



Caractéristiques physico-chimiques des eaux et sédiments des sites d'exploitation artisanale de l'or dans le territoire de watsa (République Démocratique du Congo)

[Physicochemical characteristics of water and sediments from artisanal gold mining sites in watsa territory (Democratic Republic of the Congo)]

Richard Ilunga Tshiyoyo^{1*}, Stephane Mbuyamba Ngulula², Jason Thambwe Kilembe², Julien Lusilao Makiese¹, Michel Kapembo Lufuluabo², Odon Kupesa Kimazowa¹, Dieudonne Musibono Eyul'anki¹ & Emmanuel Biey Makaly¹

¹Mention Sciences et gestion de l'Environnement, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

²Mention Chimie et Industries, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

Résumé

L'exploitation artisanale de l'or exacerbe la dégradation de l'environnement et de la santé sur les sites miniers en affectant, entre autres, les caractéristiques physico-chimiques des compartiments environnementaux des sites impactés. Celles-ci servent ainsi d'indicateurs du niveau de dégradation des sites miniers dû à cette exploitation. La présente étude visait à déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux de rivières, des sources et de leurs sédiments sur les sites miniers artisanaux du territoire de Watsa, en RDC. Un total de 20 échantillons d'eaux et de sédiments a été prélevé sur le site. L'analyse des variables a été réalisée *in situ* (pH, Eh, CE, salinité, TDS) et au laboratoire, (Ca, Mg, Cl^- , MO, humidité) suivant les normes spécifiques. Cette étude a révélé une acidité et un potentiel rédox élevé pour les eaux de rivières (pH: $5,3 \pm 0,7$; Eh: 580 ± 10 mV) et de sources (pH: $5,5 \pm 0,1$; Eh: 580 ± 20 mV). Les valeurs de la conductivité électrique des sédiments (CE: $27,6 \pm 26,1 - 54,2 \pm 2,5$ $\mu S/cm$) étaient supérieures à celles des eaux. Les teneurs en ions majeurs (Ca, Mg, Cl^-), globalement faibles (< 60 mg/L), étaient élevées dans les eaux. Cependant, les différentes variables étaient hors spécifications par rapport aux recommandations de l'OMS, illustrant la dégradation de la qualité environnementale et sanitaire des sites. L'ACP a montré que les variables représentatives et positivement corrélées étaient l'Eh, les chlorures, la CE et la salinité, avec une inertie totale de 88,2 %, et que l'axe PC1 était l'axe du pouvoir rédox.

Mots-clés : caractéristiques, dégradation, exploitation, Watsa, corrélation.

Abstract

Artisanal gold mining intensifies environmental degradation and threatens human health by altering the physicochemical characteristics of environmental compartments. This study evaluated the physicochemical properties of river water, spring water, and associated sediments collected from artisanal gold mining sites in the Watsa Territory, Democratic Republic of Congo. A total of 20 water and sediment samples were collected and analyzed. *In situ* measurements included pH, oxidation-reduction potential (Eh), electrical conductivity (EC), salinity, and total dissolved solids (TDS), while laboratory analyses determined calcium (Ca), magnesium (Mg), chloride (Cl^-), organic matter (OM), and moisture content using standardized methods. River water (pH 5.25 ± 0.66 ; Eh 580 ± 10 mV) and spring water (pH 5.48 ± 0.06 ; Eh 580 ± 20 mV) exhibited acidic conditions and elevated redox potential. Sediments showed higher EC values ($27.6 \pm 26.1 - 54.2 \pm 2.5$ $\mu S/cm$) than water samples. Major ion concentrations (Ca, Mg, and Cl^-) remained generally low (<60 mg/L), although they were comparatively higher in water than in sediments. Several physicochemical parameters exceeded World Health Organization guideline values, indicating deterioration of environmental quality and potential health risks associated with artisanal mining. Principal Component Analysis (PCA) identified Eh, chloride, EC, and salinity as the most representative and positively correlated variables, explaining 88.2% of the total variance. The first principal component (PC1) represented the redox gradient, demonstrating that oxidation-reduction processes are the dominant factors governing physicochemical variability across the investigated mining environments and surrounding ecosystems.

Keywords: Physicochemical characteristics; Degradation; Artisanal gold mining; Watsa; Correlation.

*Auteur correspondant: Richard Ilunga Tshiyoyo, (ilutshiyoyo@gmail.com). Tél. : (+243) 814 926 975

 <https://orcid.org/0009-0004-5432-1405>; Reçu le 20/07/2026; Révisé le 11/08/2026; Accepté le 01/09/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i3.339>

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

1. Introduction

L'exploitation minière artisanale de l'or connaît une expansion significative dans les pays en développement, en particulier en République Démocratique du Congo (RDC). Bien que cette activité soit très lucrative pour la population locale, elle contribue à la dégradation environnementale des sites miniers, affectant ainsi la forêt, le sol, les cours d'eau et la faune (Atibu et al., 2018; Mutombo et al., 2022; Danala et al., 2024; Kyale et al., 2024; Mahmoud et al., 2024). En effet, l'exploitation aurifère emploie des réactifs chimiques toxiques, ainsi que des volumes considérables d'eau et de minerais. Cela entraîne une modification des conditions biogéochimiques du site, affectant les cycles biogéochimiques des éléments chimiques présents dans les minerais. Ces modifications se traduisent fréquemment par une altération des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des divers compartiments du site (Atibu et al., 2023; Mavakala et al., 2022; Dipakama et al., 2024; Mbuyamba et al., 2024; planetGOLD, 2024).

Étant donné que les caractéristiques physico-chimiques reflètent le degré de dégradation des divers compartiments des sites, leur mesure est essentielle. Une méthode fréquemment employée pour évaluer la dégradation de la qualité physique, chimique et biologique d'un site est l'approche de terrain, également appelée approche descriptive. Cette méthode repose sur la comparaison des valeurs mesurées sur le terrain avec celles des grilles de qualité ou des indices de qualité. (Mbuyamba et al., 2026; Hamkary et al., 2024; Wang et al., 2024). En RDC, les difficultés d'accessibilité aux sites artisanaux, l'informalité de cette exploitation et le manque des moyens conséquents rendent difficiles la réalisation des études d'impacts environnementaux. À ce jour, les rares études sur la dégradation physico-chimique des sites miniers artisanaux aurifères ont été réalisées sur quelques sites du Nord-Kivu, du Sud-Kivu, du Bas-Uélé, de l'Ituri, du Haut-Katanga, du Nord-Ubangi, du Tanganyika, etc. Cependant, celles-ci portaient sur un nombre très limité de sites, et ont été réalisées il y a plusieurs années (Atibu et al., 2018; Mutombo et al., 2022; Mbuyamba et al., 2026; Kyale et al., 2024; Mangambu, 2023). L'expansion de ces activités avec la découverte des nouveaux gisements aurifères, le recours à des nouvelles technologies, à des équipements modernes et engins lourds accélèrent la dégradation de l'environnement, notamment la dégradation des ressources en eau. La présente étude

visait à déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface, des eaux de sources et des sédiments des sites d'exploitation artisanale de l'or dans le territoire de Watsa dans la province du Haut-Uélé, en RDC.

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le site d'étude est la localité de Watsa, chef-lieu du territoire de même nom, Watsa, en province du Haut-Uélé en République Démocratique du Congo. Le territoire de Watsa est une entité administrative qui s'étend sur 16 015 km². Il est borné au Nord par les territoires de Faradje (rivière Nzoro) et de Dungu, à l'Est par les territoires d'Aru et de Mahagi (Ituri), au Sud-Est par le territoire de Djugu (Ituri), au Sud par le territoire de Mambasa et à l'Ouest par le territoire de Rungu. Le territoire de Watsa compte 413 villages répartis sur 67 groupements, et joue un rôle économique majeur dans la province du Haut-Uélé grâce à ses riches ressources naturelles, principalement l'or. L'exploitation minière industrielle est menée par Kibali Gold Mines (KGM), pilier économique de la région offrant plusieurs emplois à la population locale. Cependant, plusieurs sites miniers artisanaux actifs ont été identifiés dans la localité de Watsa, notamment les sites de Renzi, d'Ugagu, de Dilolo et de Dar-es-salam (Kyale et al., 2024).

Du point de vue climatique, le territoire de Watsa se trouve dans la zone tropicale humide avec deux saisons, une saison sèche allant de décembre à février et une saison de pluie de mars à novembre. Les températures moyennes mensuelles oscillent autour de 24,6°C avec un maximum de 30,1°C et un minimum de 20,8°C. Le territoire de Watsa est traversé par une forêt dense de montagne faite de grands arbres (10 à 50 m de hauteur). Le réseau hydrographique du territoire de Watsa est celui de la cuvette Centrale du Congo. Le relief de la localité de Watsa est fait des montagnes dont les altitudes oscillent autour de 1000 mètres. Le sol est constitué principalement des ferralsols tandis que la géologie du territoire est caractérisée par la présence des basaltes et des granites (Kyale et al., 2024; Mangambu, 2023; Mantel et al., 2023).

Le tableau I donne les coordonnées géographiques de quelques sites miniers artisanaux actifs retenus pour cette étude en territoire de Watsa.

Tableau 1. Coordonnées géographiques de différents sites miniers artisanaux actifs retenus

Latitude Nord	Longitude Est	Sites miniers actifs
2,96338166	29,47101362	Dar es-Salam
2,97458084	29,47889612	Dilolo Ugagu
3,06828886	29,51527966	Dilolo
3,06860521	29,50762014	Dilolo Manda
3,07063495	29,50927022	Dilolo-Burusa
3,07274871	29,51360879	Dilolo-Dakarta
3,09788296	29,60718137	Renzi

La figure 1 donne la cartographie de quelques sites miniers artisanaux aurifères actifs retenus pour cette étude en territoire de Watsa.

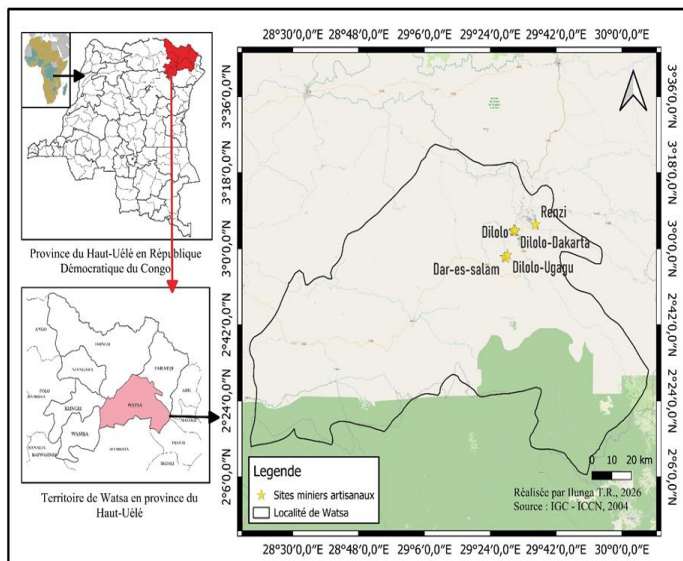


Figure 1. Cartographie de quelques sites miniers artisanaux aurifères actifs en territoire de Watsa

2.2. Matériel

Le matériel utilisé pour l'échantillonnage des eaux était constitué des bouteilles neuves en plastique de 1 litre, et celui destiné à l'échantillonnage des sédiments était fait d'une truelle en inox et des seaux en plastique de 10 litres. Une glacière de 50 litres et des sachets plastiques ont servi au conditionnement des échantillons. Les mesures de paramètres physico-chimiques ont été faites in situ à l'aide de la sonde multiparamètre Oyster Meter Model 341350 A, et celles effectuées au laboratoire à l'aide de la verrerie classique et autres matériels de laboratoire (Mbuyamba et al., 2026; Hamkary et al., 2024; Casado et al., 2021).

2.3. Méthodologie

2.3.1. Échantillonnage

Un échantillonnage aléatoire des eaux de rivières, des eaux de sources et des sédiments a été réalisé dans les sites miniers artisanaux actifs de Renzi (Renzi 1 et Renzi 2), de Dilolo (Dilolo, Burusa, Manda, Dakarta), Ugagu et de Dar-es-salam en saison de pluie du 5 au 30

mai 2023. Les eaux de rivière (ER) et les sédiments de rivière (SR) ont été prélevés, respectivement à 30 cm de la surface, et à 5 cm de profondeur du fond de la rivière. Les eaux de sources (ES) et les sédiments de sources (SS) ont été collectés à 10 cm de la surface et à 5 cm de profondeur du fond de la source. Ainsi, Vingt (20) échantillons composites d'eaux de rivières, d'eaux de sources et des sédiments ont été collectés comme suit : 8 échantillons d'eaux de rivières (ER) à Dilolo (ERDI1, ERDI2, ERDI4, ERDI5, ERDI6, ERDI7, ERDI8 et ERDI9), 1 échantillon d'eaux de rivière à Ugagu (ERUG3), et 8 échantillons de sédiments de rivières (SRDI1, SRDI2, SRUG3, SRDI4, SRDI5, SRDI6, SRDI7, SRDI8) à Dilolo et Ugagu, 2 échantillons d'eau de sources (ES) à Renzi (ESRE1, ESRE2), et enfin 1 échantillon de sédiments de source (SS) à Renzi (SSRE1).

La figure 2 donne la cartographie des points d'échantillonnage des eaux de rivières, des eaux de sources et des sédiments à Watsa.

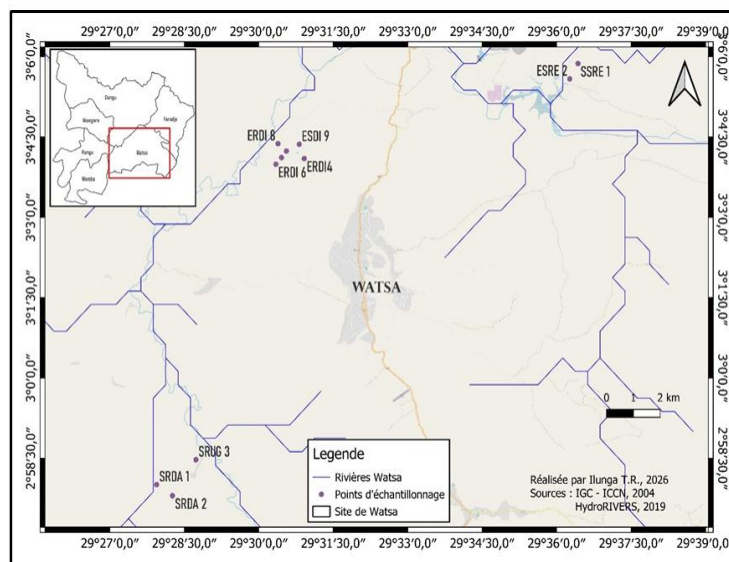


Figure 2. Cartographie des points d'échantillonnage des eaux et des sédiments à Watsa

2.3.2. Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques clés déterminés in situ étaient le pH, le potentiel rédox (Eh), la conductivité électrique (CE) et la teneur en solides totaux dissous (TDS) sur les échantillons d'eau après calibration de la sonde multiparamètre au moyen des solutions tampons de pH (4 - 7 - 10) et des solutions tampons de la conductivité électrique (84 - 1413 µS/cm) fournies par la firme HANNA. Quant aux sédiments, les mesures de ces paramètres ont été réalisées sur une suspension sédiments séchés et

tamisés (fraction < 2 mm) - eau, dans un rapport volume : volume de 1 : 5 (Mbuyamba et al., 2026; Hamkary et al., 2024; IUSS Working Group WRB, 2022). Les analyses de laboratoire de la dureté totale

THt, des teneurs en calcium (Ca), en magnésium (Mg), en chlorures (Cl), en matière organique (M.O.), de l'humidité (Humidity) ont été réalisées suivant les normes reprises dans le [tableau II](#) ci-après :

Tableau II. Méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux et sédiments (Mbuyamba et al., 2026)

Paramètres	Méthodes et Techniques	Références
pH	Potentiométrie	NF T 90 008
Température	Sonde du multiparamètre	ISO 5667-12
Conductivité électrique	Conductance entre 2 électrodes	NF EN 27888 (w) - ISO 11265 (s)
Potentiel redox Eh	Potentiométrie	NF ISO 11271/2002 (F)
Salinité	Conductance entre 2 électrodes	NF EN 27888
TDS	Conductance entre 2 électrodes	NF EN 27888
Humidité	Gravimétrie	NF EN ISO 11465
COT	Méthode de Walkley et Black	NF EN 14235
Matière organique	Méthode de Walkley et Black	NF EN 14235
Teneurs Ca et Mg	Titration acide-base	NF T90-005 (eau)
Dureté totale	Dosage complexométrique à l'EDTA avec le noir ériochrome T (NET)	NF T 90 003
Chlorures	Méthode de Mohr (argentimétrie)	ISO 9297 (w) - ISO 14254

2.4. Traitement statistique

Les données ont été soumises au traitement statistique avec les logiciels R et Excel. La présentation des résultats par les boîtes à moustaches (boxplots) a été utilisée pour visualiser les valeurs maximales et minimales, les médianes, les valeurs aberrantes ou extrêmes ainsi que les effectifs de chaque compartiment. L'analyse multivariée (Analyse en Composantes Principales ACP), qui n'exige pas la normalité des variables, a été utilisée pour synthétiser les données collectées (variables) en de nouvelles variables, illustrer les corrélations entre variables et les ressemblances entre individus (échantillons ou sites) sur les graphiques et enfin pour en extraire les variables les plus représentatives et relever les similarités hydrochimiques entre individus (échantillons ou sites) (Kyale et al., 2024; Ahoussi & Yapo, 2021; Husson et al., 2018).

3. Résultats

3.1. Analyses physico-chimiques des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments

La [figure 3](#) présente l'acidité et le pouvoir rédox des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments du territoire de Watsa.

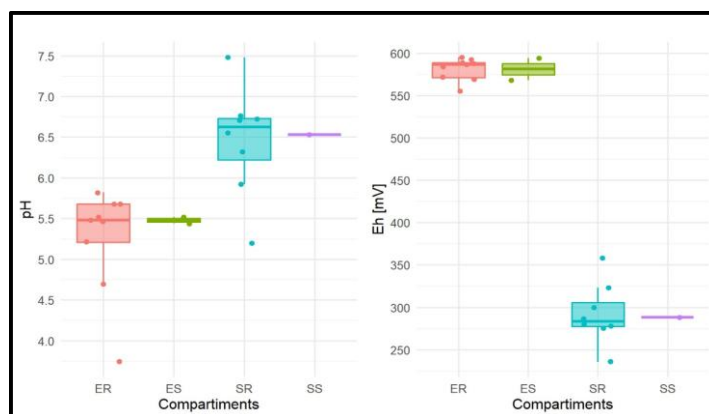


Figure 3. Acidité et pouvoir rédox des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments

Cette figure montre que les eaux de rivière (pH ER : $5,3 \pm 0,7$) et les eaux de source (ES : $5,5 \pm 0,1$) sont plus acides que leurs sédiments ($6,5 \pm 0,7$ pour SR et de $6,5 \pm 0,01$ pour SS). Les valeurs élevées de pouvoir rédox sont observées pour les eaux de rivière (ER) 580 ± 10 mV et les eaux de source (ES) 580 ± 20 mV. Les sédiments affichent des faibles valeurs de potentiel rédox, respectivement 290 ± 40 mV pour les sédiments de rivière (SR) et 290 ± 10 mV pour les sédiments de source (SS). Les différentes eaux affichent une homogénéité par rapport à ces variables (pH et Eh). Un point extrême est observé pour le pH des eaux de rivière (3,5). Une certaine hétérogénéité a été observée pour les sédiments de rivière avec des extrêmes de pH à 5,2 et 7,5. La [figure 4](#) illustre la conductivité électrique et la minéralisation des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments de Watsa.

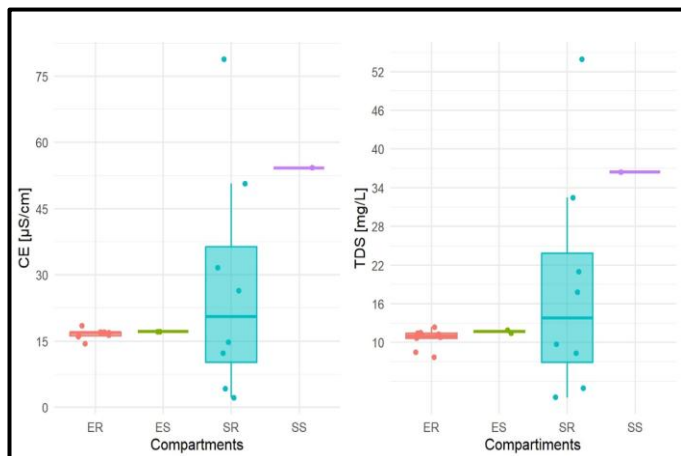


Figure 4. Conductivité électrique et minéralisation des eaux et des sédiments de rivière

Il ressort de cette figure que globalement, la conductivité électrique et la minéralisation des sédiments, des eaux de rivière et des eaux de source sont faibles ($< 100 \mu\text{S/cm}$ et 20 mg/L). La conductivité électrique des sédiments varie entre $27,6 \pm 26,1 \mu\text{S/cm}$ et $54,2 \pm 2,5 \mu\text{S/cm}$ tandis que celles des eaux de rivière et des eaux de source oscillent respectivement autour de $16,6 \pm 1,1 \mu\text{S/cm}$ et $17,1 \pm 0,1 \mu\text{S/cm}$. Les teneurs en solides totaux dissous (TDS) sont importantes dans les sédiments ($18,4 \pm 17,6 \text{ mg/L}$ pour SR et $36,4 \pm 1,6 \text{ mg/L}$ pour SS) comparativement à celles des eaux de rivière (ER) $10,6 \pm 1,5 \text{ mg/L}$, et des eaux de source (ES) $11,7 \pm 0,4 \text{ mg/L}$. Il s'observe une forte hétérogénéité de la conductivité électrique et de la teneur en sels solubles dans les sédiments de rivières (SR). Les valeurs extrêmes ou aberrantes ont été observées pour la conductivité électrique CE ($2,22 - 4,20 - 50,60 - 54,20 - 78,80 \mu\text{S/cm}$) et le TDS ($32,4 - 36,4 - 53,9 \text{ mg/L}$) des sédiments de rivières (SR).

La figure 5 illustre les teneurs en calcium (Ca) et en magnésium (Mg) des eaux de rivière, des eaux de source, des sédiments de rivière et des sédiments de sources de Watsa. Il se dégage de cette figure que les teneurs en Ca et en Mg sont faibles ($< 100 \text{ mg/L}$) avec des valeurs relativement élevées dans les eaux de rivière ($43,9 \pm 8,1 \text{ mg/L Ca}$ et $26,4 \pm 4,8 \text{ mg/L Mg}$), et dans les eaux de source ($53 \pm 12,7 \text{ mg/L Ca}$ et $31,8 \pm 7,6 \text{ mg/L Mg}$). Les eaux de rivière (ER) affichent une dispersion relativement importante pour les teneurs en Ca et Mg.

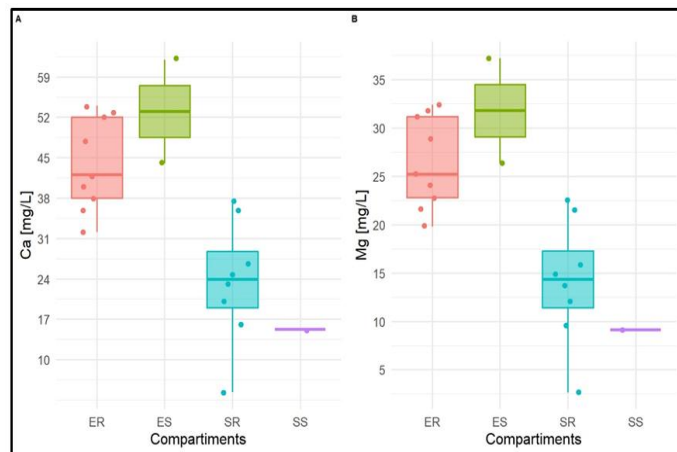


Figure 5. Teneurs en Ca et en Mg des eaux et des sédiments de rivière du site

La figure 6 illustre les teneurs en chlorures (Cl) des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments de Watsa.

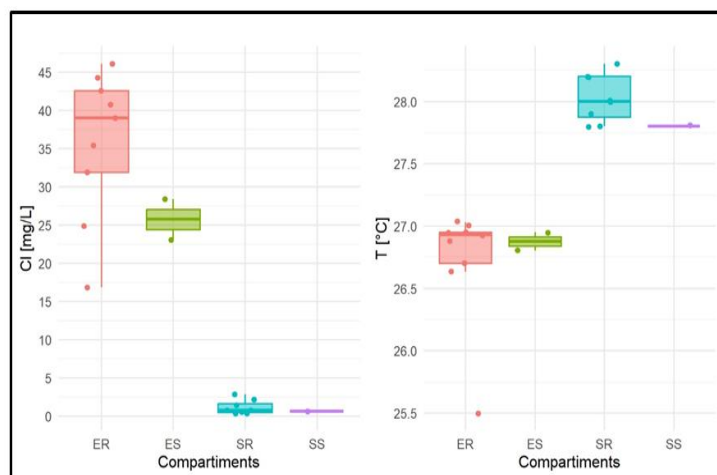


Figure 6. Teneurs en chlorures et températures des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments de Watsa

Cette figure montre que les teneurs en chlorures (Cl) sont également faibles dans les sédiments ($1,1 \pm 1,0 \text{ mg/L SR}$ - $0,6 \pm 0,2 \text{ mg/L SS}$) que dans les eaux de rivière (ER) ($35,8 \pm 9,7 \text{ mg/L}$) et les eaux de source (ES) ($25,7 \pm 3,8 \text{ mg/L}$). Les eaux de rivières et les eaux de sources présentent une moyenne de température respective de $26,7 \pm 0,5^\circ\text{C}$ et de $26,9 \pm 0,1^\circ\text{C}$. La température moyenne des sédiments de rivières est de $28,1 \pm 0,2^\circ\text{C}$, et de $27,8 \pm 0,1^\circ\text{C}$ pour les sédiments de sources.

Les fluctuations de ces variables dans les différents compartiments sont faibles. La figure 7 illustre les teneurs en carbone organique total (COT) et les teneurs en eau des sédiments de rivière du site Watsa.

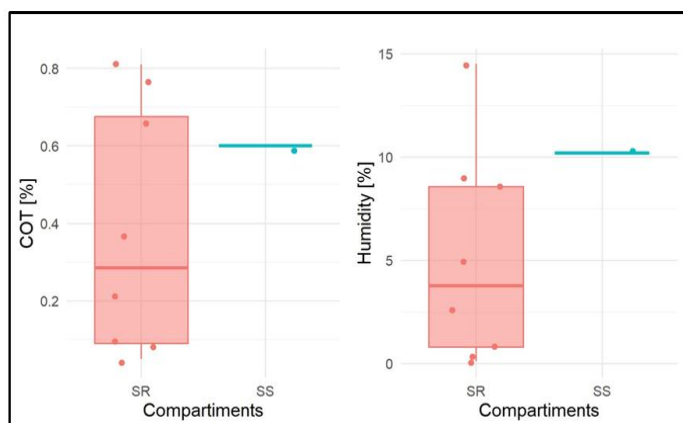


Figure 7. Carbone organique total (COT) et humidité des sédiments de rivière du site

De cette figure 7, il ressort que les teneurs en carbone organique total des sédiments de rivières (SR) et des sédiments de source sont globalement faibles ($< 1\%$) avec une moyenne de $0,38 \pm 0,32\%$ pour SR et de $0,60 \pm 0,01\%$ pour SS. Le taux d'humidité des sédiments oscille autour de $5,1 \pm 5,1\%$ pour SR et de $10,2 \pm 1,1\%$. Les sédiments de rivières avec un effectif important affichent des fluctuations plus ou moins importantes que les sédiments de source (SS).

3.2. Étude des corrélations entre variables physico-chimiques des eaux et des sédiments

Le tableau III donne les proportions de variances et les variances cumulées associées à l'ACP des variables physico-chimiques des eaux et des sédiments de Watsa.

Tableau III. Table de proportions de variances et les variances cumulées

Principal Component Analysis	Standard deviation	Proportion de variance	Cumulative Proportion
PC1	2,44648	0,59853	0,59853
PC2	1,68331	0,28335	0,88188
PC3	0,85596	0,07327	0,95515
PC4	0,52049	0,02709	0,98224
PC5	0,31048	0,00964	0,99188
PC6	0,28048	0,00787	0,99975
PC7	0,04796	0,00023	0,99998
PC8	0,01183	0,00001	0,99999
PC9	0,00882	0,00001	1,00000
PC10	0,00157	0,00000	1,00000

D'après le tableau III, les axes à retenir sont ceux dont la proportion de variance est supérieure à 10 %. Les composantes principales, PC1 (59,85 %) et PC2 (28,34 %), satisfont à cette règle et permettent d'expliquer 88,2 % de la variabilité des variables sur le

site Watsa. La figure 8 affiche les résultats de l'analyse en composantes principales des variables physico-chimiques des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments du site Watsa.

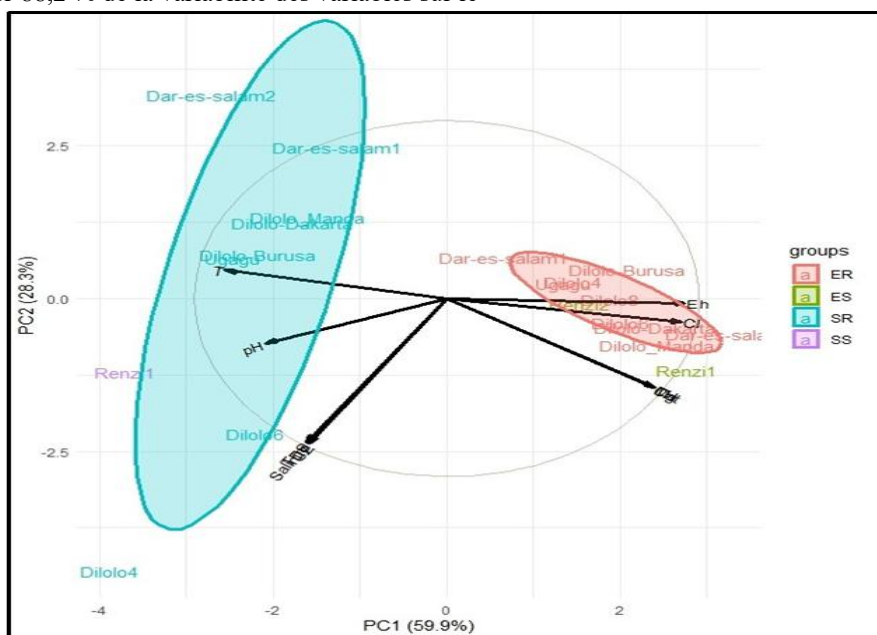


Figure 8. Analyse en composantes principales des variables physico-chimiques

Cette [figure 8](#) montre que les variables les mieux projetées sur le cercle de corrélation sont les teneurs en chlorures, le potentiel rédox, les teneurs en calcium (Ca) et en magnésium (Mg), la conductivité électrique (CE) et la salinité. La teneur en chlorures et le potentiel rédox évoluent dans le même sens sur le site Watsa avec des contributions respectives de 38,1 % et 38,6 % à la construction de l'axe 1, axe rédox, et de la richesse en chlorures. Autrement dit, l'augmentation des teneurs en chlorures des eaux de rivières s'accompagne de l'augmentation du potentiel rédox. Les contributions à la construction de l'axe 2, axe de la salinité/minéralisation, sont respectivement de 48,5 % pour la CE et 48,1 % pour la salinité. Cette figure montre également de très fortes corrélations positives entre les teneurs en calcium et les teneurs en magnésium, et une corrélation forte négative entre la salinité et la conductivité électrique (CE), mais des corrélations relativement fortes et positives entre le pH et les teneurs en chlorures (angle entre vecteurs des variables $< 90^\circ\text{C}$).

Cette [figure 8](#) renseigne également que les eaux de rivières des sites de Dilolo, d'Ugagu et de Dar-es-salam possèdent des pouvoirs rédox et des teneurs en chlorures élevées tandis que les sédiments de rivières affichent des valeurs de pH et de températures élevées sur les sites étudiés. Il ressort également de cette figure que les eaux de rivière de Dar-es-salam 1, de Dar-es-salam 2, de Dilolo_Manda et de Dilolo_Dakarta présentent des profils hydrochimiques similaires. Ces similarités de profils sont aussi observées pour les sédiments de rivières de Dilolo_Burusa et Dilolo_Manda, mais aussi pour les sédiments d'Ugagu et de Dilolo_Burusa. Les sédiments de Dar-es-salam 1 et de Dar-es-salam 2 ont des profils différents.

4. Discussion

Les résultats de pH des eaux de rivières des sites de Watsa ([figure 3](#)) indiquent que celles-ci sont acides ($5,3 \pm 0,7$) comparativement à la norme de qualité des eaux de surface 6,5–8,5 (Mbuyamba *et al.*, 2026; Yapo, 2024). Les eaux de rivières de Watsa sont plus acides que les eaux de rivière de sites artisanaux de Lite-Bala ($6,5 \pm 0,3$ - $6,7 \pm 0,5$) en saison de pluie dans le Nord-Ubangi en RDC (Mbuyamba *et al.*, 2026).

Les eaux de rivières des sites miniers dans le secteur de Dimonika et ses environs en République du Congo ($6,2 \pm 0,6$ (Dipakama *et al.*, 2024)). Les eaux de rivières des zones d'orpaillage de la sous-préfecture

de Kokumbo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire ($7,5 \pm 0,6$ (Ahoussi & Yapo, 2021)), les eaux de rivières des sites miniers du département de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire ($7,4 \pm 0,5$ (Yapo, 2024)).

Le pH des eaux de sources de Watsa ($5,5 \pm 0,1$) a également un caractère acide, et se révèle plus acide que les eaux de sources de sites miniers du Département de Dimbokro ($7,6 \pm 0,7$) mais moins acides que les eaux de sources de Lite-Bala. Les pH des eaux de sources de Watsa ne sont pas conformes aux normes de l'OMS pour la consommation humaine, et présentent un risque sanitaire (Mbuyamba *et al.*, 2026; Yapo, 2024).

À ce sujet, plusieurs auteurs ont démontré que les activités minières artisanales sont responsables de la dégradation de la qualité des eaux de rivière, des eaux de source et des sédiments. Ces derniers reçoivent des effluents miniers issus de différents types de traitements, et connaissent une exploitation sauvage de leurs lits vifs (Atibu *et al.*, 2018; Mutombo *et al.*, 2022; Mbuyamba *et al.*, 2026; Monyuy *et al.*, 2024; planetGOLD, 2024). En outre, les caractéristiques des eaux de surface sont tributaires de la géologie du terrain traversé, des retombées atmosphériques et des activités dans le bassin versant, tandis que celles des eaux de sources dépendent également de la nature des aquifères (Mbuyamba *et al.*, 2026; Hamkary *et al.*, 2024; Yapo, 2024). Les sédiments de rivières et les sédiments de sources de Watsa affichent, respectivement, des valeurs de pH peu acides ($6,5 \pm 0,7$ - $6,5 \pm 0,01$). Ces sédiments sont moins acides que ceux des sites miniers artisanaux de l'or de Lite-Bala, $4,9 \pm 0,7$ - $5,7 \pm 0,1$ (Mbuyamba *et al.*, 2026).

Les valeurs de potentiels rédox ([figure 3](#)) indiquent que les eaux de rivières (580 ± 10 mV) et les eaux de sources (580 ± 20 mV) de Watsa ont un caractère oxydant plus important que les sédiments de rivières (290 ± 10 mV) et de source (290 ± 40 mV). Ces eaux sont également plus oxydantes que les eaux de rivières des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, -40 ± 34 mV (Ahoussi & Yapo, 2021), et les eaux souterraines de sites miniers du Département de Dimbokro en Côte d'Ivoire, -39 ± 45 mV (Yapo, 2024). Elles sont également plus oxydantes que les eaux de rivières (320 ± 10 mV - 360 ± 40 mV) et des eaux de source (380 ± 5 mV) de Lite-Bala (Mbuyamba *et al.*, 2026).

Plusieurs auteurs ont démontré que le potentiel rédox (Eh) renseigne sur la nature oxydante ou réductrice des sols, des sédiments et des eaux, et par conséquent, renseigne sur la mobilité des éléments traces dans ces compartiments. Plus le milieu est oxydant, plus les éléments traces sont susceptibles d'être mobilisés. Dans le cas des sites de Watsa, les éléments traces seront plus disponibles dans les eaux que dans les sédiments. En effet, les différents éléments chimiques en solution peuvent être adsorbés par les particules en suspension ou dans les sédiments suivant les conditions de pH et du potentiel rédox(Eh). Par ailleurs, le potentiel rédox, bien que dépendant de la présence des composés réducteurs et oxydants, est défini par plusieurs réactions biochimiques dont la nature et le nombre dans le milieu naturel restent mal maîtrisés (Atibu et al., 2023; Hamkary et al., 2024; Mbuyamba et al., 2024; Wang et al., 2024).

Les résultats de conductivité électrique et de solides totaux dissous (Figure 4) des eaux de rivières ($16,6 \pm 1,1 \mu\text{S/cm}$ - $10,6 \pm 1,5 \text{ mg/L}$) et des eaux de sources ($17,1 \pm 0,1 \mu\text{S/cm}$ - $11,7 \pm 0,4 \text{ mg/L}$) reflètent la faible minéralisation de ces compartiments ou encore les faibles apports anthropiques en sels solubles. Les valeurs de CE et de TDS de ces eaux sont très loin des normes de qualité des eaux de surface ($100 \mu\text{S/cm} < \text{CE} < 1100 \mu\text{S/cm}$ - $\text{TDS} < 500 \text{ mg/L}$). Elles sont également moins minéralisées que les eaux de rivières des zones d'orpillage de la sous-préfecture de Kokumbo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, $281,6 \pm 142,4 \mu\text{S/cm}$ (Ahoussi & Yapo, 2021), les eaux de rivières des sites miniers du Département de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, $235,4 \pm 160,1 \mu\text{S/cm}$ (Yapo, 2024), les eaux de rivières de sites artisanaux de Lite-Bala ($44 \pm 9,5$ - $51,4 \pm 14,7 \mu\text{S/cm}$) dans le Nord-Ubangi en RDC, en saison de pluie (Mbuyamba et al., 2026).

Toutefois, les valeurs de CE des eaux de rivières de Watsa sont proches des eaux de rivières des sites miniers dans le secteur de Dimonika en République du Congo, $29 \pm 16,7 \mu\text{S/cm}$ (Dipakama et al., 2024). Les sédiments de rivières et les sédiments de sources de Watsa, qui affichent des valeurs de conductivité électrique respectives de $27,6 \pm 26,1 \mu\text{S/cm}$ et de $54,2 \pm 2,5 \mu\text{S/cm}$, sont moins minéralisés que les sédiments de Lite-Bala, $20,9 \pm 2,5$ - $121,7 \pm 96,9 \mu\text{S/cm}$ (Mbuyamba et al., 2026). Les sédiments de Watsa sont aussi pauvres en matière organique avec des teneurs en COT de $0,38 \pm 0,32 \%$ - $0,60 \pm 0,01 \%$, et des teneurs en eau variant entre $5,1 \pm 5,0$ et $10,2 \pm 1,0 \%$. Ces valeurs sont proches de celles des sédiments des sites

miniers artisanaux de Lite-Bala, $0,47 \pm 0,15\%$ (Mbuyamba et al., 2026). Plusieurs auteurs ont démontré que les sédiments sont des dépôts sur le fond des écosystèmes aquatiques issus de plusieurs processus physico-chimiques. Dans cette matrice, les eaux peuvent occuper les espaces entre les particules solides mais aussi faire partie de la structure cristalline des minéraux présents (eau de structure).

Les résultats des analyses en éléments majeurs (calcium, magnésium, chlorure) dans les eaux de rivières et des eaux de sources de Watsa corroborent les faibles valeurs de la minéralisation (TDS). Cependant, ces teneurs en Ca ($43,9 \pm 8,1 \text{ mg/L}$), en Mg ($26,4 \pm 4,8 \text{ mg/L}$) et en Cl^- ($35,8 \pm 9,7 \text{ mg/L}$) des eaux de rivières de Watsa sont supérieures à celles des eaux de rivières des sites miniers du Département de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire ($15,8 \pm 25,2 \text{ mg/L Ca}$, $2,4 \pm 3,7 \text{ mg/L Mg}$ et $6,7 \pm 2,1 \text{ mg/L Cl}^-$) (Yapo, 2024) et à celles des eaux de rivières de Lite-Bala ($23,7 \pm 24,5 \text{ mg/L Ca}$, $7,7 \pm 5,7 \text{ mg/L Mg}$ et $12,8 \pm 0,2 \text{ mg/L Cl}^-$) dans le Nord-Ubangi en RDC (Mbuyamba et al., 2026). Il en est de même des eaux de sources de Watsa ($53 \pm 12,7 \text{ mg/L Ca}$, $31,8 \pm 7,6 \text{ mg/L Mg}$ et $25,7 \pm 3,8 \text{ mg/L Cl}^-$) qui sont plus minéralisées que les eaux de sources de Lite-Bala ($4,7 \pm 3,7 \text{ mg/L Ca}$, $2,1 \pm 1,6 \text{ mg/L Mg}$ et $8,5 \pm 2,1 \text{ mg/L Cl}^-$), que les eaux souterraines de sites miniers du Département de Dimbokro en Côte d'Ivoire dont les teneurs sont de $18,7 \pm 34,1 \text{ mg/L Ca}$, $4,8 \pm 5,71 \text{ mg/L Mg}$ et $37,1 \pm 49,8 \text{ mg/L Cl}^-$ (Yapo, 2024). Les sédiments de rivières et ceux de sources sont très peu minéralisés avec respectivement $23,5 \pm 10,6$ et $15,2 \pm 1,1 \text{ mg/L}$ de Ca, $14,1 \pm 6,4$ et $9,1 \pm 0,7 \text{ mg/L}$ de Mg, et enfin $1,1 \pm 1,0$ et $0,6 \pm 0,2 \text{ mg/L}$ de Cl^- . Cependant, les sédiments de Watsa sont plus minéralisés que les sédiments de sites miniers de Lite-Bala pour lesquels les teneurs oscillent autour de $16,6 \pm 10,3 \text{ mg/L Ca}$, de $5,0 \pm 2,6 \text{ mg/L Mg}$ et de $10,1 \pm 3,1 \text{ mg/L Cl}^-$ (Mbuyamba et al., 2026).

Quant à la température, les eaux de rivières ($26,7 \pm 0,5^\circ\text{C}$) et les eaux de sources ($26,9 \pm 0,1^\circ\text{C}$) affichent des températures légèrement supérieures à la norme de l'OMS ($< 25^\circ\text{C}$). Les sédiments de rivières et les sédiments de sources ont des températures légèrement supérieures à celles des eaux de Watsa ($28,1 \pm 0,2^\circ\text{C}$ et $27,8 \pm 0,1^\circ\text{C}$). Plusieurs travaux ont montré que la température influe sur la teneur en oxygène dissous, la dissolution de minéraux, les processus de sorption-désorption des éléments traces et la vitesse des réactions biochimiques. Aux températures comprises entre 10°C et 30°C , les perturbations liées aux

changements de températures sont négligeables (Mbuyamba et al., 2024; Yapo, 2024).

L'analyse multivariée (ACP) (figure 8 et tableau III) a montré que les variables explicatives de la variabilité des données étaient le potentiel rédox et les teneurs en chlorures. L'axe 1 ou PC1, avec une variance de 0,599, explique à 59,9 % la variabilité des données collectées sur le site. Étant donné que les deux variables (Eh et Cl⁻) sont corrélées positivement, cela implique qu'une augmentation des teneurs en chlorures entraîne une augmentation du potentiel (Eh). Or naturellement, les ions chlorures réducteurs ne peuvent provoquer une augmentation du pouvoir rédox, l'agent oxydant naturel étant l'oxygène dissous (Mavakala et al., 2022; Mbuyamba et al., 2026; Hamkary et al., 2024; Yapo, 2024). L'ACP des paramètres physico-chimiques renseigne que les teneurs en chlorures sont liées à un apport chronique de cet élément dans les eaux de rivières.

5. Conclusion

La détermination des caractéristiques physico-chimiques illustre l'impact des activités minières de l'or sur les eaux de rivières, les eaux de sources et leurs sédiments à Watsa. Les différentes variables mesurées sont hors spécifications et ne permettent pas l'usage des eaux de Watsa pour la consommation humaine. Les activités minières artisanales sur le site Watsa semblent affecter les caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface, particulièrement l'acidité. L'acidité observée pourrait être responsable de la mobilité des éléments traces, qui peuvent se révéler toxiques pour les organismes vivants et les humains.

En outre, les eaux de surface, les eaux de source et les sédiments sont pauvres en sels minéraux, traduisant une faible minéralisation sur le site. La composition minéralogique des gisements aurifères et la nature des déversements doivent être suivies. Cette étude devra s'étendre à la quantification des éléments traces dans les différents compartiments afin d'estimer les risques d'intoxication.

Remerciements

Nos remerciements aux autorités politiques et académiques de l'UNIKIN ainsi qu'aux autorités administratives des sites miniers pour avoir facilité l'accès et le travail sur les sites miniers. Ces remerciements s'adressent aussi aux responsables du laboratoire d'hydrochimie et de l'environnement de la Faculté des Sciences et Technologie de l'UNIKIN.

Financement

Cet article n'a bénéficié d'aucun financement ou ressource pouvant influencer les conclusions des auteurs.

Conflit d'Intérêt

Aucun conflit d'intérêt apparent n'a été déclaré ou décelé par les auteurs.

Considérations éthiques

Les auteurs du présent papier respectent les principes d'intégrité scientifique (absence de plagiat, données vérifiables, transparence, etc.) proclamés par la charte de la RCST.

Contribution des auteurs

Les contributions à cette étude ont été multiples.

B.M.E. : Conception et initiation de l'étude.

M.E.D., L.M.J. et K.L.M. : Encadrement scientifique et supervision de l'étude.

M.N.S. et K.T.J. : Traitement et analyse statistique des données.

K.K.O. : Analyse des échantillons.

ORCID des Auteurs

Tshiyoyo I.S. : <https://orcid.org/0009-0004-5432-1405>;

Ngalula M.S. : <https://orcid.org/0009-0005-7381-1546>;

Kilembe T.J. : <https://orcid.org/0000-0002-0028-8011>;

Makiese L.J. : <https://orcid.org/0000-0003-2146-5694>;

Lufuluabo K.M. : <https://orcid.org/0009-0000-9952-8603>;

Kimazowa K.O. : <https://orcid.org/0009-0009-0691-3365>;

Eyul'Anki M.D. : <https://orcid.org/0009-0003-9739-8333>;

Makaly B.E. : <https://orcid.org/0009-0005-0790-6627>.

Références bibliographiques

- Ahoussi, K. E., & Yapo, A. P. (2021). Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 19(4), 36–50. <http://www.afriquescience.net>
- Akonga, M.-M. O., Gizanga, R. V., Musibono, D. E., Carvalho, F. P., Poté, J., & Atibu, E. K. (2026). Accumulation of toxic metals in sediments and oligochaetes around urban uncontrolled landfills in Kinshasa, DR Congo. *Environmental Geochemistry and Health*, 48(3), 120. <https://doi.org/10.1007/s10653-026-02980-9>

- Atibu, E. K., Kamika, I., Mudogo, C. N., Lusamba, S. N., Mulaji, C. K., Carvalho, F. P., & Poté, J. (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(2), Article 34. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00524-y>
- Atibu, E. K., Lacroix, P., Sivalingam, P., Ray, N., Giuliani, G., Mulaji, C. K., Otamonga, J.-P., Mpiana, P. T., Slaveykova, V. I., & Poté, J. (2018). High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: An impact assessment of the Dilala, Lulu and Mpingiri Rivers, Democratic Republic of the Congo. *Chemosphere*, 191, 1008–1020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.052>
- Casado, C., Wildi, M., Ferrari, B. J. D., & Werner, I. (2021). *Stratégie d'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse*. Centre suisse d'écotoxicologie appliquée, EPFL-ENAC-IIE-GE.
- Danala, D. S., Nga, L. E., Ibrahim, B. A., Tiki, D., & Mamdem, L. E. (2024). Évaluation du niveau de pollution des déchets des sites miniers de Kombo-Laka. *Afrique SCIENCE*, 24(2), 14. <http://www.afriquescience.net>
- Dipakama, C. M., Watha-Ndoudy, N., Nzila, J. de D., Moukaha, I. N., & Kimpouni, V. (2024). Impact de l'exploitation artisanale de l'or sur l'environnement dans le secteur de Dimonika (massif forestier de Mayombe, Congo). *ESI Preprints*, 29, 234–234. <https://esipreprints.org/index.php/esipreprints/article/view/1088>
- Hamkary, S. R., Suwardji, S., Fauzi, T., & Kusnarta, I. (2024). Characteristics of physical and chemical properties of soil after gold processing (Case study of unlicensed gold mining in the District Sumbawa Regency, Indonesia). *International Journal of Science, Technology & Management*, 5(3), 591–599. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v5i3.1095>
- Husson, F., Cornillon, P.-A., Guyader, A., Jégou, N., Josse, J., Klutchnikoff, N., Le Pennec, E., Matzner-Løber, E., Rouvière, L., & Thieurmél, B. (2018). *R pour la statistique et la science des données : Pratique de la statistique*. Saic Édition–Université Rennes 2. <https://r-stat-sc-donnees.github.io/>
- IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences.
- Kyale, K. J., Tabu, A., Ganza, B. G., Mamiki, K. M., Alebadwa, M. S., Kalala, J.-C., Welepele, C., Tréfon, T., & Lamarre, E. (2024). Évaluation préliminaire des impacts environnementaux de l'orpaillage dans le domaine de chasse de Bili-Uéré en République Démocratique du Congo. *Vertigo* – La revue internationale en sciences de l'environnement, 24(3). <https://doi.org/10.4000/14ehm>
- Mahmoud, S. E., Zahedifar, M., Akbar, M. A., & Khosravani, P. (2024). Integrated application of multiple indicators and geographic information system-based approaches for comprehensive assessment of environmental impacts of toxic metals-contaminated agricultural soils and vegetables. *Science of the Total Environment*, 926, 171747. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171747>
- Mangambu, M. J. D. D. (2023). *Exploitation minière semi-industrielle dans la rivière Aruwini, Bassin du Congo (RDC) : Impératifs et exigences du développement durable des communautés locales*. Edilivre.
- Mantel, S., Dondeyne, S., & Deckers, S. (2023). World Reference Base for Soil Resources (WRB). In *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 206–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00161-0>
- Mavakala, B. K., Poté, J., Carvalho, F. P., Mulaji, C. K., Otamonga, J.-P., et al. (2022). Evaluation of heavy metal content and potential ecological risks in soil samples from wild solid waste dumpsites in developing country under tropical conditions. *Environmental Challenges*, 7, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100461>
- Mbuyamba, N. S., Tshilanda, D. D., Mpiana, T. P., d'Almeida, G. A. F., Yalo, N., Ngbolua, K.-T.-N. J.-P., & Kaki, C. (2024). Seasonal variations in the physico-chemical characteristics of Lite-Bala gold site in the DRC. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(2), 12071–12080. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00861>
- Mbuyamba, N. S., Tshilanda, D. D., Mpiana, T. P., Ngbolua, K.-T.-N. J.-P., & Kaki, C. (2026). Impact de l'exploitation minière artisanale de l'or sur les teneurs en cadmium, arsenic, mercure et plomb des ressources en eaux du site aurifère Lite-Bala en République Démocratique du Congo (RDC). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 20(2), 1020–1037. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v20i2.38>
- Monyuy, F. M., Fuanya, C., Hoth, N., Ouabo, R. E., Tangko, T. E., Günther, J., Esey, M. E., & Drebenstedt, C. (2024). Environmental impacts of artisanal and small-scale gold mining within Kambele and Pater gold mining sites, East Cameroun. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 89, 100.
- Mutombo, A. B. W., Atibu, E. K., Mutombo, J. M. W., Kalonda, E. M., Bakatula, E. N., Kanda, V. N., Koy, R. K., Mulaji, C. K., Carvalho, F. P., & Poté, J. (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(2), 100136.
<https://doi.org/10.1016/j.wsee.2022.10.004>
- Ngweme, G. N., Atibu, E. K., Al Salah, D. M. M., Muanamoki, P. M., Kiyombo, G. M., Mulaji, C. K., Otamonga, J.-P., & Poté, J. (2020). Heavy metal concentration in irrigation water, soil and dietary risk assessment of *Amaranthus viridis* grown in peri-urban areas in Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Watershed Ecology and the Environment*, 2, 16–24.
<https://doi.org/10.1016/j.wsee.2020.09.001>
- planetGOLD. (2024). *Forum mondial sur l'exploitation minière artisanale et à petite échelle de l'or, Batangas, Philippines, 3–5 juin 2024 : Rapport de réunion*. Fonds pour l'environnement mondial, Programme des Nations unies pour l'environnement, Programme des Nations unies pour le développement, Organisation des Nations unies pour le développement industriel, & Conservation International.
- Wang, Y., Wu, X., Liu, Z., & Shi, L. (2024). Characteristics and trend prediction of groundwater chemical evolution under the influence of sea water in the Jiaojia gold mining area, China. *Mine Water and the Environment*, 43(1), 53–72.
<https://doi.org/10.1007/s10230-023-00968-w>
- Yapo, A. P. (2024). *Impact des activités d'orpaillage sur les environnements hydrologiques et la recharge des aquifères : Cas du Département de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)* [Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody].
<https://theses.hal.science/tel-05509760v1>.