Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture
http://www.rafea-congo.com
2026 ; 9(2), 19-29
ISSN (Print) : 2708-7743 **eISSN** : 2708-5422 **Dépôt légal** : JL 3.01807-57259

Contamination métallique et dégradation physicochimique des effluents d'une carrière de grès déversés dans la rivière Lukaya (République Démocratique du Congo) : implications environnementales et sanitaires

Dirk Akili Bihivu[1*], Gurvitch Nsiala Oyangala[1,2], Max Seke Vangu[2,4], Rachidi Opuluku[1], Dieudonné Musibono Eyulanki[1], Emmanuel Biey Makali[1], Réné Gizanga Valu[1]

[(1)]Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Sciences et Gestion de l'Environnement. BP 190 Kinshasa XI (RDC)/ E-mail : dirkjoseph70@gmail.com
[(2)]Ministère de l'Enseignement Supérieur, Universitaire, Recherche Scientifique et Innovations. Centre d'Excellence CBRN Kinshasa (RDC)
[(3)]Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention de Physique. Laboratoire des Matériaux. BP 190 Kinshasa XI (RDC)
[(4)]Ministère de l'Enseignement Supérieur, Universitaire, Recherche Scientifique et Innovations. Centre de recherche Géologique et minière (CRGM). BP 898 Kinshasa1 (RDC).

DOI : https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v9i2.3

RESUME

Description du sujet. Les activités d'exploitation des carrières constituent une source importante de contamination des eaux de surface par les matières en suspension, les métaux traces et les nutriments. Dans la province du Kongo Central (République Démocratique du Congo), les effluents d'une carrière de grès de Kasangulu sont déversés dans la rivière Lukaya, utilisée quotidiennement par les populations riveraines.
Objectifs. L'objectif de cette étude est d'évaluer la contamination métallique et la dégradation physicochimique des effluents issus d'une carrière de grès rejetés dans la rivière Lukaya. Elle vise aussi à déterminer l'impact de ces rejets sur la qualité de l'eau et sur l'équilibre écologique du milieu récepteur afin d'apprécier les risques environnementaux et sanitaires pour les populations exposées.
Méthodes. Cinq échantillons d'effluents (EF1–EF5) ont été analysés au Laboratoire de Physique des Sols et d'Hydrologie du CGEA/CREN-K. Les paramètres physicochimiques, les métaux traces et les nutriments ont été déterminés par oxymétrie, spectrophotométrie UV-Visible et fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF). Les relations entre les variables ont été explorées à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman.
Résultats. Les effluents présentent de faibles teneurs en oxygène dissous (1,11–1,49 mg L^{-1}) et des valeurs élevées de DCO (50,3–64,5 mg O_2 L^{-1}) et de DBO_5 (31,9–43,4 mg O_2 L^{-1}). Les concentrations en Pb (0,69–1,19 mg L^{-1}), Cd (0,46–0,98 mg L^{-1}) et Ni (0,11–0,20 mg L^{-1}) dépassent les recommandations de l'OMS, tandis que les nitrates (198–292 mg L^{-1}) et les phosphates (1,08–4,01 mg L^{-1}) indiquent un enrichissement marqué en nutriments. Les corrélations de Spearman révèlent une association négative parfaite entre l'oxygène dissous, la DCO et la DBO_5 ($\rho = -1,00$), ainsi qu'une forte association entre les matières en suspension, l'aluminium et le plomb ($\rho = 1,00$), suggérant un transport préférentiel de ces métaux par la phase particulaire.
Conclusion. Les effluents de la carrière contribuent à la dégradation de la qualité des eaux de la rivière Lukaya et représentent une source potentielle de risques écologiques et sanitaires, justifiant un renforcement du traitement des effluents et du suivi environnemental.

Mots-clés : Carrière de grès, effluents miniers, métaux traces, corrélation de Spearman, rivière Lukaya/RDC

ABSTRACT

Metal contamination and physicochemical degradation of effluents from a sandstone quarry discharged into the Lukaya River (Democratic Republic of Congo): environmental and health implications
Description of the subject. Quarrying activities are a major source of surface water contamination through suspended solids, trace metals, and nutrients. In the Kongo Central province (Democratic Republic of Congo), the effluents from a sandstone quarry in Kasangulu are discharged into the Lukaya River, which is used daily by the local communities.
Objective. The objective of this study is to assess metal contamination and the physicochemical degradation of wastewater from a sandstone quarry being discharged into the Lukaya River. It also aims to determine the impact

of these discharges on water quality and the ecological balance of the receiving environment to understand the environmental and health risks for the affected populations.
Methods. Five effluent samples (EF1–EF5) were analyzed at the Soil Physics and Hydrology Laboratory of CGEA/CREN-K. The physicochemical parameters, trace metals, and nutrients were determined using oxymetry, UV-Visible spectrophotometry, and energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF). The relationships between the variables were explored using Spearman's correlation coefficient.
Results. The effluents show low levels of dissolved oxygen (1.11–1.49 mg L^{-1}) and high values of COD (50.3–64.5 mg O_2 L^{-1}) and BOD_5 (31.9–43.4 mg O_2 L^{-1}). Concentrations of Pb (0.69–1.19 mg L^{-1}), Cd (0.46–0.98 mg L^{-1}), and Ni (0.11–0.20 mg L^{-1}) exceed WHO recommendations, while nitrates (198–292 mg L^{-1}) and phosphates (1.08–4.01 mg L^{-1}) indicate significant nutrient enrichment. Spearman correlations show a perfect negative association between dissolved oxygen, COD, and BOD_5 ($\rho = -1.00$), as well as a strong association between suspended solids, aluminum, and lead ($\rho = 1.00$), suggesting a preferential transport of these metals through the particulate phase.
Conclusion. The quarry's wastewater contributes to the deterioration of the Lukaya River's water quality and represents a potential source of ecological and health risks, justifying stronger wastewater treatment and environmental monitoring.

Keywords: Sandstone quarry, mining effluents, trace metals, Spearman correlation, Lukaya River/DRC

1. INTRODUCTION

Les ressources en eau douce sont soumises à une pression croissante résultant de l'expansion démographique, de l'urbanisation rapide et de l'intensification des activités industrielles et extractives. Parmi les sources émergentes de dégradation des écosystèmes aquatiques, les activités minières et les carrières constituent des facteurs majeurs de pollution en raison des importantes quantités de matières en suspension, de métaux potentiellement toxiques et de substances chimiques qu'elles génèrent et rejettent dans l'environnement (Cui *et al.*, 2021 ; Tarigan *et al.*, 2025). Les effluents issus des opérations de forage, de dynamitage, de concassage et de lavage des matériaux peuvent modifier profondément les propriétés physicochimiques des eaux de surface, affecter la biodiversité aquatique et compromettre les usages domestiques des ressources hydriques.

Les particules minérales produites lors de l'exploitation des carrières jouent un rôle important dans le transport des contaminants métalliques. En raison de leur grande surface spécifique, ces particules favorisent les phénomènes d'adsorption et de co-sorption des métaux lourds, augmentant ainsi leur mobilité, leur persistance et leur biodisponibilité dans les milieux aquatiques (Yan *et al.*, 2022). Une fois introduits dans les cours d'eau, ces contaminants peuvent s'accumuler dans les sédiments, être assimilés par les organismes aquatiques et se transférer progressivement le long des réseaux trophiques, générant des risques écotoxicologiques et sanitaires considérables (Costa *et al.*, 2020 ; Sharma *et al.*, 2024). De plus, les fortes charges en matières en suspension réduisent la pénétration de la lumière, perturbent la photosynthèse et altèrent les équilibres biogéochimiques des écosystèmes aquatiques (Bastianini *et al.*, 2024).

En Afrique subsaharienne, où les infrastructures de traitement des effluents industriels restent souvent insuffisantes, les cours d'eau récepteurs sont fréquemment utilisés par les populations riveraines pour les besoins domestiques, l'agriculture et la pêche. Cette situation accroît l'exposition des populations aux contaminants chimiques et renforce les risques de santé publique (Boadi *et al.*, 2020 ; Norvivor *et al.*, 2024). En République Démocratique du Congo (RDC), plusieurs travaux récents ont mis en évidence une contamination importante des eaux de surface par les métaux lourds dans les zones minières, notamment dans les bassins des rivières Mura, Kimpulande, Tshikapa et Kasaï (Banze-wa-Mutombo *et al.*, 2022 ; Atibu *et al.*, 2023 ; CRREBaC, 2021). Ces études soulignent que les activités extractives constituent aujourd'hui une source majeure de dégradation des ressources hydriques et des écosystèmes aquatiques congolais.

La province du Kongo Central connaît depuis plusieurs années une intensification de l'exploitation des matériaux de construction, notamment des carrières de grès destinées à répondre aux besoins croissants du secteur des infrastructures. À Kasangulu, les opérations de tir de mines, de concassage et de lavage des granulats génèrent des effluents qui sont directement déversés dans les cours d'eau environnants, en particulier dans la rivière Lukaya. Les observations réalisées sur le terrain indiquent que ces rejets s'accompagnent d'une coloration jaunâtre de l'eau et d'un dépôt important de poussières minérales à la surface du cours d'eau, particulièrement pendant les phases intensives d'exploitation. Or, cette rivière constitue une ressource essentielle pour les populations locales qui l'utilisent quotidiennement pour la lessive, la vaisselle, le bain et d'autres activités ménagères, ce qui soulève d'importantes préoccupations environnementales et sanitaires.

Malgré l'essor des activités extractives dans cette région, les informations scientifiques relatives à la qualité des effluents de carrière et à leurs impacts sur les eaux de surface demeurent très limitées en RDC. Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer les caractéristiques physicochimiques, la contamination métallique et l'enrichissement en nutriments des effluents issus d'une carrière de grès de Kasangulu, ainsi qu'à discuter les risques environnementaux et sanitaires associés aux rejets dans la rivière Lukaya.

Les résultats obtenus contribueront à améliorer les connaissances sur les impacts des carrières de matériaux de construction sur les ressources en eau et fourniront des éléments scientifiques utiles à la gestion durable des écosystèmes aquatiques dans la province du Kongo central (République Démocratique du Congo).

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

Cette étude a été menée au sein d'une carrière de grès située à Kasangulu, dans la province du Kongo Central (République Démocratique du Congo). Ce site fait l'objet d'une exploitation industrielle intensive comprenant des opérations de forage, d'abattage à l'explosif (tir de mines), de concassage et de lavage des granulats. Les effluents générés par ces processus anthropiques sont déversés dans le réseau hydrographique local, impactant directement la rivière Lukaya. Ce cours d'eau constitue une ressource hydrique stratégique pour les populations riveraines, qui l'utilisent pour divers usages domestiques et sanitaires. Les observations de terrain ont mis en évidence un impact environnemental visuel direct lors des phases de dynamitage et de broyage, caractérisé par une augmentation de la turbidité (coloration jaunâtre des eaux) et un dépôt sédimentaire de poussières minérales à la surface de la nappe d'eau. La localisation géographique du site industriel et des stations d'échantillonnage est illustrée à la Figure 1.

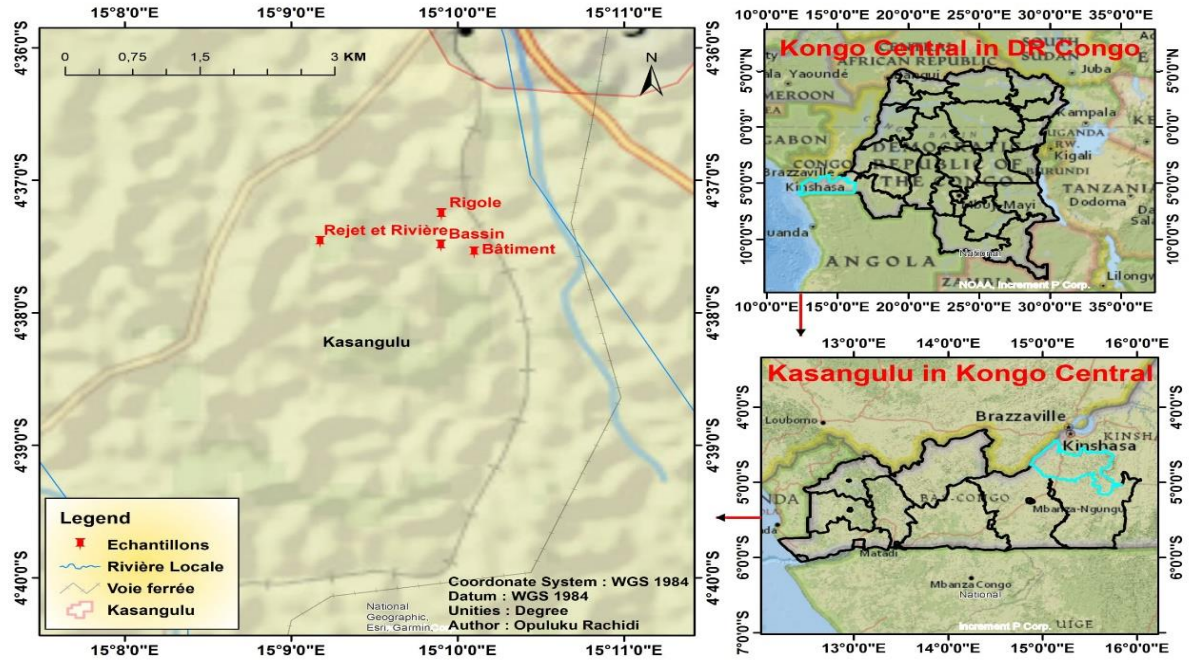

Figure 1. Localisation géographique de la carrière de grès de Kasangulu et des stations d'échantillonnage des effluents

2.2. Méthodes

Collecte et conservation des échantillons

Cinq échantillons d'eau composite (EF1 à EF5 ; Tableau 1) ont été prélevés au niveau des points de décharge des effluents de la carrière, conformément aux directives internationales relatives à l'échantillonnage et à la conservation des matrices aqueuses environnementales (ISO 5667-3:2018 ; APHA, 2022). Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en polyéthylène de haute densité (PEHD) préalablement conditionnés (lavage à l'acide nitrique dilué, suivi de rinçages répétés à l'eau ultrapure) afin de prévenir tout risque de contamination croisée, selon le protocole opératoire décrit par Nsiala *et al.* (2025) (Figure 2). Immédiatement après collecte, les échantillons ont été stabilisés à l'obscurité sous chaîne du froid (≈ 4 °C) dans une glacière isotherme, puis

acheminés le jour même au Laboratoire de Physique des Sols et d'Hydrologie du Commissariat Général à l'Énergie Atomique/Centre Régional d'Études Nucléaires de Kinshasa (CGEA/CREN-K) pour caractérisation analytique.

Tableau 1. Codification et nature des échantillons d'effluents analysés

Code échantillon	Code laboratoire	Nature
EF1	EW11626	Effluent industriel / Eau
EF2	EW12626	Effluent industriel / Eau
EF3	EW13626	Effluent industriel / Eau
EF4	EW14626	Effluent industriel / Eau
EF5	EW15626	Effluent industriel / Eau

1

Figure 2. Prélèvement des échantillons d'eau dans les effluents de la carrière de grès de Kasangulu

Analyses physicochimiques

Les indices de pollution globale : oxygène dissous (OD), demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO_5), demande chimique en oxygène (DCO) et matières en suspension (MES) ont été déterminés selon les protocoles standardisés du *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2022).

Oxygène dissous (OD)

La concentration en OD a été mesurée *in situ* au moyen d'un oxymètre numérique portatif ProODO YSI (Yellow Springs Instruments, USA). L'appareil est doté d'une sonde optique à luminescence, sélectionnée pour sa haute stabilité analytique et sa précision dans les matrices à forte charge particulaire.

Demande biologique en oxygène (DBO_5)

La DBO_5 a été quantifiée après une période d'incubation des échantillons de cinq jours à 20 ± 1 °C à l'obscurité, conformément aux recommandations de l'APHA (2022). La charge biodégradable a été calculée selon l'Équation (1) :

$$DBO_5 = C_0 - C_5$$

où C_0 représente la concentration initiale en oxygène dissous (mg L^{-1}) et C_5 la concentration résiduelle mesurée après 5 jours d'incubation.

Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO a été déterminée par micro-méthode colorimétrique après digestion thermique au dichromate de potassium en milieu acide (thermoréacteur Fischer Bioblock). La lecture de l'absorbance a été effectuée sur un spectrophotomètre UV-Visible HACH DR/2400 (HACH Company, USA), selon les procédures d'analyse standard du fabricant.

Analyses chimiques

Détermination des éléments traces métalliques et des phosphates par ED-XRF

Les concentrations en aluminium (Al), nickel (Ni), zinc (Zn), cadmium (Cd), plomb (Pb) et orthophosphates (PO_4^{3-}) ont été quantifiées par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) à l'aide d'un système XEPOS III (SPECTRO Analytical Instruments, Allemagne). Cette technique multiélémentaire non destructive est largement validée pour l'analyse directe des matrices environnementales (Jenkins, 1999 ; Potts & West, 2008). La quantification a été réalisée par étalonnage externe à partir de standards synthétiques certifiés préparés au laboratoire. Les effets de matrice ont été corrigés par normalisation des intensités via les pics de diffusion cohérente et

incohérente. Les incertitudes analytiques sont exprimées avec un intervalle de confiance de 95 %.

Détermination des nutriments et des matières en suspension (MES)

Les concentrations en ions ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-) ainsi que la teneur en MES ont été déterminées par spectrophotométrie d'absorption moléculaire (spectrophotomètre HACH DR/2400) en appliquant les méthodes colorimétriques spécifiques du *HACH Water Analysis Handbook* (2015). Le principe de quantification repose sur la loi de Beer-Lambert :

$$A = (I_0/I)$$

où A représente l'absorbance, I_0 l'intensité lumineuse incidente et I l'intensité transmise. Les mesures ont été opérées aux longueurs d'onde caractéristiques de chaque complexe coloré, et les concentrations finales ont été exprimées en mg L^{-1}.

Assurance qualité, traitement statistique et approche de modélisation

Afin de garantir la fiabilité, la précision et la reproductibilité des résultats, l'ensemble des analyses physicochimiques a été réalisé en triplicat indépendant pour chaque échantillon. Des blancs analytiques, des solutions étalons certifiées ainsi que des procédures systématiques d'étalonnage ont été appliqués avant chaque série de mesures afin de contrôler les performances instrumentales et de limiter toute dérive analytique. Les résultats sont exprimés sous forme de moyennes accompagnées de leur écart-type.

Les relations entre variables ont été explorées à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman (ρ), calculé à l'aide du logiciel XLSTAT (Addinsoft, version 2020 ; New York, États-Unis). Une approche de modélisation prédictive basée sur des régressions multivariées a ensuite été mise en œuvre sous le logiciel R afin de tester la structure fonctionnelle des gradients spatiaux de contamination. La performance des modèles a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination (R^2) et de l'analyse des résidus. Les analyses statistiques ont été réalisées avec un seuil de significativité fixé à $\alpha = 0,05$.

3. RESULTATS

3.1. Caractéristiques physicochimiques des échantillons d'eau

Les paramètres physicochimiques mesurés le long du gradient amont–aval (EF1–EF5) sont présentés dans le Tableau 2. Les concentrations en oxygène dissous (OD) demeurent faibles et relativement homogènes sur l'ensemble des stations, variant de 1,11 ± 0,03 à 1,49 ± 0,04 mg L^{-1}, ce qui traduit un état d'hypoxie persistante largement inférieur aux niveaux généralement requis pour le maintien d'un bon état écologique des milieux aquatiques.

La demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO_5) présentent une évolution spatiale comparable, caractérisée par une diminution progressive vers l'aval. Les concentrations de DCO passent de 64,52 ± 0,75 mg O_2 L^{-1} à EF1 à 50,32 ± 1,57 mg O_2 L^{-1} à EF5, malgré une légère remontée observée à EF3 (61,06 ± 0,97 mg O_2 L^{-1}). De manière similaire, la DBO_5 atteint sa valeur maximale à EF1 (43,44 ± 0,50 mg O_2 L^{-1}) puis décroît jusqu'à 31,93 ± 0,78 mg O_2 L^{-1} à EF5. Les matières en suspension (MES) suivent également cette tendance, leurs concentrations diminuant progressivement de 98,43 ± 0,54 mg L^{-1} en amont à 76,58 ± 0,56 mg L^{-1} en aval, suggérant une réduction graduelle de la charge particulaire au cours du transit hydrologique.

Tableau 2. Caractéristiques physicochimiques des échantillons d'eau (moyenne ± écart-type)

Paramètre	**EF1**	**EF2**	**EF3**	**EF4**	**EF5**	**Valeur guide OMS**
Oxygène dissous (mg L^{-1})	1,11±0,03	1,29±0,04	1,22±0,03	1,36±0,02	1,49±0,04	—
DCO (mg O2 L^{-1})	64,52±0,75	58,49±0,57	61,06±0,97	55,46±0,57	50,32±1,57	10
DBO5 (mg O2 L^{-1})	43,44±0,50	38,99±0,05	40,95±0,22	37,02±0,12	31,93±0,78	6–10
MES (mg L^{-1})	98,43±0,54	89,08±0,33	82,74±0,67	80,39±1,03	76,58±0,56	100

Légende : DCO (Demande chimique d'oxygène), DB05 (Demande biologique en oxygéné en cinq jours), MES (Matière en suspension), EF (Facteur d'enrichissement)

L'analyse des résidus (Figure 1) montre que les différences entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites restent limitées, avec des écarts (Δ) compris entre 0,4 et 0,9 mg L^{-1}, témoignant d'une faible erreur de prédiction et d'une bonne adéquation du modèle aux données expérimentales. Cette forte concordance statistique suggère une interdépendance étroite entre la DCO, la DBO_5 et les MES, compatible avec l'influence d'une source dominante de pollution organique. La dégradation de cette matière organique s'accompagne vraisemblablement

d'une consommation importante de l'oxygène dissous, expliquant le maintien de conditions hypoxiques tout au long du gradient étudié. L'ensemble de ces résultats met en évidence une dégradation significative de la qualité de l'eau sous l'effet des apports anthropiques, malgré une légère atténuation des charges polluantes observée vers l'aval.

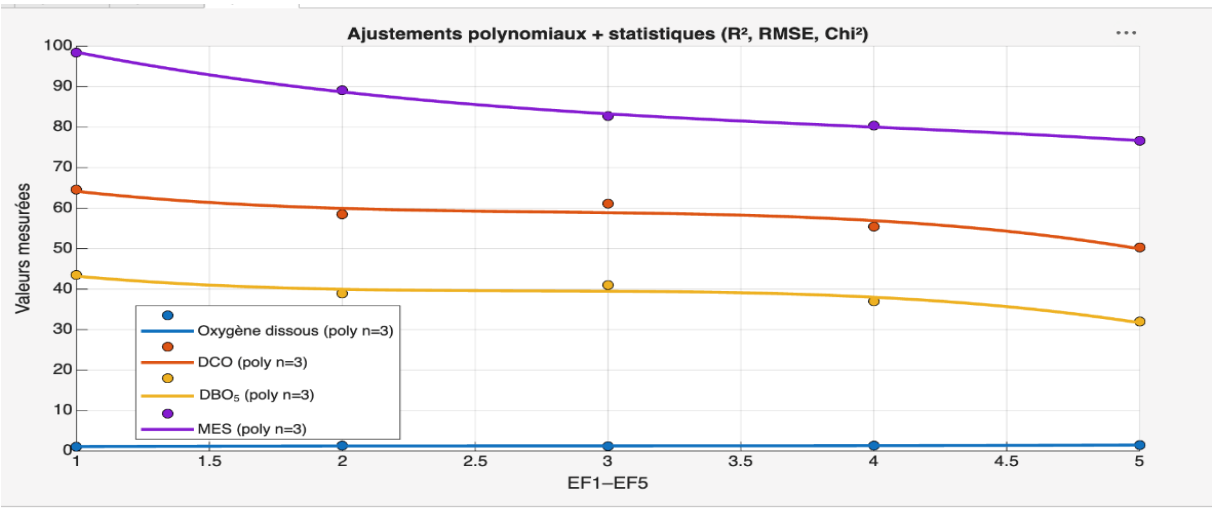

Figure 3. Modélisation de la distribution spatiale des paramètres physicochimiques et performance des régressions multivariées le long du gradient amont–aval (EF1–EF5).

3.2. Concentration et distribution spatiale de la contamination métallique

Les concentrations des métaux dissous mesurées le long du gradient amont–aval sont présentées dans le Tableau 3. Parmi les éléments analysés, l'aluminium (Al) et le plomb (Pb) présentent une décroissance régulière des concentrations depuis la station EF1 vers EF5. Les teneurs maximales sont observées à EF1, atteignant 0,71 ± 0,02 mg L^{-1} pour l'Al et 1,19 ± 0,04 mg L^{-1} pour le Pb, puis diminuent progressivement jusqu'à la station terminale. Les concentrations en Pb dépassent largement la valeur guide recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 0,01 mg L^{-1}) sur l'ensemble des stations, tandis que celles de l'Al excèdent également la valeur de référence (0,20 mg L^{-1}) à l'exception de la station EF5. Ces résultats traduisent une contamination métallique importante tout au long du cours d'eau.

En revanche, le nickel (Ni), le zinc (Zn) et le cadmium (Cd) présentent une distribution spatiale plus hétérogène. Les concentrations en Ni varient entre 0,11 ± 0,01 mg L^{-1} à EF3 et 0,21 ± 0,03 mg L^{-1} à EF4, sans tendance longitudinale clairement définie. Les teneurs en Zn et en Cd diminuent sensiblement à la station EF3 (0,16 ± 0,02 mg L^{-1} et 0,46 ± 0,03 mg L^{-1}, respectivement), avant d'augmenter de nouveau aux stations EF4 et EF5, indiquant une redistribution locale des contaminants dissous.

Tableau 3. Concentrations des métaux lourds dans les échantillons d'eau (moyenne ± écart-type)

Paramètre	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	Valeur guide OMS
Al (mg L^{-1})	0,71±0,02	0,54±0,02	0,34±0,03	0,31±0,02	0,22±0,03	0,20
Ni (mg L^{-1})	0,19±0,02	0,13±0,01	0,11±0,01	0,21±0,03	0,20±0,02	0,02
Zn (mg L^{-1})	0,61±0,02	0,31±0,03	0,16±0,02	0,44±0,03	0,60±0,02	3,00
Cd (mg L^{-1})	0,98±0,06	0,90±0,07	0,46±0,03	0,64±0,03	0,54±0,02	0,00
Pb (mg L^{-1})	1,19±0,04	1,08±0,05	1,01±0,03	0,88±0,04	0,69±0,06	0,01

Légende : EF (Facteur d'enrichissement)

L'analyse des résidus du modèle (Figure 2) met en évidence une singularité marquée au niveau de la station EF3, où les écarts entre les concentrations observées et les valeurs prédites sont les plus importants, notamment pour le plomb ($\Delta = -0,23$ mg L^{-1}). Cette anomalie suggère l'existence de processus locaux susceptibles de modifier la distribution des métaux, tels qu'une dilution par un apport hydrique secondaire, des phénomènes d'adsorption sur les particules en suspension, ou encore des réactions de précipitation contrôlées par les conditions physicochimiques locales. Cette hétérogénéité spatiale souligne la complexité des mécanismes gouvernant le transport et le devenir des contaminants métalliques dans le système étudié.

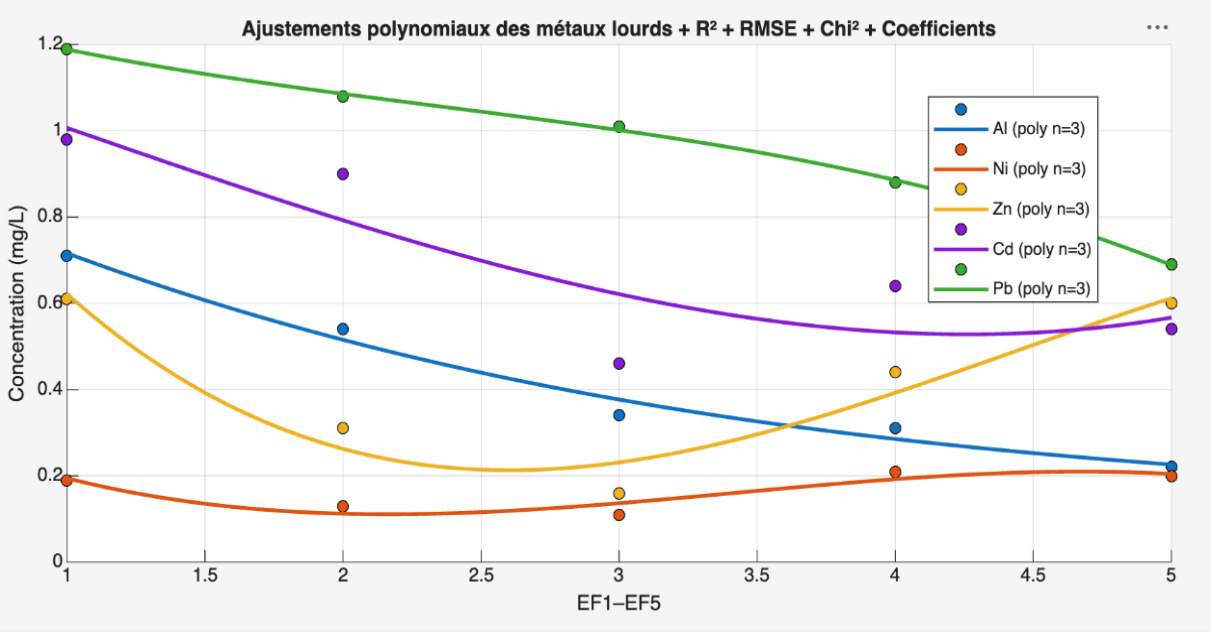

Figure 4. Modélisation de la distribution spatiale des métaux dissous et performance des régressions multivariées le long du gradient amont–aval (EF1–EF5).

3.3. Dynamique spatiale des nutriments et validation des modèles prédictifs

Les concentrations des nutriments mesurées le long du gradient amont–aval sont présentées dans le Tableau 4. Les résultats mettent en évidence une forte charge en composés azotés et phosphorés, traduisant un enrichissement significatif du milieu en nutriments dissous. Les nitrates (NO_3^-) constituent la forme dominante de l'azote inorganique, avec des concentrations élevées et relativement stables entre les stations EF1 et EF4, comprises entre 270,73 ± 1,16 mg L^{-1} et 291,84 ± 5,45 mg L^{-1}. En revanche, une diminution marquée est observée à la station terminale EF5, où la concentration atteint 198,23 ± 1,49 mg L^{-1}, suggérant une atténuation des apports ou des processus de transformation et d'élimination le long du continuum hydrologique.

Les concentrations en ammonium (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^{3-}) présentent globalement une décroissance vers l'aval, indiquant une réduction progressive de la charge nutritive. Toutefois, les phosphates se distinguent par une augmentation ponctuelle à la station EF4 (2,51 ± 0,39 mg L^{-1}), traduisant probablement un apport localisé ou une remise en solution du phosphore liée à des modifications des conditions hydrodynamiques ou physicochimiques.

Tableau 4. Concentrations des nutriments dans les échantillons d'eau (moyenne ± écart-type)

Paramètre	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	Valeur guide OMS
NH_4^+(mg L^{-1})	0,20±0,02	0,13±0,02	0,15±0,02	0,13±0,02	0,11±0,02	0,05
NO_3^- (mg L^{-1})	291,84±5,45	272,99±3,08	280,32±0,68	270,73±1,16	198,23±1,49	50,00
PO_4^{3-} (mg L^{-1})	4,01±0,05	2,89±0,02	1,08±0,04	2,51±0,39	1,09±0,02	3,00

Légende : EF (Facteur d'enrichissement)

L'analyse des résidus révèle des écarts minimes entre les valeurs observées et prédites sur l'ensemble du gradient (Tableau 5). Cette synchronicité spatiale entre nitrates, ammonium et phosphates démontre une origine anthropique commune, associant rejets domestiques, effluents industriels de la carrière et flux diffus de ruissellement. Par sa distribution hautement régulière et ses résidus quasi nuls, le nitrate (NO_3^-) s'impose comme le traceur conservatif idéal de cette pollution nutritive. À l'inverse, les fortes fluctuations résiduelles des phosphates (PO_4^{3-}), singulièrement à la station EF4, trahissent l'impact de processus biogéochimiques locaux. Ces anomalies traduisent l'effet couplé de l'assimilation biologique, des transferts sédimentaires ou de réactions de précipitation-dissolution. Ainsi, si la trajectoire globale des nutriments répond à une logique hydrodynamique commune, la réactivité du phosphore reste gouvernée par des mécanismes de contrôle locaux et spécifiques.

Tableau 5. Valeurs observées, prédites et résidus (Δ) pour l'ammonium, les nitrates et les orthophosphates sur les différentes stations d'étude

Paramètre	EF1 Exp.	EF1 Préd.	Δ	EF2 Exp.	EF2 Préd.	Δ	EF3 Exp.	EF3 Préd.	Δ	EF4 Exp.	EF4 Préd.	Δ	EF5 Exp.	EF5 Préd.	Δ
NH_4^+ (mg L^{-1})	0,20	0,21	+0,01	0,13	0,14	+0,01	0,15	0,15	0,00	0,13	0,14	+0,01	0,11	0,12	+0,01
NO_3^- (mg L^{-1})	291,84	289,10	−2,74	272,99	270,40	−2,59	280,32	277,90	−2,42	270,73	268,10	−2,63	198,23	200,50	+2,27
PO_4^{3-} (mg L^{-1})	4,01	3,95	−0,06	2,89	2,84	−0,05	1,08	1,12	+0,04	2,51	2,47	−0,04	1,09	1,13	+0,04

Légende : *Exp.* = concentration expérimentale mesurée ; *Préd.* = concentration prédite par le modèle de régression ; Δ = Préd. − Exp. (mg L^{-1}). Les faibles valeurs absolues de Δ traduisent une bonne concordance entre les données observées et les valeurs estimées par le modèle, confirmant sa robustesse pour la prédiction de la dynamique spatiale des nutriments.

3.4. Analyse des corrélations inter-paramétriques

L'analyse de la matrice de corrélation de rang de Spearman (Tableau 6 ; $N = 5$) met en évidence des associations étroites entre les paramètres physicochimiques, les métaux traces et les nutriments des effluents de la carrière de grès de Kasangulu.

Il ressort que l'oxygène dissous (OD) est parfaitement et négativement corrélé à la DCO (ρ=−1,00), à la DBO_5 (ρ=−1,00) et aux nitrates (ρ=−1,00), ainsi que fortement corrélé à l'ammonium (ρ=−0,975). Ces associations traduisent une diminution de l'oxygène disponible en présence d'une charge organique et azotée élevée. La DCO et la DBO_5 sont, quant à elles, parfaitement corrélées (ρ=1,00), reflétant une évolution conjointe de la pollution organique.

Les matières en suspension (MES) présentent des corrélations positives très élevées avec l'aluminium (Al) et le plomb (Pb) (ρ=1,00), indiquant que ces métaux sont principalement transportés par la fraction particulaire issue des opérations de dynamitage et de concassage. Le cadmium (Cd) est également associé aux MES (ρ=0,70) et montre une corrélation parfaite avec les orthophosphates (ρ=1,00), suggérant un comportement géochimique similaire. En revanche, le nickel (Ni) et le zinc (Zn) affichent de faibles corrélations avec les MES (ρ=−0,50 et ρ=0,10, respectivement), traduisant un comportement hydrochimique distinct et une mobilité probablement dominée par leur fraction dissoute plutôt que par le transport particulaire.

Tableau 6. Corrélations de rang de Spearman entre les paramètres de qualité de l'eau (O_2 dissous, DBO_5, DCO, MES), les métaux lourds (Al, Ni, Zn, Cd et Pb) et les nutriments (NH_4^+, NO_3^- et PO_4^{3-}) mesurés dans les effluents de la carrière de grès de Kasangulu

Variables	OD	DCO	DBO_5	MES	Al	Ni	Zn	Cd	Pb	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
OD	**1**	**-1,000**	**-1,000**	**-0,900**	**-0,900**	**0,600**	0,000	-0,400	**-0,900**	**-0,975**	**-1,000**	-0,400
DCO		**1**	**1,000**	**0,900**	**0,900**	**-0,600**	0,000	0,400	**0,900**	**0,975**	**1,000**	0,400
DBO_5			**1**	**0,900**	**0,900**	**-0,600**	0,000	0,400	**0,900**	**0,975**	**1,000**	0,400
MES				**1**	**1,000**	**-0,500**	**0,100**	**0,700**	**1,000**	**0,821**	**0,900**	**0,700**
Al					**1**	**-0,500**	**0,100**	**0,700**	**1,000**	**0,821**	**0,900**	**0,700**
Ni						**1**	**0,600**	0,200	**-0,500**	**-0,462**	**-0,600**	0,200
Zn							**1**	**0,600**	**0,100**	0,051	0,000	**0,600**
Cd								**1**	**0,700**	0,359	0,400	**1,000**
Pb									**1**	**0,821**	**0,900**	**0,700**
NH_4^+										**1**	**0,975**	0,359
NO_3^-											**1**	0,400
PO_4^{3-}												**1**

*Les coefficients de corrélation ont été calculés à partir des valeurs logarithmiques des concentrations des paramètres afin de normaliser leur distribution (n = 5). Les coefficients statistiquement significatifs (ρ < 0,05) sont indiqués en gras**

Légende : OD (Oxygène dissous), DCO (Demande chimique d'oxygéne), DBO5 (Demande biologique en oxygène en cinq jours), MES (Matière en suspension)

4. DISCUSSION

4.1. Dégradation de la qualité des effluents et processus d'autoépuration

Les résultats mettent en évidence une altération marquée de la qualité des effluents rejetés par la carrière de grès de Kasangulu dans la rivière Lukaya. Les faibles concentrations en oxygène dissous (1,11 à 1,49 mg L^{-1}), associées à des valeurs élevées de DCO (50,3 à 64,5 mg O_2 L^{-1}) et de DBO_5 (31,9 à 43,4 mg O_2 L^{-1}), traduisent une charge organique et oxydative élevée, susceptible de dépasser les capacités locales d'autoépuration du système fluvial.

Cette lecture est renforcée par la structure des relations inter-variables mise en évidence par la matrice de corrélation de Spearman (Tableau 5), montrant une forte opposition entre l'oxygène dissous et les indicateurs de charge organique et azotée (DCO, DBO_5, NO_3^-). Toutefois, la présence de coefficients extrêmes (ρ proche de ±1) doit être interprétée avec prudence et suggère une structure relationnelle fortement contrainte, possiblement amplifiée par le gradient spatial marqué et le nombre limité de stations.

Les modèles de régression multivariée (R^2 = 0,97 à 0,99 ; Figure 1a) indiquent néanmoins une dépendance fonctionnelle robuste entre charge organique et désoxygénation. Cette relation traduit un contrôle dominant des processus de consommation biologique et chimique de l'oxygène par les apports continus en matière organique et en composés réducteurs.

La diminution progressive des MES, de la DCO et de la DBO_5 de l'amont vers l'aval suggère l'action combinée de la dilution, de la sédimentation et d'une atténuation partielle de la charge polluante. Cependant, la persistance de faibles concentrations en oxygène dissous indique que ces processus restent insuffisants pour restaurer l'équilibre redox du milieu, traduisant un état d'hypoxie chronique.

4.2. Contamination métallique et dynamique de transport

Les effluents analysés présentent une contamination significative en aluminium, plomb, cadmium et nickel, avec des concentrations dépassant les valeurs guides de l'OMS (WHO, 2022). Les analyses statistiques suggèrent une structuration spatiale marquée de ces éléments, en particulier pour Pb, Cd, Al et Zn.

La forte association entre les MES et certains métaux (notamment Pb et Al) indique un contrôle important du transport particulaire, cohérent avec des mécanismes d'adsorption sur les fractions fines issues des activités de concassage et de dynamitage. Ce comportement est compatible avec les dynamiques décrites dans des environnements miniers similaires (Yan *et al.,* 2022).

Les modèles prédictifs (R^2 = 0,89 à 0,98 ; Figure 2a) confirment l'existence probable d'une source dominante commune pour le groupe Pb–Cd–Al–Zn, suggérant une origine principalement liée aux activités extractives et à la matrice géologique remobilisée.

En revanche, le comportement du nickel, faiblement expliqué par le modèle (R^2 = 0,31), indique une dynamique distincte. Ce résultat suggère soit une fraction majoritairement dissoute, soit une contribution additionnelle liée à des sources diffuses (usure mécanique, hydrocarbures ou intrants techniques). Cette dissociation fonctionnelle constitue un point clé du système contaminant.

L'analyse des résidus révèle par ailleurs une anomalie localisée à la station EF3, particulièrement pour le plomb. Cette déviation pourrait refléter des conditions géochimiques locales spécifiques (variations de pH, redox ou compétition ionique), influençant les processus de précipitation ou de sorption. Des observations similaires ont été rapportées dans des systèmes fluviaux soumis à des pressions minières en RDC (Banze-wa-Mutombo *et al.,* 2022 ; Atibu *et al.,* 2023).

4.3. Enrichissement en nutriments et validation des vecteurs d'apport

Les concentrations élevées en nitrates (198 à 292 mg L^{-1}) constituent une anomalie majeure, dépassant largement les seuils de qualité recommandés (OMS, 50 mg L^{-1}). Dans le contexte d'une exploitation utilisant du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) comme explosif, ces niveaux suggèrent une contribution significative des résidus de tirs de mine et de leur lessivage.

Les fortes associations observées entre NO_3^-, DCO et DBO_5 indiquent un couplage entre apports azotés et charge organique, renforçant l'hypothèse d'une source commune liée aux activités extractives et au ruissellement des zones d'exploitation.

Les modèles prédictifs (Figure 3a) confirment une structure spatiale fortement contrainte pour les formes azotées (NO_3^-, NH_4^+), avec des résidus faibles, suggérant un comportement relativement conservatif à l'échelle du système étudié.

En revanche, les orthophosphates présentent une variabilité résiduelle plus marquée, notamment à la station EF4. Cette divergence indique que, contrairement à l'azote, le phosphore est fortement marqué par des processus locaux tels que l'adsorption sur les particules, la précipitation avec les oxydes métalliques ou l'assimilation biologique

rapide par le périphyton. Cette dissociation fonctionnelle entre N et P souligne la complexité des dynamiques biogéochimiques en milieu fluvial impacté.

4.4. Risques écotoxicologiques et sanitaires

La structuration spatiale des contaminants observée dans la rivière Lukaya met en évidence un risque écotoxicologique élevé, lié à la combinaison de fortes charges particulaires, de métaux lourds toxiques et d'un déséquilibre marqué des paramètres physicochimiques essentiels à la vie aquatique, notamment l'oxygène dissous.

Les résultats montrent que les concentrations en Pb, Cd, Ni et Al dépassent les valeurs guides de l'OMS (WHO, 2022), ce qui traduit une exposition chronique des organismes aquatiques à des éléments hautement toxiques. Dans ce contexte, la phase particulaire joue un rôle déterminant, comme l'indiquent les fortes corrélations entre les MES et les métaux lourds ($R^2 > 0,90$), suggérant un transport vectorisé et une accumulation préférentielle dans les sédiments fins.

Ce mécanisme est particulièrement préoccupant car il favorise non seulement la biodisponibilité progressive des contaminants, mais aussi leur transfert dans la chaîne trophique aquatique via les organismes filtreurs et détritivores. À long terme, ce processus peut entraîner une bioaccumulation et une biomagnification des métaux toxiques, affectant la structure et le fonctionnement des communautés biologiques.

Par ailleurs, l'hypoxie persistante du milieu (1,11 à 1,49 mg O_2 L^{-1}) constitue un facteur aggravant majeur, réduisant la résilience des organismes aquatiques et amplifiant leur sensibilité aux contaminants chimiques. L'interaction entre stress chimique (métaux, nutriments) et stress physique (déficit en oxygène) traduit un scénario de multi-pression environnementale caractéristique des systèmes fluviaux soumis à une exploitation minière intensive.

Sur le plan sanitaire, ces conditions augmentent le risque d'exposition des populations riveraines, notamment via l'utilisation de l'eau pour des usages domestiques indirects et la consommation de ressources halieutiques potentiellement contaminées. La cohérence des modèles prédictifs (R^2 élevé pour les principaux contaminants) renforce la robustesse de ces conclusions et suggère que les mécanismes identifiés sont structurels et non aléatoires.

Ainsi, l'ensemble des résultats met en évidence un risque écotoxicologique élevé à très élevé, nécessitant des mesures urgentes de gestion environnementale visant à réduire les apports à la source et à limiter la propagation des contaminants dans le réseau hydrographique.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser et de modéliser l'impact des effluents de la carrière de grès de Kasangulu sur la qualité hydrochimique de la rivière Lukaya. L'approche intégrée combinant analyses statistiques multivariées et modélisation prédictive (R^2 jusqu'à 0,99) met en évidence des relations fonctionnelles fortes entre charge organique, dynamique particulaire et désoxygénation du milieu.

Les résultats indiquent une structuration différenciée des contaminants : (i) un groupe métallique (Pb, Cd, Al, Zn) principalement associé au transport particulaire et à une source industrielle commune, (ii) un comportement distinct du nickel, suggérant une dynamique dissoute et/ou une origine multiple, et (iii) un signal azoté fortement corrélé aux activités explosives, contrastant avec la variabilité biogéochimique du phosphore.

Les dépassements systématiques des normes de l'OMS pour plusieurs paramètres clés confirment l'existence de risques écotoxicologiques et sanitaires élevés pour les écosystèmes et les populations riveraines. Ces résultats fournissent une base scientifique robuste pour le développement de stratégies de gestion et de traitement des effluents, notamment par décantation contrôlée et traitements physicochimiques ciblés.

Références

APHA (American Public Health Association), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF)., 2022. *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press, 1516 p.

Atibu E. K., Kamika I., Mudogo C. N., Lusamba S. N., Mulaji C. K., Carvalho F. & PotéJ., 2023. Quantification of heavy metals and mercury-resistant bacteria in artisanal and small-scale gold mining sites, Maniema region, Democratic Republic of the Congo. *International Journal of Environmental Research, 17*, Article 34. https://doi.org/10.1007/s41742-023-00524-y

Banze-wa-Mutombo A., Atibu E. K., Mbuya-wa-Mutombo J., Kalonda E. M., Bakatula E. N., Kanda V. N. *et al.*,2022. Contamination by heavy metals from mining activities: An ecological impact assessment of Mura and Kimpulande Rivers, Democratic Republic of the Congo. *Watershed Ecology and the Environment,* 4, 148–157. https://doi.org/10.1016/j.wsee.2022.10.004

Bastianini L., Rogerson M., Brasier A., Prior T. J., Hardman K., Dempsey E., Bird A. & Mayes W. M., 2024. Ikaite formation in streams affected by steel waste leachate: First report and potential impact on contaminant dynamics. *Chemical Geology*, vol. 644, 121842https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121842

Boadi N. O., Saah S. A., Baa-Poku F., Mensah E. A. & Addo, M., 2020. Safety of borehole water as an alternative drinking water source. *Scientific African*, 10, e00657. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00657

Costa M., Henriques B., Pinto J., Fabre E., Dias M., Soares J. *et al.*, 2020. Influence of toxic elements on the simultaneous uptake of rare earth elements from contaminated waters by estuarine macroalgae. *Chemosphere*, *252*, 126562. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126562

CRREBaC (Centre de Recherche en Resssources en Eau du Bassin de Congo), 2021. *Water pollution disaster in Tshikapa and Kasaï rivers identified in the CB-CIS tool: CRREBaC's call for action* (Ref. No. CRREBaC/RTM/043/082021). Kinshasa, Democratic Republic of the Congo, 2 p.

Cui L., Wang X., Li J., Gao X., Zhang J. & Liu Z., 2021. Ecological and health risk assessments and water quality criteria of heavy metals in the Haihe River. *Environmental Pollution*, *290*, 117971. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117971.

HACH, 2015. *Water analysis handbook* (7th ed.). HACH Company, 541 p.

ISO 5667-3, 2018. *Water quality—Sampling—Part 3: Preservation and handling of water samples*. International Organization for Standardization.

Jenkins R., 1999. *X-ray fluorescence spectrometry*. 2nd ed., Wiley, 1625 p.

Lundemi L. K., Neema S. S., Atibu E. K., Mulaji C. K., Tangou T. T., Nsimanda, C. I., Suami R. B., Esako M. O., Musibono D. E. A. & Carvalho F. P., 2022. Heavy metal levels and potential ecological risks assessed at an agroecosystem site in tropical region. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 42–60. https://doi.org/10.4236/gep.2022.109003

Manza H. M., Kiyombo G. M., Kuna S. N., Carvalho F. P., Atibu E. K., Poté J. & Mata H. K., 2026. Trace metal levels in sediments and muscle of edible fish species from the Kasai River, Democratic Republic of the Congo. *Water, Air & Soil Pollution*, 237, 765. https://doi.org/10.1007/s11270-026-09437-w

Norvivor F. A., Azizi S., Fuku X., Atibu E. K., Idris A. O., Sibali L., Maaza M. & Kamika I., 2024. Ecological and human health risk of heavy metals in Nubui River: A case of rural remote communities. *Frontiers in Water*, 6, 1397853. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1397853.

Nsiala G., Kiyela Mulaji C.., Fernando P. Carvalho F., Makali Biey E., Poté J. & 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.

Potts P. J. & West M. 2008. *Portable X-ray fluorescence spectrometry: Capabilities for in situ analysis*. Royal Society of Chemistry, 6 p.

Sharma A. K., Sharma M., Sharma S., Malik D. S., Sharma M. & Sharma A. K., 2024. A systematic review on assessment of heavy metals toxicity in freshwater fish species: Current scenario and remedial approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 262, 107472. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107472.

Tarigan M., Raji S., Al-Fatesh H., Czermak P. & Ebrahimi M., 2025. The occurrence of micropollutants in the aquatic environment and technologies for their removal. *Processes*, 13(3), Article 843. https://doi.org/10.3390/pr13030843.

WHO (World Health Organization), 2022. *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the first and second addenda). World Health Organization, 631 p.

Yan Y., Wan B., Mansor M., Wang X., Zhang Q., Kappler A. & Feng X., 2022. Co-sorption of metal ions and inorganic anions/organic ligands on environmental minerals: A review. *Science of the Total Environment*, 803, 149918. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149918.