zirconium et le baryum présentent également des teneurs élevées. L'ordre d'abondance des ETM est : **Cu > Sb > Sn > Zn > Pb > Cd > Rb > Pd > Sr > As.**

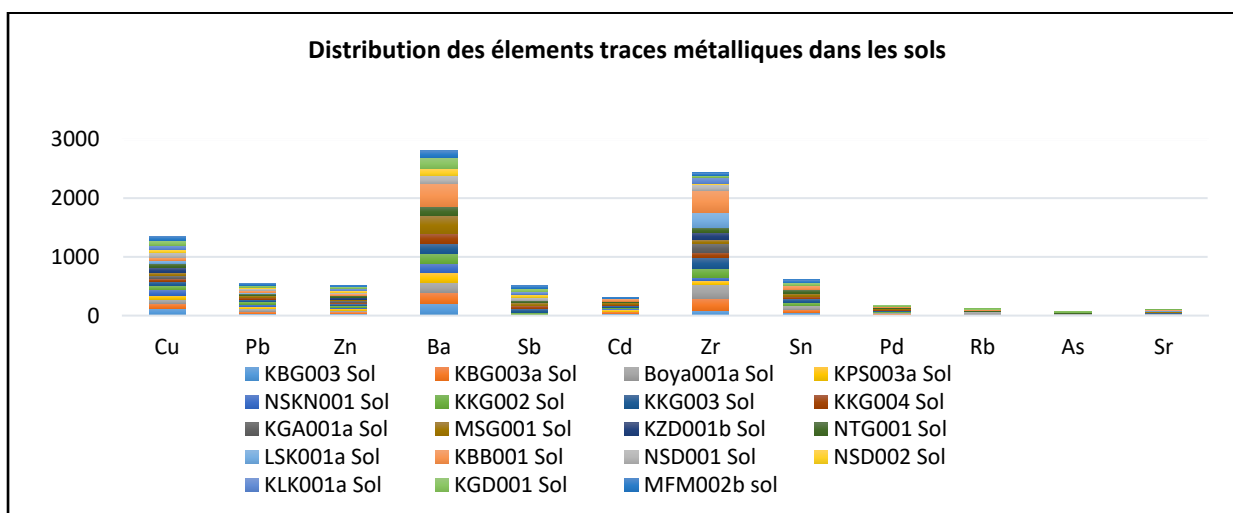


Figure 4 : Variation des teneurs des ETMs dans les sols.

Le Tableau 3 synthétise les valeurs moyennes, minimales et maximales des concentrations métalliques dans les sols pour l'ensemble du site.

Tableau 3 : Valeurs de concentration (moyenne, minimum et maximum) de Cu, Pb, Zn, Ba, Cd, Sb, Pd, Rb, As et Sr dans les 19 échantillons de sols.

Élément	Moyenne	Minimum	Maximum
Cu	71,21	8	284
Pb	29,5	7	86
Zn	64	15	224
Ba	111	25	400
Cd	16,32	0	102
Sb	82	13	398
Pd	17	0	100
Rb	16	0	60
As	48,8	8	103
Sr	5,47	0	37

3.2.3. Teneurs en ETM dans les sédiments

Le Tableau 4 présente les caractérisations géochimiques des sédiments : distribution multi-élémentaire et identification de zones critiques. Les concentrations de 12 éléments traces métalliques ont été déterminées dans 6 échantillons de sédiments prélevés dans différentes zones du district minier (MBK005, MBK006, MBK009, KBG002, LSK002, BKG001a) pour évaluer la distribution spatiale de la contamination sédimentaire. L'analyse révèle une hétérogénéité spatiale marquée avec l'identification d'un site critique présentant une contamination multi-métallique exceptionnelle.

Zone critique identifiée : L'échantillon KBG002 présente une signature géochimique distinctive avec des enrichissements extrêmes pour la majorité des éléments analysés. Le cuivre atteint une concentration critique de 426 ppm, soit 6 à 9 fois supérieure aux autres sites (46-76 ppm). Le fer montre l'enrichissement le plus spectaculaire avec 25.600 ppm, représentant 5 à 120 fois les concentrations des sites adjacents (214-5.347 ppm). Le zinc (211 ppm vs 30-36 ppm ailleurs) et le baryum (314 ppm vs 106-178 ppm) confirment cette anomalie géochimique majeure.

Contamination généralisée modérée : Les sites MBK005, MBK006, MBK009, et LSK002 présentent des profils géochimiques relativement homogènes avec des concentrations modérées mais systématiquement élevées. Le plomb oscille entre 75-97 ppm sur ces sites, l'étain entre 46-60 ppm, et l'arsenic entre 56-83 ppm, indiquant une contamination de fond diffuse. L'antimoine montre des concentrations préoccupantes (31-64 ppm) sur l'ensemble des sites échantillonnés.

Déficits élémentaires : Le strontium présente des concentrations uniformément faibles (7-9 ppm) sur la majorité des sites, à l'exception notable de KBG002 (45 ppm), suggérant soit un lessivage préférentiel soit des conditions

géochimiques particulières. Le rubidium montre une distribution bimodale avec des concentrations faibles (7-11 ppm) sur les sites MBK et des enrichissements sur KBG002 et LSK002 (51-56 ppm).

Lacunes analytiques : L'échantillon BBG001a présente des données incomplètes avec plusieurs éléments non déterminés (Ba, Zr, Sn, Pd, Rb, As, Sr), limitant l'évaluation comparative. Les échantillons LSK002 montrent également des lacunes pour l'arsenic et le strontium.

Interprétation : Ces résultats révèlent une contamination sédimentaire à deux niveaux : une contamination de fond généralisée affectant l'ensemble de la zone d'étude, et une contamination critique localisée au site KBG002 suggérant une source ponctuelle d'émission majeure (proximité directe du gisement ou activités minières intensives). La signature multi-métallique exceptionnelle de KBG002 indique des risques environnementaux aigus nécessitant une surveillance prioritaire et des mesures de gestion spécifiques. Cette hétérogénéité spatiale a des implications directes pour l'évaluation des risques écotoxicologiques et la définition de stratégies de remédiation différenciées selon les zones d'exposition.

Tableau 4 : Concentration (ppm) des ETM dans les 6 échantillons de sédiments.

Échantillon	Cu	Pb	Zn	Ba	Sb	Zr	Fe	Sn	Pd	Rb	As	Sr
MBK005	74	88	36	164	34	93	1250	46	22	7	56	8
MBK006	70	75	31	161	51	123	763	60	16	11	75	9
MBK009	46	77	36	178	52	133	5347	60	17	8	79	7
KBG002	426	97	211	314	64	243	25600	48	19	56	83	45
LSK002	76	86	30	106	40	184	1177	46	20	51	–	–
BBG001a	72	70	35	–	31	–	214					

Le Tableau 5 synthétise les statistiques descriptives pour les sédiments. L'analyse statistique révèle une hétérogénéité géochimique exceptionnelle avec des coefficients de variation extrêmes et des distributions non-gaussiennes marquées. Anomalies géochimiques majeures : Le fer présente la variabilité la plus extrême avec un rapport maximum/minimum de 120 :1 (25.600/214 ppm), indiquant la présence d'au moins un site avec enrichissement critique. Cette distribution suggère une source ponctuelle d'émission ferrifère majeure. Le cuivre exhibe également une dispersion considérable (rapport 9 :1, 426/46 ppm) avec une moyenne de 127,3 ppm largement influencée par des valeurs extrêmes, témoignant d'une contamination hétérogène d'origine minière.

Contamination systémique modérée : L'étain présente la distribution la plus homogène (46-60 ppm, coefficient de variation minimal) avec une moyenne de 52,5 ppm, suggérant une contamination diffuse uniforme d'origine anthropique. Le plomb montre également une distribution relativement resserrée (70-97 ppm, moyenne 82,17 ppm), indiquant une contamination de fond généralisée avec des sources multiples.

Déficits et lacunes analytiques : Plusieurs éléments (Ba, Zr, Pd, As, Sr) présentent des valeurs minimales nulles, suggérant soit des concentrations inférieures aux limites de détection soit des lacunes analytiques dans certains échantillons. Ces lacunes limitent l'évaluation comparative et nécessitent une approche statistique robuste tenant compte des données censurées.

Distributions bimodales : Le zinc (moyenne 63,2 ppm, gamme 30-211 ppm) et le rubidium (moyenne 24,2 ppm, gamme 7-56 ppm) montrent des distributions suggérant deux populations distinctes : des sites à contamination modérée et au moins un site avec enrichissement majeur, cohérent avec l'identification préalable de l'anomalie KBG002.

Éléments persistants : L'antimoine (moyenne 45,33 ppm, gamme 31-64 ppm) et l'arsenic (moyenne 48,8 ppm, gamme 0-83 ppm) présentent des concentrations moyennes élevées avec une variabilité modérée, indiquant une contamination généralisée d'intensité préoccupante pour la santé environnementale.

Cette analyse statistique confirme l'existence d'une contamination sédimentaire à géométrie variable avec : (1) une contamination de fond diffuse affectant l'ensemble de la zone pour plusieurs éléments (Pb, Sn, Sb), (2) des anomalies géochimiques ponctuelles critiques (Fe, Cu, Zn) témoignant d'impacts miniers directs, et (3) des déficits systémiques pour certains éléments (Sr notamment). Les coefficients de variation élevés (>100% pour la majorité des éléments) indiquent une forte hétérogénéité spatiale nécessitant une approche de gestion environnementale différenciée. Ces distributions non-normales imposent l'utilisation de tests statistiques non-paramétriques pour les analyses comparatives ultérieures et suggèrent la nécessité d'un échantillonnage spatial plus dense pour une caractérisation complète des zones à risque.

Tableau 5 : Valeurs de concentration (ppm) de Cu, Pb, Zn, Ba, Cd, Sb, Pd, Rb, As et Sr (moyenne, minimum et maximum) dans les 6 échantillons de sédiments.

Élément	Moyenne	Minimum	Maximum
Cu	127.3	46	426
Pb	82.17	70	97
Zn	63.2	30	211
Ba	154	0	314
Sb	45.33	31	64
Zr	129.33	0	243
Fe	5725.17	214	25600
Sn	52.5	46	60
Pd	15.7	0	22
Rb	24.2	7	56
As	48.8	0	83
Sr	11.5	0	45

3.3. Indices de contamination

3.3.1. Indice de géoaccumulation (Igeo)

Le Tableau 6 présente les valeurs d'indice de géoaccumulation calculées pour Cu, Pb et Zn dans les différentes stations. Évaluation de la géoaccumulation métallique par quantification de l'intensité de pollution sédimentaire par indice Igeo. L'indice de géoaccumulation (Igeo) a été calculé pour trois métaux prioritaires (Cu, Pb, Zn) dans 6 stations réparties sur 5 rivières du bassin versant (Bwanga, Mobi, Lukunga, Wungu, Kibaric) selon la formule de Müller, permettant une classification standardisée de l'intensité de pollution sédimentaire. L'analyse révèle une différenciation spatiale marquée avec l'identification d'une zone critique et un gradient de pollution variable selon les éléments métalliques.

Zone critique identifiée : La station KBG002 (rivière Lukunga) présente un profil de géoaccumulation exceptionnel avec un Igeo (Cu) de 4,29, classant ce site dans la catégorie "extrêmement pollué" selon la classification de Müller. Cette valeur, 2,4 à 4 fois supérieure aux autres stations (1,08-1,80), témoigne d'un enrichissement anthropique massif en cuivre. Le zinc présente également son enrichissement maximal à cette station (Igeo = 0,89, "modérément pollué"), contrastant avec les valeurs négatives observées sur tous les autres sites.

Contamination cuprifère généralisée : L'ensemble des stations présente des indices Igeo (Cu) positifs et élevés (1,08-4,29), indiquant une contamination cuprifère systémique d'intensité "modérée à forte" selon la classification internationale. Les stations de la rivière Bwanga (MBK005 : 1,77 ; MBK006 : 1,69) et Wungu (LSK002 : 1,80) montrent des niveaux comparables, suggérant une source diffuse ou des apports amont communs.

Déficit en zinc généralisé : Paradoxalement, le zinc présente des indices Igeo négatifs sur 5 des 6 stations (-0,70 à -1,87), indiquant des concentrations inférieures aux valeurs géochimiques de référence. Cette distribution suggère soit un lessivage préférentiel du zinc soit des conditions géochimiques défavorables à son accumulation sédimentaire, à l'exception notable de la zone critique KBG002.

Contamination plombifère modérée : Le plomb exhibe une distribution relativement homogène avec des indices Igeo oscillant entre 0,20 et 0,63, classant l'ensemble des stations dans la catégorie "non polluées à modérément polluées". Cette homogénéité suggère des sources diffuses multiples (retombées atmosphériques, érosion des sols contaminés) plutôt qu'une source ponctuelle majeure.

Gradient spatial de pollution : L'analyse comparative révèle un gradient décroissant d'intensité de pollution : Lukunga (KBG002) >> Wungu ≈ Bwanga > Mobi ≈ Kibaric, suggérant une proximité variable des sources d'émission ou des différences dans les processus de transport et sédimentation.

Ces indices de géoaccumulation confirment l'impact anthropique majeur sur la qualité sédimentaire du bassin versant, avec une contamination cuprifère systémique et une zone critique nécessitant une intervention prioritaire. L'anomalie géochimique de la station KBG002 (rivière Lukunga) suggère une proximité directe avec les activités d'extraction ou de traitement minier, créant un risque écotoxicologique aigu pour l'écosystème aquatique. La contamination généralisée en cuivre, contrastant avec le déficit en zinc, indique des processus géochimiques complexes influençant la biodisponibilité et la mobilité des métaux. Ces résultats imposent une surveillance environnementale renforcée et des mesures de gestion différenciées selon l'intensité de pollution identifiée, avec une priorité absolue pour la zone critique de Lukunga.

Tableau 6. Valeurs de Igeo pour Cu, Pb et Zn dans les stations observées.

Rivière	Station	Igeo ETMs			Observation Intensité de pollution des sites en ETMs
		Cu	Zn	Pb	
BWANGA	MBK005	1.77	< 0 (-1.66)	0.49	De non pollué à modérément pollué
BWANGA	MBK006	1.69	< 0 (-1.87)	0.26	De non pollué à modérément pollué
MOBI	MBK009	1.08	< 0 (-1.66)	0.30	De non pollué à modérément pollué
LUKUNGA	KBG002	4.29	0.89	0.63	De modérément pollué à extrêmement pollué
WUNGU	LSK002	1.8	< 0 (-0.91)	0.46	De non pollué à modérément pollué
KIBARIC	BBG001a	1.73	< 0 (-0.70)	0.20	De non pollué à modérément pollué

Selon la classification de Müller [32,33], les résultats indiquent qu'une seule station (KBG002) est fortement polluée par le cuivre (Igeo > 3), tandis que cinq autres stations (MBK002, MBK006, MBK009, LSK002, BBG001a) sont susceptibles d'être modérément polluées (0 < Igeo < 2). Le plomb présente une contamination allant de non polluant à modérément polluant, tandis que le zinc est généralement non polluant.

3.4. Analyses statistiques multivariées

3.4.1. Classification hiérarchique des éléments

Les dendrogrammes (Figure 5) regroupent les éléments traces selon leurs affinités géochimiques basées sur la distance euclidienne.

Pour les sols (Figure 5a), deux classes principales émergent :

- Classe 1 : As, Sr, Pd, Rb, Cd, Pb, Zn, Sn, Sb, Cu, Ba et Zr (teneurs entre 8 et 400 mg/kg),
- Classe 2 : Sb, Cu, Ba, Zr et Fe (teneurs entre 25 et 18800 mg/kg),

Pour les sédiments (Figure 5b), deux classes sont également identifiées :

- Classe 1 : Sb, Sn, As, Pb, Sr, Rb, Zn, Ba, Zr et Cu (teneurs entre 7 et 314 mg/kg)
- Classe 2 : Zn, Ba, Zr, Cu et Fe (teneurs entre 30 et 25600 mg/kg).

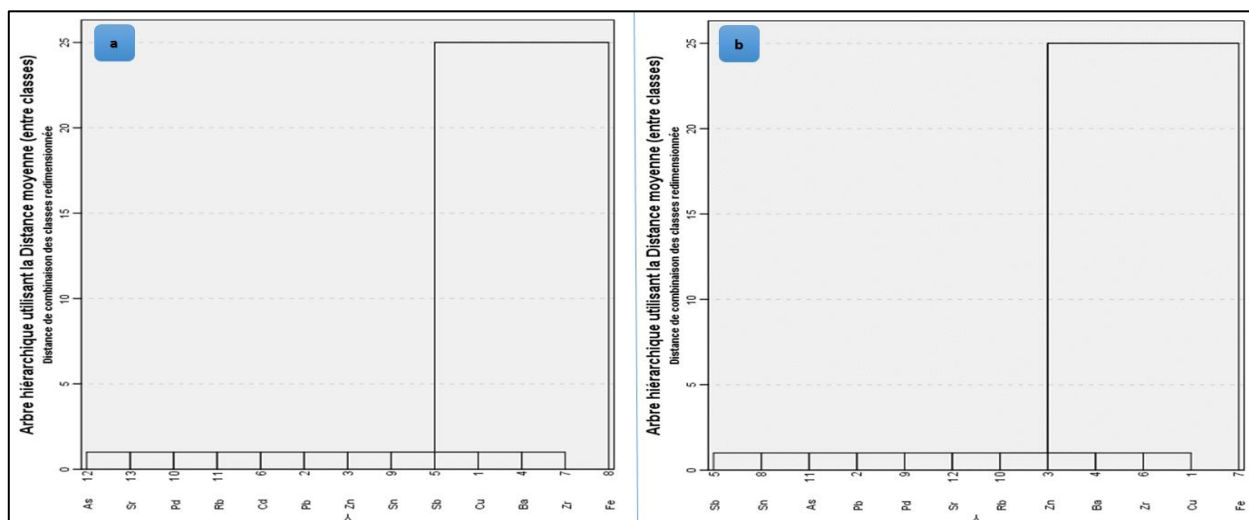


Figure 5 : La figure montre les dendrogrammes regroupent les éléments traces selon leurs affinités géochimiques basées sur la distance euclidienne.

3.4.2. Corrélations entre éléments traces métalliques

Le Tableau 7 présente la matrice de corrélation des ETM selon leur variabilité. Environ 90% des rapports élémentaires présentent des corrélations positives, notamment les couples Ba/Pd, Sn/Pd, As/Zr et Rb/Sr. Seulement 10% présentent des corrélations négatives (anticorrélations) : Cu/Cd, Zr/Sb, Cd/Pb et Fe/Sb. Ces corrélations mettent en évidence un comportement commun et/ou une origine commune de ces métaux.

L'analyse révèle des patterns de corrélation distincts suggérant trois groupes métalliques principaux. Le premier cluster présente des corrélations positives très fortes entre cuivre, zinc, fer et strontium ($r=0,701$ à $0,959$, $p<0,01$), indiquant une origine commune probable ou des processus de transport similaires. Le cuivre et le zinc montrent la corrélation la plus élevée ($r=0,959$, $p<0,01$), suggérant une co-occurrence systématique dans l'environnement étudié.

Le deuxième groupe associe étain et palladium ($r=0,795$, $p<0,01$), ainsi que plomb et arsenic ($r=0,696$, $p<0,01$), révélant des signatures géochimiques spécifiques potentiellement liées à des sources anthropiques distinctes. Le rubidium présente des corrélations modérées à fortes avec plusieurs éléments du premier groupe ($r=0,505$ à $0,606$, $p<0,05$). En revanche, le cadmium exhibe un profil distinctif avec des corrélations négatives systématiques vis-à-vis des principaux éléments (Cu : $r=-0,133$; Zn : $r=-0,205$; As : $r=-0,301$), à l'exception notable du baryum ($r=0,556$, $p<0,01$). L'antimoine montre également des corrélations négatives avec plusieurs métaux du premier cluster.

Ces patterns de corrélation suggèrent des sources d'émission hétérogènes et des voies d'exposition différentielles pour les populations exposées. Les fortes corrélations positives Cu-Zn-Fe-Sr peuvent refléter des émissions industrielles communes ou des processus d'altération géologique, tandis que le profil antagoniste du cadmium pourrait indiquer des sources spécifiques (agriculture, tabagisme) ou des mécanismes de biodisponibilité distincts. Ces observations ont des implications directes pour l'évaluation des risques cumulatifs et la conception de stratégies de biomonitoring ciblées en santé publique.

Tableau 7 : Matrice de corrélation des ETMs selon la variabilité.

Élément	Cu	Pb	Zn	Ba	Sb	Cd	Zr	Fe	Sn	Pd	Rb	As	Sr
Cu	1	0,416	0,959**	0,325	0,211	-0,133	0,223	0,790**	0,091	0,182	0,606**	0,488*	0,837**
Pb	0,416	1	0,446	0,409	0,348	-0,156	0,12	0,142	0,538**	0,543*	0,591**	0,696**	0,451
Zn	0,959**	0,446	1	0,321	0,277	-0,205	0,216	0,701**	0,104	0,205	0,606**	0,569*	0,817**
Ba	0,325	0,409	0,321	1	0,189	0,556**	0,364	0,38	0,585**	0,664**	0,333	0,359	0,555*
Sb	0,211	0,348	0,277	0,189	1	-0,209	-0,31	-0,11	0,287	0,307	0,13	0,33	0,282
Cd	-0,133	-0,156	-0,205	0,556**	-0,209	1	0,155	0,153	0,356	0,29	-0,225	-0,301	0,061
Zr	0,223	0,12	0,216	0,364	-0,31	0,155	1	0,215	0,25	0,331	0,35	0,161	0,419*
Fe	0,790**	0,142	0,701**	0,38	-0,11	0,153	0,215	1	0,141	0,207	0,505*	0,307	0,701**
Sn	0,091	0,538**	0,104	0,585**	0,287	0,356	0,25	0,141	1	0,795**	0,428*	0,37	0,401*
Pd	0,182	0,543*	0,205	0,664**	0,307	0,29	0,331	0,207	0,795**	1	0,512**	0,456*	0,540*
Rb	0,606**	0,591**	0,606**	0,333	0,13	-0,225	0,35	0,505*	0,428*	0,512**	1	0,379	0,568**
As	0,488*	0,696**	0,569*	0,359	0,33	-0,301	0,161	0,307	0,37	0,456*	0,379	1	0,601*
Sr	0,837**	0,451	0,817**	0,555*	0,282	0,061	0,419*	0,701**	0,401*	0,540*	0,568**	0,601*	1

* : La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral) ; ** : La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral) ; $n = 25$ échantillons ; **Couleur Jaune** : Corrélations positives fortes ($>0,6$) ; **Couleur rouge** : Corrélations négatives.

3.5. Distribution spatiale des ETM

3.5.1. Variation des teneurs selon la distance au gisement

Les histogrammes de la **Figure 6** montrent qu'il existe une variation des teneurs selon le sens d'écoulement des différentes rivières. Plus on se rapproche du gisement, plus la teneur augmente ; inversement, plus on s'en éloigne, plus la teneur en ETM diminue. Des teneurs élevées en Cu, Pb, Ba et Zr varient considérablement suivant le sens de l'écoulement, bien qu'à certains points le Zr soit non détecté.

3.5.2. Comparaison avec d'autres régions

Le Tableau 8 compare les teneurs moyennes en ETM dans les sols de Bamba-Kilenda avec les valeurs moyennes des sédiments des rivières et les sols mondiaux. Pour certains éléments (Zn, Ba, Fe, Sr), les concentrations sont égales ou inférieures au fond géochimique. Par exemple, le fer (5944 mg/kg) est huit fois inférieur à la valeur mondiale moyenne (50000 mg/kg), et le strontium (5,47 mg/kg) est quarante-trois fois plus faible que la valeur mondiale (240 mg/kg).

Le Tableau 9 compare les sols de Bamba-Kilenda avec ceux du bassin versant de la Noun (Cameroun) et la moyenne mondiale [35,36]. Les sols de Bamba-Kilenda présentent des teneurs en Cu, Cd, As et Pb supérieures à celles du bassin de la Noun et aux moyennes mondiales, suggérant une pollution plus évoluée. Cependant, ces valeurs restent dans les limites normales des fourchettes acceptables pour les sols [35,36], suggérant une origine principalement géogénique plutôt qu'anthropogénique.

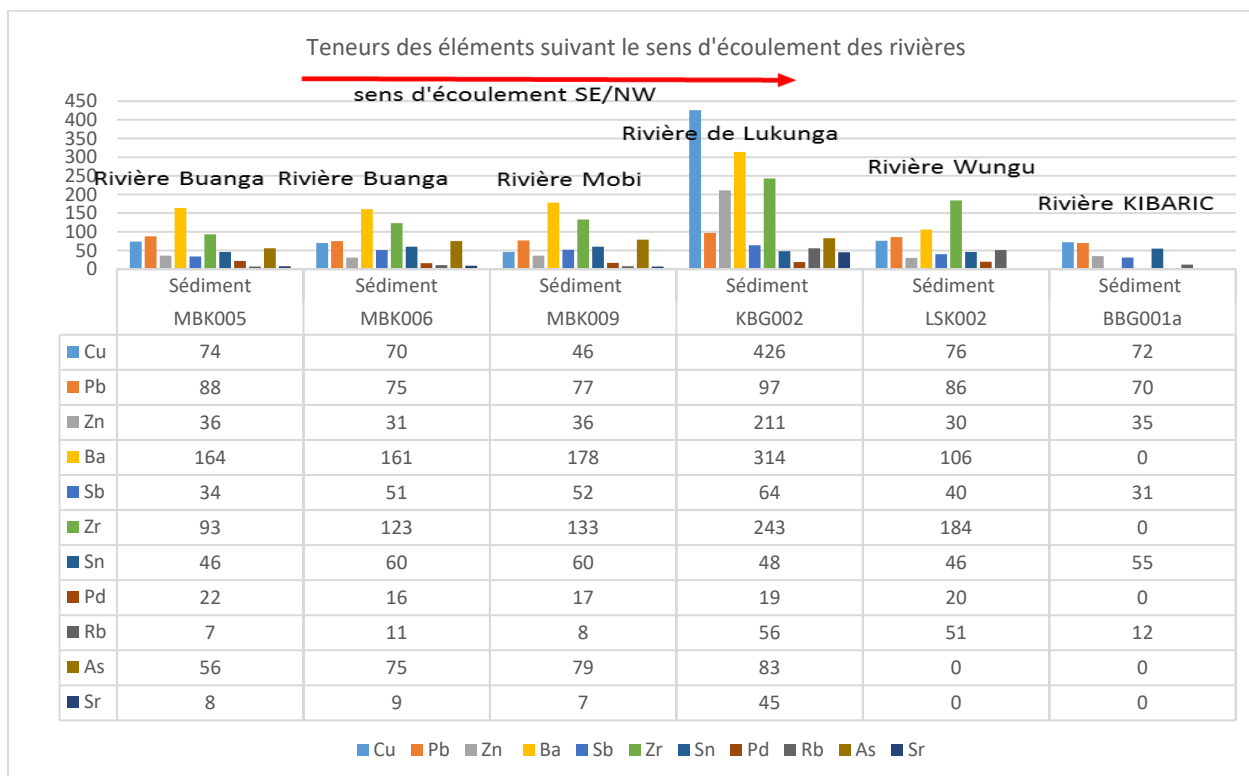


Figure 6 : Variation des ETMs suivant le sens d'écoulement des cours d'eau de stations de Buanga, Mobi ; Lukunga, Wungu et Kibaric.

Le Tableau 8 montre l'évaluation géochimique comparative des métaux lourds : contamination multi-élémentaire dans une zone d'étude environnementale. Les concentrations de 13 éléments traces ont été déterminées dans les sédiments et sols de la zone d'étude et comparées aux valeurs de référence mondiales établies et aux fourchettes de concentrations normales dans les sols non contaminés. L'analyse révèle une contamination multi-métallique significative avec des patterns de distribution hétérogènes entre les compartiments sédimentaires et pédologiques.

Contamination critique : Le cadmium présente l'enrichissement le plus préoccupant avec une concentration de 16,32 mg/kg dans les sols, soit 54 fois supérieure à la moyenne mondiale (0,3 mg/kg) et largement au-dessus des seuils de toxicité établis (fourchette normale : 0,01-2 mg/kg ; maximum recommandé : 0,7 mg/kg). Cette élévation suggère une source anthropique spécifique.

Contamination modérée à élevée : Le cuivre et le plomb montrent des enrichissements substantiels dans les sédiments (127,33 et 82,17 mg/kg respectivement) comparés aux moyennes mondiales (facteurs d'enrichissement de 5,1× et 4,8×). Les concentrations dans les sols restent élevées mais plus modérées (71,21 mg/kg Cu ; 29,05 mg/kg Pb). L'arsenic exhibe un profil contrasté avec une forte accumulation sédimentaire (48,83 mg/kg vs 5 mg/kg mondial) dépassant les seuils recommandés, tandis que les sols présentent des niveaux acceptables (3,74 mg/kg).

Éléments en déficit : Le zinc et le strontium montrent des concentrations inférieures aux références mondiales, particulièrement dans les sols (Zn : 27,05 vs 70 mg/kg ; Sr : 5,47 vs 240 mg/kg), suggérant soit un lessivage préférentiel soit des conditions géochimiques défavorables à leur accumulation.

Métaux émergents : L'étain présente des concentrations remarquablement élevées (52,5 mg/kg sédiments ; 32 mg/kg sols) dépassant largement les fourchettes normales (0,2-6,8 mg/kg), indiquant potentiellement des sources industrielles spécifiques.

Cette signature géochimique composite suggère une contamination anthropique multi-sources avec des implications majeures pour la santé publique. L'accumulation critique de cadmium, associée aux enrichissements en cuivre, plomb et arsenic, indique des risques d'exposition chronique nécessitant une surveillance sanitaire renforcée et des mesures de gestion environnementale urgentes. La distribution différentielle entre sédiments et sols évoque des processus de mobilité élémentaire complexes influençant la biodisponibilité et les voies d'exposition humaine.

Tableau 8 : Comparaison entre la moyenne des teneurs en ETMs dans les sols de la zone d'étude et les valeurs moyennes dans les sédiments des rivières par rapport aux sols mondiaux, fourchettes normales dans les sols et concentrations maximales dans les sols normaux (mg/kg).

Élément	Sédiments de la zone d'étude	Sols de la zone d'étude	Sols moyens dans le monde	Fourchette normale dans les sols	Teneur maximale dans les sols normaux
Cu	127,33	71,21	25	2-250	100
Pb	82,17	29,05	17	2-300	100
Zn	63,17	27,05	70	3-500	300
V	153,83	148	500	90-300	/
Sb	45,33	27	/	/	/
Cd	-	16,32	0,3	0,01-2	0,7
Zr	129,33	127,95	/	/	/
Fe	5725,17	5944	50	10.000-100.000	/
Sn	52,5	32	/	0,2-6,8	/
Pd	15,67	9,26	/	/	/
Rb	24,17	6,21	/	0,5-70	/
As	48,83	3,74	5	0,1-40	40
Sr	11,5	5,47	240	50-120	/

Toutes les concentrations sont exprimées en mg/kg (ppm) ; (-) = Non détecté ; (/) = Données non disponibles ; Les valeurs en **jaune** indiquent des concentrations élevées par rapport aux références mondiales ; Les valeurs en **rouge** représentent les fourchettes de référence ; Les valeurs en **bleu** représentent les moyennes mondiales et seuils normaux

Le tableau 9 ci-dessous montre les teneurs des ETMs contenus dans les sols situés dans le village Bamba-Kilenda et ses environs, et les analyses obtenues pour les sols du bassin versant de la Noun (Ouest du Cameroun) comparativement aux sols mondiaux. Les concentrations de 13 éléments traces ont été déterminées dans 8 échantillons de sol géographiquement distincts (KBG003, KBG003a, Boya001a, KKG003, MSG001, NTG001, KBB001, KGD001) et comparées aux valeurs de référence régionales (bassin versant de Noun) et mondiales. L'analyse révèle une contamination systémique avec des patterns de distribution spatiale hétérogènes et des niveaux de contamination variant selon les sites d'échantillonnage.

Contamination critique et ubiquitaire : Le cadmium présente une contamination généralisée d'intensité exceptionnelle sur tous les sites positifs, avec des concentrations variant de 23 à 40 mg/kg (médiane : 30 mg/kg), soit 77 à 133 fois supérieures à la moyenne mondiale (0,3 mg/kg) et largement au-dessus de tous les seuils de sécurité établis (fourchette normale : 0,01-2 mg/kg). Les sites KBG003a (38 mg/kg) et KBB001 (40 mg/kg) présentent les niveaux les plus alarmants. Cette distribution suggère une source de contamination diffuse d'origine anthropique majeure.

Contamination métallique persistante : L'étain exhibe une contamination homogène sur l'ensemble de la zone avec des concentrations oscillant entre 44 et 73 mg/kg, soit 6 à 11 fois supérieures aux fourchettes normales (0,2-6,8 mg/kg), indiquant une pollution industrielle systémique. Le cuivre montre une variabilité spatiale marquée (51-125 mg/kg) avec un gradient de contamination décroissant : KBG003 (125 mg/kg) > KBG003a (87 mg/kg) > KGD001 (77 mg/kg), suggérant une source ponctuelle avec dispersion progressive.

Déficits géochimiques : Le strontium présente une déplétion généralisée avec des concentrations uniformément faibles (8-11 mg/kg vs 240 mg/kg mondial), indiquant soit un lessivage systémique soit des conditions pédo-géochimiques particulières. Le fer montre des concentrations inférieures aux références dans la majorité des sites (2.234-18.800 mg/kg vs 50.000 mg/kg mondial), à l'exception des sites KBG003, KBG003a et Boya001a.

Variabilité inter-sites : Le zirconium présente la plus forte hétérogénéité spatiale (31-378 mg/kg), avec le site KBB001 montrant un enrichissement exceptionnel (378 mg/kg), suggérant des sources géologiques ou anthropiques localisées. Le baryum exhibe également une variabilité importante (158-400 mg/kg), avec le site KBB001 présentant les concentrations maximales.

Cette signature géochimique révèle une contamination anthropique multi-source avec des implications sanitaires majeures. La contamination critique et généralisée par le cadmium, associée aux enrichissements systémiques en étain et cuivre, indique des risques d'exposition chronique nécessitant une intervention urgente de santé publique. La variabilité spatiale observée suggère des sources ponctuelles superposées à une contamination diffuse, nécessitant une approche de gestion environnementale différenciée selon les zones d'exposition. Ces niveaux de contamination dépassent largement les seuils d'acceptabilité pour l'usage résidentiel et agricole, imposant des mesures de restriction d'usage et de surveillance sanitaire renforcée des populations exposées

Tableau 9 : Comparaison entre les sols de Bamba-Kilenda et ses environs, le bassin versant de Noun et la moyenne des sols mondiaux [35,36].

ETMs	Analyse	ÉCHANTILLON								Bassin versant de Noun	Moyenne mondiale	Fourchette normale dans les sols	Unités
		KBG 003	KBG0 03a	Boya 001a	KKG0 03	MSG 001	NTG 001	KBB 001	KGD001				
Cu	Sol	125	87	72	77	55	71	51	77	34	25	2-250	mg/kg
Pb	Sol	31	42	41	42	33	25	43	36	18	17	2-300	mg/kg
Zn	Sol	30	32	29	29	25	30	35	26	90	70	3-500	mg/kg
Ba	Sol	199	199	168	181	295	158	400	185	188	500	90-300	mg/kg
Sb	Sol	-	-	-	-	61	51	43	61	/	/	/	mg/kg
Cd	Sol	34	38	-	25	29	23	40	-	0,05	0,3	0,01-2	mg/kg
Zr	Sol	87	209	229	185	67	78	378	31	/	/	/	mg/kg
Fe	Sol	18.800	11.100	12.300	2.234	4.317	6.795	2.965	4.365	91.886	50.000	10.000-100.000	mg/kg
Sn	Sol	55	51	63	59	49	64	73	44	/	0,2-6,8	0,2-6,8	mg/kg
Pd	Sol	16	19	17	18	19	18	17	17	/	/	/	mg/kg
Rb	Sol	11	11	40	-	11	19	11	15	/	0,5-70	0,5-70	mg/kg
As	Sol	9	11	10	-	10	11	9	11	1	5	0,1-40	mg/kg
Sr	Sol	11	9	8	10	9	11	9	8	92	240	50-120	mg/kg

Légende : (-) = Non détecté ; (/) = Données non disponibles ; **Jaune** : Concentrations élevées par rapport aux références ; **Rose** : Concentrations critiques (Cadmium) ; **Bleu** : Moyennes mondiales ; **Rouge** : Fourchettes normales ; Toutes les concentrations sont exprimées en mg/kg.

4. DISCUSSION

L'évaluation de la pollution par les ETM et l'identification des sources de contamination reposent sur des principes de mesure des paramètres physiques, des concentrations, de calcul d'indices et de leur comparaison avec les normes établies. Les méthodes d'évaluation visent généralement à s'affranchir du bruit de fond naturel [28].

Paramètres physicochimiques et mobilité des métaux

Les analyses des paramètres descriptifs (pH et température) montrent que la température des différents sites obéit aux normes saisonnières (25°C), avec une valeur maximale de 28°C. Le pH varie du milieu acide pour les échantillons de sols au milieu quasi hyper-acide pour les échantillons de sédiments. Cette acidification des sols influence la mobilité de la plupart des ETM [29], car plus le pH diminue, plus la solubilité augmente [30], influençant ainsi la dynamique des équilibres chimiques des ETM [31]. Il s'observe donc un transfert de ces métaux de la surface vers les horizons profonds du sol.

Distribution et sources des éléments traces métalliques

Pour les ETM, nous constatons que les sols en place présentent des teneurs en baryum, zirconium et cuivre plus élevées (Figure 4). Cela s'explique par la résistance à l'altération des composés de Ba, Zr et Cu, même dans les conditions du climat tropical. En se basant sur la classification de Müller [32,33], les calculs des indices de géoaccumulation sur les concentrations moyennes des ETM dans les sédiments des 6 stations indiquent que le cuivre est l'élément le plus polluant de la région, tandis que le plomb va de non polluant à modérément polluant et le zinc est non polluant. Notons qu'une seule station est fortement impactée par les activités anthropiques, dominée par le cuivre : la station KBG002 (Tableau 6), alors que 5 autres stations sont susceptibles d'être modérément polluées (MBK002, MBK006, MBK009, LSK002, BBG001a). En général, les métaux à l'origine de la pollution sont le cuivre et le plomb, considérés toxiques [7], et dans une moindre mesure, le zinc.

Gradient de dispersion géochimique

Les histogrammes de la Figure 6 montrent une variation des teneurs selon le sens d'écoulement des différentes rivières, prouvant qu'il existe une variation considérable des teneurs en ETM. Plus nous nous rapprochons du gisement, plus la

teneur augmente ; inversement, plus nous nous en éloignons, plus la teneur en ETM diminue. Des teneurs élevées en Cu, Pb, Ba et Zr varient considérablement suivant le sens de l'écoulement.

Comparaison régionale et identification des sources

L'usage prédominant du sol et les sources potentielles de métaux (routes, zones agricoles) nous ont poussés à comparer les résultats avec d'autres études (Tableau 8). Pour certains éléments traces (Zn, Ba, Fe, Sr), les concentrations sont égales ou inférieures au fond géochimique. Par exemple, le fer (5944 mg/kg) est huit fois inférieur à la valeur mondiale moyenne (50000 mg/kg), et le strontium (5,47 mg/kg) est quarante-trois fois plus faible que la valeur mondiale (240 mg/kg) [34].

Le Tableau 9 compare les teneurs en ETM des sols de Bamba-Kilenda avec celles du bassin versant de la Noun (Cameroun) et la moyenne mondiale [35,36]. Tenant compte des valeurs moyennes, les sols de Bamba-Kilenda présentent une pollution plus évoluée que ceux du bassin de la Noun. Cependant, les valeurs en ETM supérieures à la moyenne mondiale (Cu, Pb, Cd, As) ne signifient pas nécessairement une contamination anthropique. Dans ce contexte, tous les éléments présentant des valeurs supérieures à la moyenne mondiale sont en fait dans les limites normales et inférieures aux seuils acceptables [35,36]. Dans l'ensemble, **une origine géogénique** pour les éléments traces métalliques dans les sols et sédiments de Bamba-Kilenda est beaucoup plus plausible qu'une origine **anthropogène**.

Relations inter-élémentaires et comportement géochimique

Le Tableau 7 présente les corrélations entre ETM selon leur variabilité. Environ 90% des rapports élémentaires présentent des corrélations positives (Ba/Pd, Sn/Pd, As/Zr, Rb/Sr), tandis que 10% présentent des corrélations négatives (Cu/Cd, Zr/Sb, Cd/Pb, Fe/Sb). L'ensemble de ces corrélations met en évidence un comportement commun et/ou une origine commune de ces métaux, renforçant l'hypothèse d'une source principalement géogénique liée au gisement polymétallique.

5. CONCLUSION

Cette étude portant sur la caractérisation géo-environnementale, la distribution et le comportement des ETM dans les eaux, sédiments et sols des environs du gisement de Cu-Pb-Zn de Bamba-Kilenda a nécessité des investigations de terrain où 29 échantillons ont été prélevés et analysés au laboratoire. Les analyses physicochimiques ont montré que la température des échantillons obéit aux normes saisonnières (25°C), tandis que le pH caractérise un milieu acide (sols) à hyper-acide (sédiments), indiquant la possibilité de mobilité et de transfert des ETM. L'analyse de corrélation révèle que 90% des éléments traces métalliques présentent des corrélations positives (Ba/Pd, Sn/Pd, Cu/Pb, Zn/Cu, Pb/Zn, Zr/Sr, Fe/Zn, Fe/Sr, Sn/Pd) et 10% présentent des anticorrélations (Cu/Cd, Zr/Sb, Cd/Pb, Sn/Sb).

Les teneurs moyennes en Cu (71,21 mg/kg), Pb (29,5 mg/kg), Cd (16,32 mg/kg) et As (48,5 mg/kg) sont supérieures à la norme de l'OMS, traduisant l'évidence de la contamination des ETM dans les sols et sédiments de la région. La comparaison avec les sols du bassin de la Noun (Cameroun) et la moyenne mondiale souligne que les sols de Bamba-Kilenda présentent une pollution plus évoluée, avec des teneurs de Cu, Cd, As et Pb largement supérieures. Les variations de concentrations entre échantillons sont liées aux types de roches sous-jacentes et au relief régional. Concernant les indices de pollution, l'indice de géoaccumulation identifie une station (KBG002) comme fortement polluée par les activités anthropiques (dominée par le cuivre), et cinq autres stations (MBK005, MBK006, MBK009, LSK002, BBG001a) comme modérément polluées. Les éléments très toxiques (arsenic et cadmium) présentent de très fortes concentrations par rapport aux valeurs normales.

Le fond pédogéochimique évalué à partir du toit de la roche mère altérée et des sédiments géologiques du gisement de Bamba-Kilenda laisse présager une influence d'origine géogénique plutôt qu'anthropogénique. Cette étude de ligne de base géochimique doit être étendue sur une surface plus large et inclure, outre les eaux, sédiments et sols, des matrices du biota. Elle devrait s'intéresser à la spéciation des ETM pour mieux comprendre leur devenir et mobilité dans les différents écosystèmes, ainsi qu'aux techniques de remédiation appropriées aux conditions des écosystèmes pollués. La consommation d'eaux non traitées et l'utilisation de sols contaminés pour l'agriculture présentent des risques sanitaires significatifs pour les populations locales, étant donné que le cadmium, l'arsenic, le plomb et le cuivre sont des métaux très toxiques une fois dans l'organisme humain. Des mesures de gestion environnementale et de surveillance continue sont recommandées pour protéger la santé publique et l'intégrité des écosystèmes dans cette région minière.

5. RÉFÉRENCES

1. Doelsch E. Éléments traces Métalliques : Inventaire pour l'Ile de la réunion (Sols, déchets et Végétaux). 2004:2-11.
2. Robert. Le sol: interface dans l'environnement ressource pour le développement. Paris: Masson; 1996. 244 p.
3. ISO. Soil quality - Inhibition of reproduction of *Collembola* (*Folsomia candida*) by soil pollutants - ISO11267. Genève: Inter. Stand. Org. Ed.; 1998. 16 p.
4. Crouau Y, Chenon P, Gisclard C. The use of *Folsomia candida* (*Collembola*, *Isotomidae*) for the bioassay of xenobiotic substances and soil pollutants. *Appl Soil Ecol*. 1999;12:103-11.

5. Cole LJ, McCracken DI, Foster GN, Aitken MN. Using Collembola to assess the risks of applying metal-rich sewage sludge to agricultural land in western Scotland. *Agric Ecosyst Environ*. 2001;83:177-89.
6. Migliorini M, Pigino G, Caruso T, Fanciulli PP, Leonzio C, Bernini F. Soil communities (Acari Oribatida; Hexapoda Collembola) in a clay pigeon shooting range. *Pedobiologia*. 2005;49:1-13.
7. Miquel G. Effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologies; 2001.
8. Audry S, Grosbois C, Bril H, Schäfer J, Kierczak J, Blanc G. Post-depositional redistribution of trace metals in reservoir sediments of a mining/smelting-impacted watershed (the lot river, sw france). *Appl Geochem*. 2010;25(6):778-94.
9. Lemaire B, Lauzent M, Khac V, Varrault G, Seidl M, Vinçon-Leite B. Effet de la matière organique produite dans les bassins de rétention des eaux pluviales sur la spéciation les éléments traces métalliques. *La Houille Blanche*. 2015;101(3):37-43.
10. Ogbuagu D, Samuel C. Accumulation and recovery capacity of heavy metals in sand mine ponds of the otamiri river in owerri, nigeria. *Ambiente E Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 2014;9(1).
11. Konan K, Kouamé K, Konan F, Boussou K, Kouakou K. 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 Int Assoc Hydrol Sci*. 2021;384:85-92.
12. Aminiyan M, Aminiyan F, Mousavi S, Heydariyan A. Heavy metal pollution affected by human activities and different land-use in urban topsoil: a case study in rafsanjan city, kerman province, iran. *Eurasian J Soil Sci*. 2016;5(2):97.
13. K J, Swana W, M J. Evaluation des teneurs en éléments traces métalliques (cadmium et plomb) dans l'eau, les sédiments et deux espèces de poissons clarias gariepinus (burchell, 1822) et oreochromis niloticus (linné, 1758) dans le pool malebo (fleuve congo), RD Congo. *European Scientific Journal Esj*. 2021;17(25).
14. Reinero F, Milazzo C, Minervino M, Marchio C, Filice M, Bevacqua L, et al. Parasitic load, hematological parameters, and trace elements accumulation in the lesser spotted dogfish scyliorhinus canicula from the central tyrrhenian sea. *Biology*. 2022;11(5):663.
15. Bhutta ZA, Black RE, Brown KH, Meeks Gardner J, Gore S, Hidayat A, et al. Prévention de la diarrhée et de la pneumonie par supplémentation en zinc chez les enfants de pays en développement : analyse groupée d'essais contrôlés randomisés. *J Pediatr*. 1999;135(6):689-97.
16. Benito V, Devesa V, Munoz O, Suner MA, Montoro R, Baos R, et al. Éléments à l'état de traces dans le sang prélevé sur des oiseaux se nourrissant dans les environs du parc national de Donana, touchés par le déversement toxique de la mine Aznalcollar. *Sci Total Environ*. 1999;242(1-3):309-23.
17. Anonyme. Contamination des sols par les éléments traces : le risque et leur gestion. Rapport de l'académie des sciences TEC, Paris, France; 1998.
18. Anonyme. Les métaux lourds, feuillet d'information sur les contaminations dans les territoires du Nord-Ouest. Division des contaminants, Québec, Canada; 2008.
19. Ministère Provincial en charge des Mines/Kongo Central. Monographie sur les possibilités de mise en valeur des ressources du sous-sol classées « ressources minières » dans la province du kongo central. 2016;5,7,21-3.
20. Bamoco. Rapport et observations de boulanger, Brandes R, Elquine, Hanzir, Lepersonne, Hugé. 1947-1958.
21. Cahen L. La stratigraphie et la tectonique du super groupe Ouest- Congolien dans la zone médiane et externe de l'orogénèse ouest Congolienne (Panafricain) au Bas-Zaïre et dans les régions voisines. *Ann MRAC Tervuren Belgique*. 1978;83:73-124.
22. Cibambula CME. Le sous-groupe de la Mpioka : Un flysh la chaine panafricaine West-Congo dans la province du Kongo central (R.D. Congo) [Thèse]. Kinshasa: Université de Kinshasa, Fac. Sci.; 2016. 185 p.
23. Lesaffer A. Nature and formation processes of the supergene Pb-Zn-Cu-V mineralisation of Bamba Kilenda, Bas-Congo Province, DR Congo. 2014. 5 p.
24. Holmes A. Géochronologie Africaine. 1956. 24 p.
25. Mathieu PL. Étude d'un sondage minéralisé foré à Bamba-Kilenda par le syndicat Bamoco - Rapport inédit. Laboratoire de Géologie Appliquée, Université Libre de Bruxelles; 1951.
26. Ladmira H. Notice explicative de la feuille de Léopoldville au 1/200.000e. Service Géologique, Direction du Service Géologique, ministère de Terres, Mines et Energie, République Démocratique du Congo; 1964.
27. Kabonwa Mvano JM. Métallogénie du gisement cupro-plombo-zincifère de Bamba-Kilenda (Bas-Congo). Unité de Géologie, Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa; 1999. 88 p.
28. Sahli L. Utilisation d'indices pour l'évaluation de la qualité des sédiments : cas du bassin Boumerzoug (Algérie). 2014.
29. Alloway BJ, Ayres DC. Chemical principles of environmental pollution. London: Blackie Academic and professional, an imprint of chapman and Hall; 1997. 394 p.
30. Sumner M. Handbook of Soil Science. CRC Press; 2000. 2148 p.
31. Bur T. Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de Midi-Pyrénées. Implications en termes de limites et de charges critiques. 2008.
32. Müller G. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemical Zeitung*. 1981;105:157-64.
33. Coulibaly AS, Monde S, Wognin VA, Kouamé A. Analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans les baies estuariennes d'Abidjan en Côte d'Ivoire. 2009.
34. Reimann C, de Caritat P. Chemical elements in the Environnement. 1998.
35. Njofang C, Matschullat J, Amougou A, Tchouankoue JP, Heilmeyer H. Soil and plant composition in the Noun river catchment basin, Western Cameroon: a contribution to the development of a biogeochemical baseline. *Environ Geol*. 2008. DOI: 1007/s00254-008-1237-9.
36. Njofang C, Matschullat J, Tchouankoue JP, Amougou A. Contribution to the Geochemistry of trace elements in the sediment of the Noun River and Tributaries, Western Cameroon. *Pak J Biol Sci*. 2007;10(18):3048-56.



How to cite this article: Clement N'zau Umba-di-Mbudi, Junior Savoureux Lutete Savu, C. Kapinga Ntumba, M.Yindi Likiti, et C. Penge Ongendangenda. CARACTÉRISATION GÉO-ENVIRONNEMENTALE, DISTRIBUTION ET COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES DANS LES EAUX, SÉDIMENTS ET SOLS DES ENVIRONS DU GISEMENT DE Cu-Pb-Zn DE BAMBA-KILENDA (KONGO-CENTRAL, R.D. CONGO). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 3(21): 21-38. doi : 10.5281/zenodo.17279063

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>