



## Évaluation des risques écologiques liés aux éléments potentiellement toxiques (métaux lourds) dans les eaux et les sédiments du fleuve Congo : variations saisonnières et dominance du cadmium

[Ecological risk assessment of potentially toxic elements (Heavy Metals) in water and Sediments of the Congo River: Seasonal variations and cadmium dominance]

Franck Kianza Mesa<sup>1,2</sup>, Lumière Kembisa Nkutu<sup>2,3</sup>, Hygin Mulonso<sup>1,3</sup>, Christian Mpingaja Matamba<sup>3,4</sup> & Jacques Pasa Matadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa/Ngaliema, R.D.Congo;

<sup>2</sup>Département de Biotechnologie, Substances Naturelles et Environnement, Centre de Recherche en Sciences Appliquées et Technologiques (CRSAT) Kinshasa/Gombe; R.D.Congo

<sup>3</sup>Mention Chimie et Industrie, Faculté des Sciences et Technologie, Université de Kinshasa, BP 190 Kin XI, R.D.Congo;

<sup>4</sup>Département de Chimie, Commissariat Général à l'Energie Atomique (CGEA/CREN-K), Kinshasa Mont-Amba, R.D.Congo

### Résumé

Les fleuves constituent des voies majeures de transport et d'accumulation des contaminants dans les écosystèmes aquatiques, en particulier dans les régions tropicales soumises à une urbanisation rapide. Cette étude vise à évaluer la variabilité saisonnière de la contamination par les métaux lourds dans les sédiments du tronçon Maluku–Kinshasa du fleuve Congo (République Démocratique du Congo). Des échantillons de sédiments ont été collectés pendant la saison sèche et la saison des pluies et analysés pour les concentrations en Cd, Co, Cr, Cu, Pb et Zn. Plusieurs indices géochimiques, notamment le facteur de contamination (CF), l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur d'enrichissement (EF), l'indice de charge de pollution (PLI), l'indice de pollution de Nemerow et l'indice de risque écologique potentiel (PERI), ont été utilisés pour évaluer la qualité des sédiments et le risque écologique associé. Les résultats révèlent une variabilité saisonnière marquée, avec des niveaux de contamination significativement plus élevés durant la saison des pluies. Parmi les métaux analysés, le cadmium (Cd) présente les facteurs de contamination les plus élevés et contribue le plus fortement à l'indice de risque écologique. Les indices globaux (PLI et Nemerow) indiquent une pollution modérée à élevée pendant la saison des pluies, tandis que les conditions observées en saison sèche reflètent une contamination relativement faible. L'analyse statistique multivariée met en évidence un regroupement saisonnier prononcé des échantillons, indiquant un contrôle hydrologique du transport et de la déposition des métaux. Les résultats suggèrent que le ruissellement induit par les précipitations joue un rôle déterminant dans la mobilisation des particules contaminées vers le système fluvial. Le cadmium a été identifié comme le principal facteur de risque écologique dans la zone étudiée. Ces résultats soulignent l'importance d'un suivi environnemental saisonnier et de la mise en œuvre de stratégies de gestion ciblées visant à réduire les apports métalliques dans les systèmes fluviaux urbains tropicaux.


**Mots-clés :** Cadmium ; métaux lourds ; contamination des sédiments ; évaluation du risque écologique ; variabilité saisonnière.

### Abstract

Rivers act as major pathways for the transport and accumulation of contaminants in aquatic ecosystems, particularly in rapidly urbanizing tropical regions. This study assessed the seasonal variability of heavy metal contamination in sediments from the Maluku–Kinshasa section of the Congo River (Democratic Republic of Congo). Sediment samples were collected during the dry and rainy seasons and analyzed for Cd, Co, Cr, Cu, Pb, and Zn concentrations. Multiple geochemical indices including contamination factor (CF), geo-accumulation index (Igeo), enrichment factor (EF), pollution load index (PLI), Nemerow pollution index, and potential ecological risk index (PERI) were used to evaluate sediment quality and ecological risk. Results revealed clear seasonal variability, with significantly higher contamination levels during the rainy season. Among the analyzed metals, cadmium (Cd) showed the highest contamination factors and contributed most to the ecological risk index. Global indices (PLI and Nemerow) indicated moderate to high pollution during the rainy season, while dry season conditions reflected relatively low contamination levels. Multivariate statistical analysis highlighted strong seasonal clustering of samples, indicating hydrological control over metal transport and deposition. The findings suggest that rainfall-driven runoff plays a key role in mobilizing metal-contaminated particles into the river system. Cadmium was identified as the dominant ecological risk driver in the studied section. These results emphasize the importance of seasonal monitoring and targeted management strategies to mitigate metal inputs in tropical urban river systems.

**Keywords:** Cadmium; Heavy metals; Sediment contamination; Ecological risk assessment; Seasonal variability

\*Auteur correspondant: Franck Kianza Mesa, ([mesafranck96@gmail.com](mailto:mesafranck96@gmail.com)). Tél. : (+243) 836 314 232

 <https://orcid.org/0009-0002-0314-4475>; Reçu le 13/04/2026; Révisé le 08/05/2026; Accepté le 01/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i2.289>

Copyright: ©2026 Mesa 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

Les sédiments fluviaux jouent un rôle majeur dans l'accumulation et le transport des métaux lourds dans les écosystèmes aquatiques (Förstner & Wittmann, 2012). Dans les régions tropicales, les variations hydrologiques saisonnières influencent fortement la mobilisation des contaminants métalliques vers les systèmes fluviaux (Islam et al., 2015).

Parmi les éléments potentiellement toxiques, le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le chrome (Cr) et le cobalt (Co) suscitent une attention particulière en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur capacité de bioaccumulation (Alloway, 2013).

L'évaluation de la contamination métallique des sédiments repose sur plusieurs indices géochimiques tels que le facteur de contamination (FC), le facteur d'enrichissement (FE), l'indice de géo-accumulation (Igeo) et l'indice de risque écologique potentiel (PERI) (Müller, 1969 ; Håkanson, 1980). Ces outils permettent d'évaluer le niveau de pollution ainsi que les risques écologiques associés aux métaux lourds dans les environnements aquatiques.

Dans le bassin du fleuve Congo, les données relatives à la contamination métallique des sédiments restent encore limitées malgré l'urbanisation croissante et les pressions anthropiques observées dans la ville de Kinshasa.

La présente étude vise ainsi à évaluer la contamination métallique des eaux et des sédiments dans le tronçon Maluku–Kinshasa du fleuve Congo, en mettant particulièrement l'accent sur la variabilité saisonnière et le risque écologique associé aux métaux lourds.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Réactifs et étalons

Tous les réactifs utilisés pour la préparation des solutions d'extraction étaient de qualité analytique (Merck Pro-analysis). Toutes les solutions et dilutions ont été préparées avec de l'eau bidistillée (18,2 MΩ·cm). Des solutions mères étalons à 1 000 mg/L pour différents éléments ont été préparées à partir de sels de haute pureté ou de solutions étalons commerciales (pureté > 99,99 %, VWR International).

### 2.2. Analyse des propriétés physiques du sédiment et de l'eau

L'échantillonnage du sédiment et de l'eau ont été réalisés systématiquement à l'aide de coordonnées GPS, d'un flacon et d'une tarière manuelle. À chaque point d'échantillonnage, environ 1 kg de sédiment a été

prélevé, placé dans un sac plastique propre et étiqueté, puis transporté au laboratoire. Après séchage, homogénéisation et quartage, les échantillons ont été séchés à l'air libre et tamisés à travers un tamis de 2 mm afin d'isoler les fractions fines. Les échantillons de sédiments ont été broyés au mortier pour obtenir une poudre fine de granulométrie inférieure à 180 µm, puis séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 h avant analyse (Margesin & Schinner, 2005). Toutes les analyses ont été réalisées en trois exemplaires. Les propriétés physico-chimiques des sédiments ont été caractérisées en laboratoire. Les échantillons d'eau, ont subi les mêmes jeux d'analyses que les sédiments. Le pH du sédiment a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre multiparamètre portable (YSI 556 HACH 2100P) après dilution dans de l'eau distillée dans un rapport de 1:10 (Margesin & Schinner, 2005).

Au total, cinq stations d'échantillonnage ont été investiguées (Maluku, Kinkole, Baramoto, Kinsuka et Chanic-métal). Pour chaque station, trois échantillons d'eau et trois échantillons de sédiments ont été prélevés durant chaque saison (saison sèche et saison des pluies), soit un total de 30 échantillons analysés.

### 2.3. Préparation des échantillons pour l'analyse ICP-OES

Les échantillons de sédiments ont été séchés à l'air libre pendant cinq jours à température ambiante afin d'éliminer l'humidité résiduelle. Les échantillons secs ont ensuite été broyés et homogénéisés à l'aide d'un mortier en agate, puis tamisés à travers un tamis de 63 µm afin d'obtenir une fraction granulométrique fine et homogène, généralement considérée comme la plus représentative pour l'analyse des métaux traces. Pour la digestion acide, environ 0,5 g de sédiment sec ont été pesés avec précision et transférés dans des béchers en téflon.

Les échantillons ont été digérés à l'aide d'un mélange d'acides concentrés composé de HNO<sub>3</sub> et HCl (eau régale) afin de solubiliser les métaux présents dans la matrice sédimentaire. Le mélange a été chauffé sur une plaque chauffante à environ 95 °C pendant 2 heures jusqu'à obtention d'une solution claire. Après refroidissement, les solutions digérées ont été filtrées à l'aide de papier filtre Whatman et transférées dans des fioles jaugées de 50 mL, puis complétées avec de l'eau ultrapure. Les solutions obtenues ont ensuite été conservées à 4 °C jusqu'à l'analyse. Des solutions étalons ont été utilisées pour la calibration de l'instrument, et des blancs analytiques ont été réalisés afin de vérifier l'absence de contamination pendant les étapes de préparation. Les concentrations élémentaires

(Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn) ont été quantifiées par spectrométrie d'émission optique à plasma inductif (ICP-OES, série Agilent 5100) (Muyumba et al., 2019 ; Van Ranst, 1999).

#### 2.4. Estimation de l'intensité de la contamination des ETM dans les sédiments

Dans l'optique d'estimer l'intensité de cette pollution potentielle observée, le facteur d'enrichissement (FE), le facteur de contamination (FC), l'index de géo-accumulation (Igeo), et du facteur de risque potentiel écologique (FRPE) ont été calculés. Leur principe est fondé sur la comparaison des valeurs mesurées par rapport à des valeurs de références telles que les moyennes des teneurs en éléments de la croûte terrestre.

##### 2.4.1. Détermination du facteur d'enrichissement dans les sédiments

Le facteur d'enrichissement (FE) est un outil très nécessaire pour déterminer le degré de pollution des métaux lourds d'origine anthropique à l'égard des sédiments de sites donnés. Ce facteur est déterminé à l'aide de l'expression ci-après :

$$FE = \frac{[Me]_{mes} / [Fe]_{mes}}{[Me]_{Th} / [Fe]_{Th}}$$

Avec,  $[Me]_{mes}$  = La concentration de l'élément dosé dans l'échantillon de sédiment prélevé sur les sites sujets aux activités anthropiques.

$[Fe]_{mes}$  = La concentration du fer dans l'échantillon du sédiment prélevé sur les sites sujets aux activités anthropiques.

$[Me]_{Th}$  = La concentration de l'élément dosé dans l'échantillon de sédiment du site de référence, site naturel ou site sans activités anthropiques. C'est en quelque sorte la concentration de référence de l'élément dosé. Cette teneur s'appelle généralement la teneur du bruit de fond naturel.

$[Fe]_{Th}$  = La concentration du dans l'échantillon de sol du site de référence, site naturel ou site sans activités anthropiques (Nehemiah Mukwevho 2025, Leila 2024).

Tableau I. Échelle d'intensité de pollution en fonction des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement (FE)

Classes	Valeurs	Intensité de pollution
1	$FE \leq 2$	Enrichissement anthropique inexistant ou faible
2	$2 < FE < 5$	Enrichissement modéré
3	$5 < FE < 20$	Enrichissement significatif
4	$20 < FE < 40$	Enrichissement très fort
5	$FE \geq 40$	Enrichissement extrême

##### 2.4.2. Détermination du facteur de contamination dans les sédiments

Le FC permet de connaître le niveau de contamination métallique des sédiments. Il est calculé à partir de la relation:

$$CF = \frac{C_m}{C_b}$$

Où :  $C_m$  : concentration du métal dans le sol et  $C_b$  : est la valeur du fond géochimique du métal (Adebiyi et al., 2022 ; Asamoah et al., 2021 ; Tchoukeu et al., 2025).

Tableau II. Niveau de contamination en rapport avec les valeurs du FC

Valeurs de FC	Contamination
$FC < 1$	Faible contamination
$1 \leq FC < 3$	Contamination modérée
$3 \leq FC < 6$	Contamination considérable
$FC \geq 6$	Très forte contamination

##### 2.4.3. Détermination de l'indice de géoaccumulation dans les sédiments

L'indice de géoaccumulation est un paramètre empirique mais nécessaire pour quantifier une accumulation d'un métal dans les sédiments contaminés. Cet indice fut conçu par Müller en 1979. Il est noté par le symbole Igeo et s'exprime suivant l'expression ci-après :

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{[Me]_{mes}}{[Me]_{Th}} \times 1,5 \right)$$

Le coefficient 1,5 est un facteur de correction utilisé pour tenir compte des variations naturelles des concentrations de fond d'un métal donné, qui peuvent être attribuées à la variabilité minéralogique naturelle du sol (Bouida et al., 2025 ; Latif et al., 2025 ; Mukwevho et al., 2025).

**Tableau III.** Différentes classes selon Müller cité par Bouida et al. (2025).

Classe	Valeurs	Niveau de contamination
0	Igéo < 0	Sol non contaminé
1	0 < Igéo < 1	De non contaminé à modérément contaminé
2	1 < Igéo < 2	Modérément contaminé
3	2 < Igéo < 3	De modérément contaminé à sévèrement contaminé
4	3 < Igéo < 4	Fortement contaminé
5	4 < Igéo < 5	De sévèrement contaminé à extrêmement contaminé
6	5 > Igéo	Traduit un sol extrêmement contaminé.

#### 2.4.4. Index de pollution (PLI)

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$$

#### 2.4.5. Détermination du facteur de risque potentiel écologique et de l'indice de risque écologique

Le facteur de risque potentiel écologique et l'indice de risque écologique font partie intégrante des outils très indispensables dans les processus d'évaluation du degré des pollutions métalliques des compartiments des écosystèmes terrestres et aquatiques tels que les sols et sédiments. Il sied de signaler que le facteur de risque potentiel écologique est déterminé par le produit des valeurs du facteur réponse toxique avec celles du facteur de contamination de l'élément métallique donné. D'où la notation ci-après : **FRPE** = **Tf x FC** (Chen et al., 2018 ; Adebisi et al., 2022 ; Asamoah et al., 2021 ; Bouida et al., 2025 ; Mukweho et al., 2025 ; Sikakwe, 2019).

Avec Tf = facteur de réponse toxique d'un métal donné ; FC = Facteur de contamination de l'élément métallique donné.

Les informations relatives aux valeurs de facteur réponse toxique des métaux lourds sont consignées dans le **tableau IV** ci-dessous.

**Tableau IV.** Valeurs de facteur réponse toxique de quelques éléments métalliques

Types de métaux lourds	Background values (Bn) Miyombo forest	Valeurs de facteur réponse toxique (Tf)
Cd	0,608	30
As		10
Pb	0,089	5
Cu	42,040	5
Co	20,21	5
Cr	2,821	2
Zn	0,734	1
Mn	5,875	1

**Tableau V.** Critère pour le degré de risque écologique basé sur le facteur de risque écologique (FRPE)

Échelle des valeurs du facteur de risque écologique (FRPE)	Risque écologique
FRPE < 40	Faible risque écologique
40 ≤ FRPE < 80	Risque écologique potentiel modéré
80 ≤ FRPE < 160	Risque écologique potentiel considérable
160 ≤ FRPE < 320	Risque écologique potentiel élevé
FRPE > 320	Risque écologique très élevé

#### 2.5. Analyse statistique des données

Les données expérimentales obtenues ont été traitées à l'aide des logiciels Excel 2019 et XLSTAT. Les résultats sont exprimés sous forme de moyenne ± écart-type des analyses réalisées en triplicata.

Une analyse descriptive a été utilisée afin d'évaluer la variabilité des paramètres physico-chimiques et des concentrations métalliques entre les différentes stations et saisons.

Les corrélations entre les métaux dans les eaux et les sédiments ont été déterminées à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson afin d'identifier les relations géochimiques potentielles entre les éléments étudiés.

Par ailleurs, des représentations graphiques sous forme d'histogrammes et de matrices de corrélation (heatmaps) ont été réalisées pour faciliter l'interprétation des données et l'identification des tendances saisonnières.

## 3. Résultats et Discussion

### 3.1. Propriétés physico-chimiques des eaux

Pour cerner au mieux la pollution des eaux et sédiments du fleuve Congo, plusieurs paramètres sont étudiés entre autres la conductivité électrique, le TDS, la salinité, l'oxygène dissout, le pH et les métaux potentiellement toxique à l'instar du cadmium (Cd), cobalt (Co), du cuivre (Cu), du fer (Fe), du plomb (Pb) et du zinc (Zn).

Les principales propriétés physico-chimiques des échantillons d'eaux sont résumées dans le tableau 6 ci-dessous. Les paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux du fleuve Congo au niveau des stations Maluku, Kinkole, Baramoto, Kinsuka et Chanic-métal montrent des variations saisonnières notables entre la saison sèche et la saison des pluies.

Tableau VI. Paramètres physico-chimiques de l'eau

Site/paramètres	Saison	Maluku	Kinkole	Baramoto	Kinsuka	Chanic-métal	Normes
T (°C)	Pluie	27,77±1,13	27,68±1,20	27,70±1,18	28,00±1,30	28,01±1,24	
	Sèche	25,32±1,21	26,19±1,13	24,87±1,65	25,13±1,14	26,00±1,13	
EC (µS/cm)	Pluie	107,00±5,03	77,33±2,52	74,67±3,21	57,67±3,79	61,00±7,55	200-800
	Sèche	89,03±2,32	43,51±1,19	32,60±1,91	31,62±2,13	61,00±7,55	
TDS (ppm)	Pluie	53,33±2,52	36,33±4,04	37,33±2,08	29,00±1,73	30,67±3,51	500-600
	Sèche	42,12±2,31	18,71±1,21	46,01±2,52	19±0,52	26±2,03	
Salinité (ppm)	Pluie	0,05 ±0,00	0,03±0,01	0,03±0,00	0,02±0,00	0,03±0,00	<1000
	Sèche	0,04 ±0,00	0,05±0,01	0,02±0,00	0,02±0,00	0,04±0,00	
OD (ppm)	Pluie	1,80±0,05	30,43±1,85	26,73±2,47	11,17±0,64	2,37±0,06	>6
	Sèche	0,89±0,01	12,53±0,74	17,45±0,23	0,94±0,04	0,90±0,02	
pH	Pluie	7,01±0,09	6,89±0,05	7,20±0,06	5,96±0,03	6,59±0,01	6-9
	Sèche	6,80±0,02	6,60±0,01	7,01±0,08	6,70±0,01	6,50±0,03	
Coordonnées GPS	E	4°02'52.5"	4°18'59.6"	4°19'07.2"	4°19'53.3"	4°19'42.1"	
	N	/15°33'24,9"	/15°30'32,5"	/15°20'19,2"	/15°13'10,9"	/15°14'06,9"	

La température des eaux du fleuve Congo varie entre 24,87 °C et 28,01 °C, avec des valeurs légèrement plus élevées durant la saison des pluies. Cette variation reste toutefois typique des environnements tropicaux et n'indique pas de perturbation thermique significative du système fluvial équatorial (Allan & Castillo, 2007).

Les valeurs de conductivité électrique restent relativement faibles dans toutes les stations (≈31–107 µS/cm), ce qui indique une faible minéralisation de l'eau. Des conductivités faibles sont typiques des grands fleuves tropicaux caractérisés par un important débit et une dilution des ions dissous (Gaillardet et al., 2003). Les concentrations de solides dissous totaux (TDS) suivent la même tendance et restent largement inférieures aux limites recommandées pour les eaux naturelles.

Les solides dissous totaux (TDS) présentent également des concentrations faibles (18,71 à 53,33 ppm), très inférieures à la limite recommandée (500–600 ppm). Ces résultats indiquent que l'eau du fleuve Congo dans la zone étudiée reste faiblement chargée en sels dissous, confirmant une bonne qualité physico-chimique générale. La salinité est extrêmement faible (0,02 à 0,05 ppm), ce qui est attendu pour un système fluvial continental éloigné des influences.

En revanche, l'oxygène dissous (OD) montre des variations importantes entre les stations et les saisons.

Certaines valeurs mesurées, notamment 0,89 ppm à Maluku et 0,90 ppm à Chanic-métal en saison sèche, sont nettement inférieures au seuil recommandé (>6 ppm). Ces faibles concentrations pourraient indiquer une consommation importante d'oxygène liée à la décomposition de matière organique ou à des rejets anthropiques locaux (Chapman et al., 2013).

Le pH varie entre 5,96 et 7,20, ce qui correspond globalement à un milieu légèrement acide à neutre et reste dans l'intervalle recommandé pour les eaux naturelles (6–9). La légère acidification observée à la station Kinsuka pendant la saison des pluies pourrait favoriser la mobilisation de certains métaux dans la colonne d'eau (WHO, 2017). Dans l'ensemble, les paramètres physico-chimiques indiquent que les eaux du fleuve Congo présentent une qualité globale relativement bonne, bien que certaines variations saisonnières suggèrent l'influence des apports anthropiques et des processus hydrologiques.

Les analyses physico-chimiques du fleuve Congo s'accordent avec les travaux de Masawula Kazwenga et al. et de Mwanamoki et al. (p. 11). Elles confirment qu'une faible conductivité électrique (31–107 µS/cm), des températures stables (24–28 °C) et une salinité quasi nulle caractérisent un système équatorial sain à fort débit (pp. 10–11). Cependant, l'acidification saisonnière observée pendant la saison des pluies, avec

un pH descendant jusqu'à 5,96 à la station Kinsuka, s'explique par le lessivage des sols forestiers acides et les apports urbains (pp. 10-11). Comme le soulignent Mwanamoki et al., cette baisse de pH est critique car elle favorise la dissolution, la mobilisation et la toxicité des métaux lourds dans la colonne d'eau (p. 11).

En revanche, les chutes brutales d'oxygène dissous à Maluku (0,89 ppm) et à Chanic-métal (0,90 ppm) en saison sèche traduisent une asphyxie locale sévère qui corrobore les conclusions de [Bipendu et al. \(2025\)](#) (pp. 10-11). Ces faibles concentrations s'expliquent par le déversement d'effluents urbains et industriels bruts non traités, dont la dégradation bactérienne consomme l'oxygène disponible (p. 11).

Ce phénomène est accentué en saison sèche par la baisse du niveau des eaux, transformant les zones industrielles et stagnantes en pièges physico-chimiques où s'accumulent les sédiments et les éléments potentiellement toxiques (p. 11). À l'inverse, les zones de rapides comme Kinsuka bénéficient d'une réoxygénation continue par brassage mécanique (p. 11).

### 3.2. Concentrations en ETM dans différents échantillons de sédiments

L'analyse des métaux potentiellement toxiques dans les sédiments révèle une variabilité saisonnière marquée entre la saison sèche et la saison des pluies ([tableau VII](#)).

*Tableau VII. Teneurs en métaux potentiellement toxiques des sédiments (ppm)*

Éch	Saison	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn
S1	Sèche	ND	8,33±0,87	0,13±0,01	5,67±0,14	149,78±5,23	5,52±0,32	1,34±0,001
	Pluie	13,10±0,06	0,31±0,01	2,41±0,23	3,00±0,08	106,71±4,52	7,72±0,35	5,30±0,08
S2	Sèche	ND	6,34±0,04	0,14±0,02	3,21±0,04	150,41±4,93	11,15±0,43	13,47±0,32
	Pluie	9,00±0,03	0,10±0,00	1,40±0,12	2,70±0,03	268,70±8,32	2,40±0,05	2,10±0,07
S3	Sèche	ND	2,12±0,12	0,14±0,00	2,16±0,09	195,75±5,30	10,55±0,87	21,34±0,76
	Pluie	3,31±0,02	0,10±0,00	0,73±0,01	2,10±0,04	98,01±3,21	2,20±0,32	3,30±0,13
S4	Sèche	ND	3,12±0,14	0,14±0,00	1,50±0,03	196,39±5,12	10,21±0,92	24,31±1,52
	Pluie	2,63±0,41	0,20±0,00	0,63±0,01	1,20±0,01	111,9±4,03	2,00±0,05	2,10±0,03
S5	Sèche	ND	2,14±0,34	0,33±0,01	1,83±0,04	155,48±3,19	8,74±0,52	17,42±2,52
	Pluie	6,50±0,51	0,21±0,00	0,82±0,03	1,80±0,07	150,3±5,76	2,8±0,05	2,7±0,04
<b>Normes</b>		0,003	-	<100	50-100	-	30-50	150-300

Légende : Ech : échantillon, S1-S5 : sédiment, ND : non détecté

Les résultats obtenus pour les sédiments montrent une variabilité importante entre les stations et entre les saisons. Les concentrations de Co, Cr, Cu, Pb et Zn restent globalement faibles et inférieures aux valeurs de référence généralement utilisées pour l'évaluation de la contamination sédimentaire. Ces niveaux relativement faibles suggèrent que ces métaux proviennent principalement de sources géologiques naturelles, issues de l'altération des roches du bassin versant ([Kabata-Pendias, 2011](#)).

Le cadmium (Cd) n'a pas été détecté dans les sédiments durant la saison sèche dans toutes les stations. En revanche, des concentrations relativement élevées apparaissent pendant la saison des pluies, atteignant 13,10 ppm à Maluku et 9,00 ppm à Kinkole. Ces valeurs dépassent largement la norme de référence (0,003 ppm), indiquant une contamination significative en cadmium pendant la saison des pluies. Ce phénomène a été largement observé dans les systèmes fluviaux tropicaux où les précipitations jouent un rôle

majeur dans la mobilisation des contaminants (Islam et al., 2015).

Cette augmentation saisonnière suggère que le Cd est probablement introduit dans le système fluvial par le ruissellement et l'érosion des sols contaminés du bassin versant. Le cobalt (Co) présente des concentrations relativement faibles dans l'ensemble des stations, avec des valeurs généralement inférieures à 8 ppm en saison sèche et très faibles en saison des pluies. Cela suggère une contribution géologique naturelle plutôt qu'une source anthropique dominante.

Les concentrations en chrome (Cr) sont également très faibles et largement inférieures au seuil de référence (<100 ppm), indiquant une contamination négligeable pour cet élément. Le cuivre (Cu) varie entre 1,20 et 5,67 ppm, ce qui reste inférieur aux valeurs généralement associées à une pollution significative dans les sédiments fluviaux. Le plomb (Pb) présente des concentrations modérées en saison sèche (jusqu'à 11,15 ppm à Kinkole), mais ces valeurs diminuent considérablement durant la saison des pluies. Cette diminution pourrait être liée à la dilution et à la dispersion hydrodynamique des particules sédimentaires. Le zinc (Zn) montre également des variations importantes entre les saisons, avec des concentrations

relativement plus élevées en saison sèche (jusqu'à 24,31 ppm à Kinsuka) comparées à la saison des pluies. Globalement, les résultats indiquent que les sédiments du fleuve Congo dans la zone étudiée présentent une contamination métallique globalement faible à modérée, à l'exception du cadmium qui apparaît comme l'élément dominant de la contamination.

Les sédiments jouent un rôle fondamental dans le cycle des métaux lourds dans les environnements aquatiques. Ils agissent à la fois comme puits et comme source secondaire de contaminants, pouvant libérer les métaux vers la colonne d'eau lorsque les conditions physico-chimiques changent (Förstner & Wittmann, 2012).

### 3.3. Concentrations en ETM dans différents échantillons des eaux.

Les concentrations métalliques mesurées dans les eaux montrent des variations importantes entre les stations et les saisons. Le cadmium (Cd) présente des concentrations comprises entre 0,001 et 0,021 ppm en saison sèche, dépassant dans plusieurs stations la norme recommandée (0,003 ppm). Les concentrations restent également élevées durant la saison des pluies, suggérant une contamination persistante de l'eau par le cadmium.

Tableau VIII. Teneurs en métaux potentiellement toxiques des eaux (ppm)

Ech	Saison	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn
E1	Sèche	0,008±0,000	0,28±0,00	0,03±0,00	0,82±0,00	0,37±0,00	ND	0,43±0,01
	Pluie	0,009±0,000	0,003±±0,000	0,20±±0,00	ND	0,23±±0,00	ND	0,13±0,00
E2	Sèche	0,001±0,000	0,19±0,00	0,04±0,00	0,82±0,01	0,50±0,01	ND	0,20±0,00
	Pluie	0,007±0,000	0,005±±0,000	0,01±±0,00	0,10±±0,00	0,14±±0,00	ND	0,18±±0,00
E3	Sèche	0,002±0,000	0,20±0,01	0,001±0,000	0,79±0,03	0,37±0,01	ND	0,20±0,01
	Pluie	0,008±0,000	0,005±±0,000	0,04±±0,00	0,12±±0,00	1,00±±0,08	ND	0,18±±0,02
E4	Sèche	0,015±0,000	0,11±0,00	0,07±0,00	0,79±0,01	0,32±0,00	ND	0,14±0,01
	Pluie	0,005±0,000	0,003±±0,000	0,01±±0,00	0,13±±0,00	0,63±±0,01	ND	0,16±±0,01
E5	Sèche	0,021±0,000	0,10±0,00	0,02±0,00	0,79±0,02	0,42±0,00	ND	0,18±0,00
	Pluie	0,003±0,000	0,003±±0,000	0,01±0,00	0,09±±0,00	0,35±0,00	ND	0,16±±0,01
<b>Normes</b>		0,003	-	0,05	2	0,3	0,01	3

Légende : Ech : échantillon, E1-E5 : eau ND : non détecté

Le cobalt (Co) est présent à des concentrations relativement faibles et diminue nettement durant la saison des pluies, probablement en raison de la dilution hydrologique. Les concentrations en chrome (Cr) restent globalement inférieures au seuil de 0,05 ppm, indiquant une faible contamination pour cet élément. Le cuivre (Cu) varie entre 0,79 et 0,82 ppm en saison

sèche, mais diminue fortement durant la saison des pluies. Ces valeurs restent inférieures à la limite recommandée de 2 ppm. Le fer (Fe) présente des concentrations relativement variables, atteignant 1,00 ppm à Baramoto pendant la saison des pluies, ce qui dépasse la norme de référence (0,3 ppm). Cela pourrait refléter la mobilisation naturelle des particules riches en fer dans les sédiments (Chapman et al., 2013).

Le plomb (Pb) n'a pas été détecté dans les échantillons d'eau, ce qui suggère que cet élément est principalement associé à la phase sédimentaire plutôt qu'à la colonne d'eau. Le zinc (Zn) présente des concentrations relativement faibles et bien inférieures à la norme de 3 ppm. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que le cadmium et le fer constituent les principaux métaux préoccupants dans la colonne d'eau, tandis que les autres éléments restent à des niveaux relativement faibles (Luoma & Rainbow, 2008). La comparaison entre les sédiments et l'eau révèle une dynamique intéressante du transport des métaux dans le système fluvial.

La présence élevée de Cd dans les sédiments durant la saison des pluies suggère un processus de dépôt sédimentaire contrôlé par le ruissellement et l'érosion du bassin versant. Les précipitations favorisent le transport des particules contaminées vers le fleuve, où elles se déposent ensuite dans les zones de faible énergie hydraulique. La faible présence de certains métaux dans l'eau mais leur accumulation dans les sédiments confirme que les sédiments jouent un rôle de réservoir de contaminants métalliques dans les systèmes fluviaux (Luoma & Rainbow, 2008). Ces résultats sont cohérents avec de nombreuses études menées dans les fleuves tropicaux, où les variations saisonnières de débit contrôlent fortement la distribution des métaux dans l'eau et les sédiments.

### 3.4. Les indices de contamination avec références citées dans le texte

Les histogrammes des indices géochimiques obtenus à partir des données sédimentaires du fleuve Congo mettent en évidence une variabilité spatiale importante de la contamination métallique entre les différentes stations d'échantillonnage. Le facteur d'enrichissement (FE), calculé par normalisation sur le Fe, confirme également la singularité du Cd par rapport aux autres métaux (figure 1). Ce type d'indice est couramment utilisé pour distinguer les apports lithogéniques naturels des contributions anthropiques, en particulier dans les environnements aquatiques soumis aux activités humaines (Sutherland, 2000 ; Förstner & Wittmann, 2012).

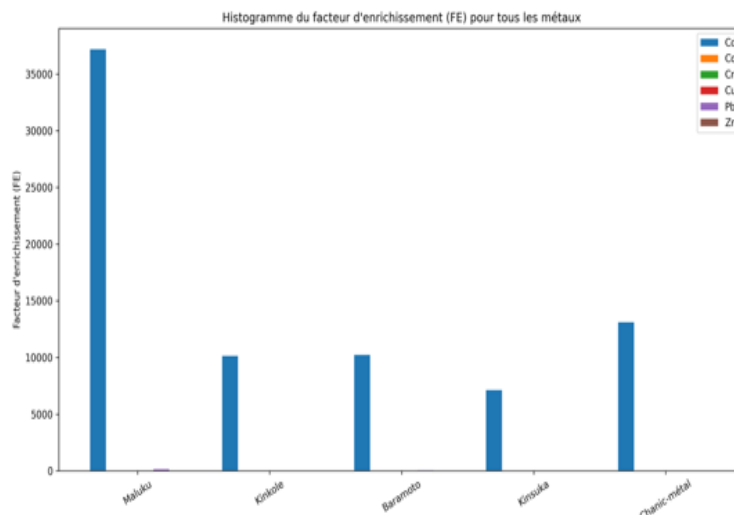


Figure 1. Histogramme du facteur d'enrichissement (FE) pour les métaux Cd, Co, Cr, Cu, Pb et Zn dans les sédiments du fleuve Congo. Le FE a été calculé en normalisant les concentrations métalliques par le Fe, selon l'approche couramment utilisée en géochimie environnementale.

L'indice de géo-accumulation (Igeo) confirme ces observations. Les valeurs d'Igeo calculées pour le cadmium dépassent 5 dans certaines stations, ce qui correspond à la classe « extrêmement contaminée » selon la classification de Müller (1969). Cette situation indique que le cadmium constitue le principal élément responsable de la dégradation de la qualité sédimentaire dans le tronçon étudié du fleuve Congo figure 2.

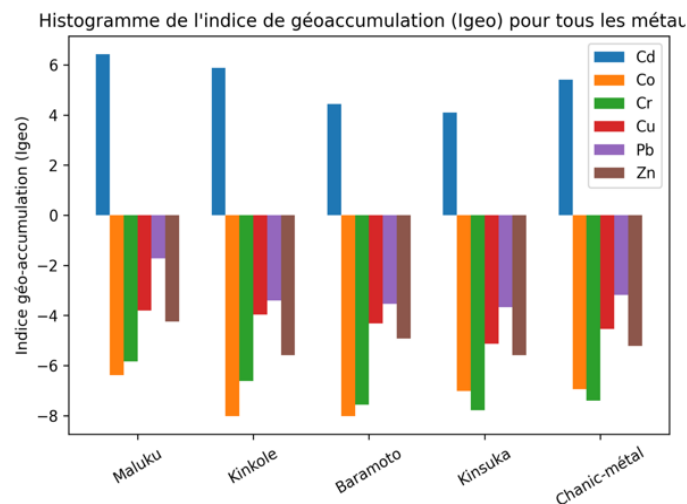
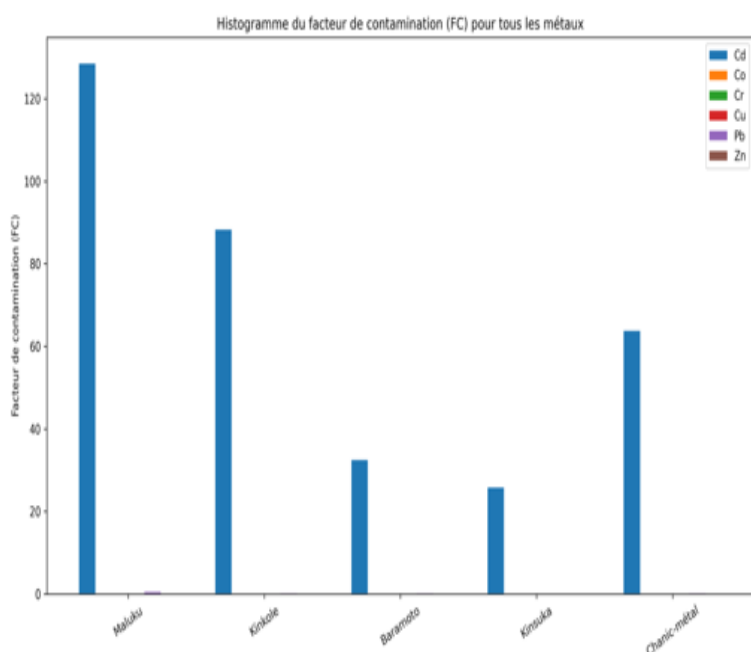


Figure 2. Histogramme de l'indice de géo-accumulation (Igeo) pour les métaux Cd, Co, Cr, Cu, Pb et Zn dans les sédiments du fleuve Congo (stations Maluku, Kinkole, Baramoto, Kinsuka et Chanic-métal) pendant la saison des pluies. L'indice Igeo a été calculé selon la formule proposée par Müller (1969) en utilisant les valeurs de fond géochimique de la croûte continentale supérieure (Rudnick & Gao, 2003).

Le facteur de contamination (FC) présente des valeurs beaucoup plus élevées pour le Cd que pour les autres métaux, ce qui traduit une contamination importante par cet élément. Selon Håkanson (1980), des valeurs élevées du facteur de contamination reflètent une pression anthropique marquée et constituent un signal précoce de dégradation de la qualité sédimentaire.

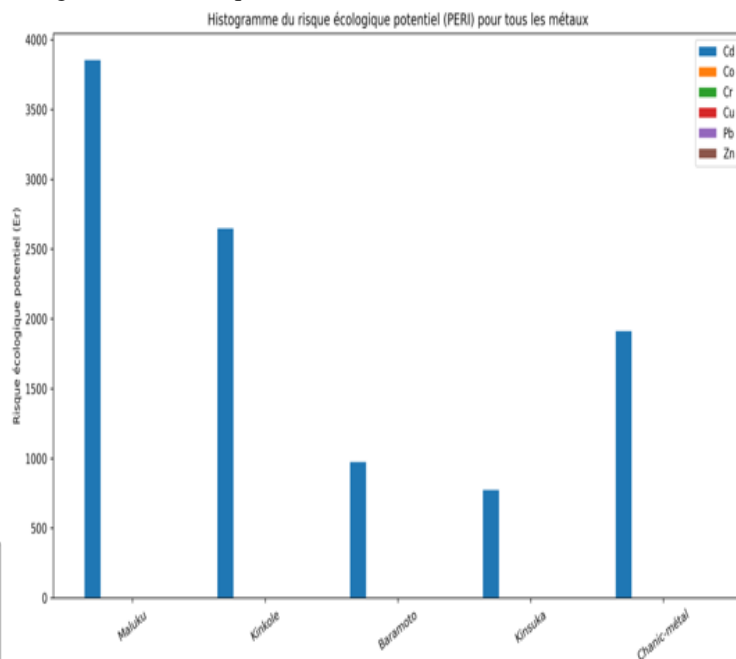
Le facteur de contamination (CF) montre des valeurs particulièrement élevées pour le cadmium dans les stations de Maluku et de Kinkole, ce qui indique une contamination importante des sédiments par cet élément. Selon la classification proposée par Håkanson (1980), des valeurs de CF supérieures à 6 correspondent à une contamination très élevée, suggérant une contribution anthropique significative dans ces zones.



**Figure 3.** Histogramme du facteur de contamination (FC) pour les métaux Cd, Co, Cr, Cu, Pb et Zn dans les sédiments du fleuve Congo. Les valeurs les plus élevées observées pour le Cd indiquent une contamination importante par cet élément (Håkanson, 1980).

L'évaluation du risque écologique potentiel (PERI) montre également que le cadmium contribue de manière dominante au risque écologique global. Selon l'approche développée par Håkanson (1980), ce métal possède un facteur de toxicité élevé, ce qui amplifie fortement son influence dans le calcul du risque écologique. Les valeurs élevées de PERI observées

dans les stations Maluku et Kinkole indiquent donc un risque écologique potentiellement important pour les organismes benthiques.



**Figure 1 :** Histogramme du risque écologique potentiel monomial ( $E_r$ ) pour les métaux étudiés dans les sédiments du fleuve Congo. Le cadmium présente la contribution la plus importante au risque écologique potentiel total (Håkanson, 1980)

L'indice de risque écologique potentiel (PERI), exprimé ici à travers le facteur monomial de risque écologique ( $E_r$ ), met en évidence une contribution largement dominante du cadmium. Cela s'explique par le facteur de toxicité élevé attribué à ce métal dans le modèle de Håkanson (1980). Les autres éléments, bien que présents dans les sédiments, contribuent beaucoup moins au risque écologique global.

En revanche, l'indice de charge de pollution (PLI) reste un indicateur synthétique global par station. Comme il repose sur l'ensemble des facteurs de contamination, il peut parfois atténuer le signal d'un seul métal dominant lorsque les autres éléments restent à de faibles niveaux. Cette situation a déjà été observée dans plusieurs études sur les sédiments fluviaux contaminés, où un métal prioritaire structure le risque tandis que le PLI traduit une pollution globale plus modérée (Tomlinson et al., 1980 ; Islam et al., 2015).

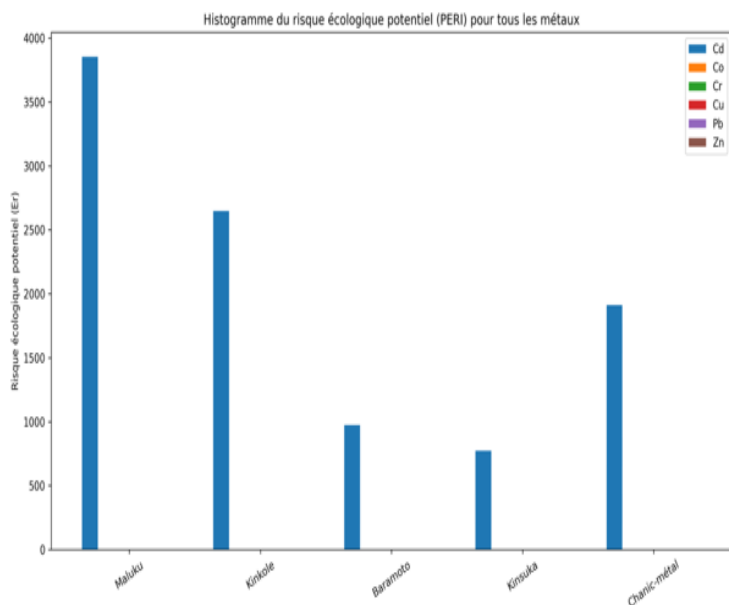


Figure 5 : Histogramme de l'indice de charge de pollution (PLI) par station dans les sédiments du fleuve Congo. Le PLI, proposé par Tomlinson et al. (1980), permet d'évaluer la pollution globale en intégrant plusieurs métaux

Les variations saisonnières observées dans les indices de contamination peuvent être attribuées à l'influence des processus hydrologiques. Pendant la saison des pluies, l'intensification du ruissellement favorise le transport de particules contaminées depuis le bassin versant vers le fleuve. Ce phénomène a été largement documenté dans les systèmes fluviaux tropicaux, où les précipitations augmentent l'érosion des sols et le transfert de métaux vers les sédiments fluviaux (Islam et al., 2015).

### 3.5. Corrélations des métaux dans les sédiments

La matrice de corrélation de Pearson appliquée aux métaux présents dans les sédiments met en évidence plusieurs relations significatives entre les éléments étudiés. Les corrélations positives observées entre Pb et Zn, ainsi qu'entre Cu et Zn, suggèrent que ces métaux peuvent partager des sources communes ou être contrôlés par des processus géochimiques similaires dans le système sédimentaire. Ce type d'association est fréquemment observé dans les environnements fluviaux contaminés par des apports anthropiques, notamment liés aux activités urbaines et industrielles (Luoma & Rainbow, 2008). La relation entre Fe et certains métaux traces reflète également le rôle important des oxydes de fer dans la fixation et l'adsorption des métaux lourds dans les sédiments. Les minéraux riches en fer peuvent agir comme des phases porteuses pour plusieurs éléments traces, favorisant

leur accumulation dans la matrice sédimentaire (Förstner & Wittmann, 2012). En revanche, certaines corrélations faibles ou négatives indiquent que certains métaux peuvent provenir de sources différentes ou être influencés par des processus géochimiques distincts. Par exemple, le cadmium montre souvent un comportement différent des autres métaux dans les sédiments fluviaux en raison de sa forte mobilité et de son association avec les particules fines et la matière organique (Alloway, 2013). Globalement, les résultats suggèrent que la distribution des métaux dans les sédiments du fleuve Congo est contrôlée à la fois par des sources lithogéniques naturelles et par des apports anthropiques localisés, ce qui est cohérent avec les observations faites dans plusieurs systèmes fluviaux tropicaux (Islam et al., 2015).

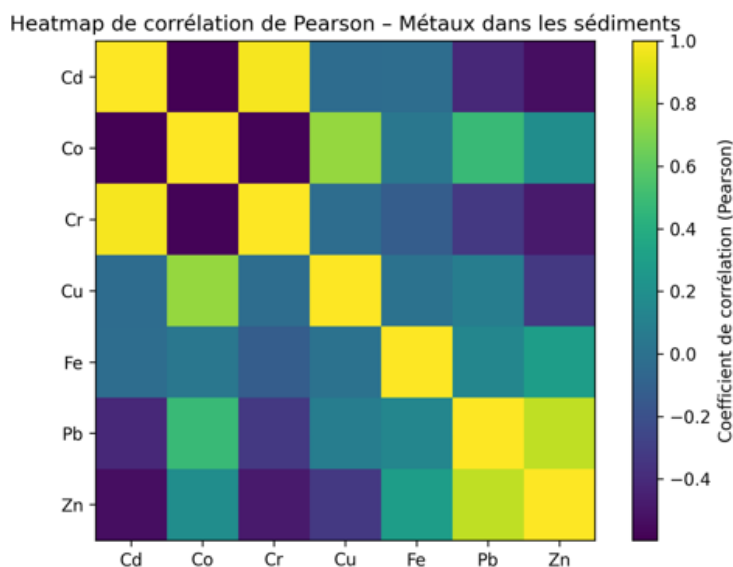


Figure 6. Heatmap Pearson – métaux dans les sédiments

### 3.6. Corrélations des métaux dans l'eau

La matrice de corrélation de Pearson obtenue pour les métaux dissous dans l'eau montre également des relations intéressantes entre certains éléments. Les corrélations positives entre Co, Cu et Zn suggèrent qu'ils peuvent être associés à des processus de dissolution similaires ou provenir de sources communes dans le milieu aquatique. Dans les systèmes fluviaux, les métaux dissous sont souvent influencés par plusieurs facteurs physico-chimiques tels que le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique, qui contrôlent leur solubilité et leur spéciation chimique (Chapman et al., 2013).

L'absence de corrélation significative impliquant le Pb dans l'eau peut s'expliquer par sa faible solubilité et sa forte tendance à s'adsorber sur les particules

sédimentaires. Par conséquent, le plomb est généralement plus abondant dans les sédiments que dans la phase dissoute de la colonne d'eau (Förstner & Wittmann, 2012). Par ailleurs, certaines corrélations impliquant le Fe peuvent refléter l'influence des processus redox dans le milieu aquatique. Les variations du fer dissous peuvent être liées aux changements des conditions d'oxydoréduction, qui contrôlent également la mobilité de plusieurs métaux traces dans les environnements aquatiques (Chapman et al., 2013).

Ainsi, les matrices de corrélation obtenues pour l'eau et les sédiments confirment que la distribution des métaux dans le fleuve Congo résulte d'une combinaison de processus géochimiques naturels et d'influences anthropiques, comme cela a été observé dans de nombreux systèmes fluviaux à travers le monde (Islam et al., 2015).

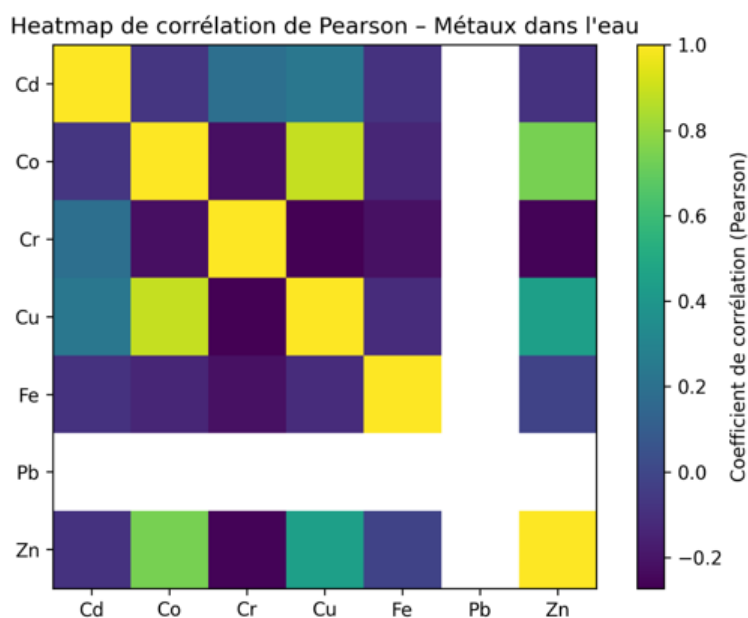


Figure VII. Heatmap Pearson – métaux dans l'eau

Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que la contamination métallique des sédiments du fleuve Congo dans la zone Maluku–Kinshasa est dominée par le cadmium, tandis que les autres métaux présentent des niveaux de contamination relativement faibles. La variabilité saisonnière observée souligne l'importance des processus hydrologiques dans la mobilisation et la redistribution des métaux dans les systèmes fluviaux tropicaux.

### 3.7. Discussion comparative internationale

Les résultats obtenus montrent que la contamination métallique des sédiments est fortement

influencée par la saisonnalité hydrologique. Les indices de pollution indiquent une augmentation significative de la contamination durant la saison des pluies, ce qui suggère un rôle déterminant du ruissellement dans le transport des particules contaminées vers le fleuve. Cette dynamique saisonnière est cohérente avec les observations réalisées dans plusieurs bassins fluviaux tropicaux. Par exemple, dans le fleuve Niger (Nigeria), Olowo et al. (2025) ont montré que les concentrations en métaux lourds augmentaient significativement durant la saison des pluies en raison de l'érosion des sols et du transport sédimentaire. Des tendances similaires ont été observées dans la lagune Ébrié en Côte d'Ivoire, où les sédiments accumulent des métaux issus des activités urbaines et industrielles (Gbombélé Soro et al., 2009). Cependant, contrairement à certains systèmes fluviaux fortement industrialisés où la contamination est multi-métallique, la présente étude met en évidence une dominance du cadmium dans la contribution au risque écologique potentiel. Cette situation suggère l'existence d'une source anthropique spécifique plutôt qu'une pollution diffuse généralisée. Dans les environnements tropicaux, les fortes précipitations favorisent également la mobilisation des particules fines enrichies en métaux lourds, qui se déposent ensuite dans les zones de faible énergie hydraulique (Ray, 2024). Ce mécanisme pourrait expliquer la distribution spatiale observée dans le tronçon étudié.

## 5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la qualité environnementale du tronçon Maluku–Kinshasa du fleuve Congo à travers l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau, la détermination des concentrations en métaux lourds dans l'eau et les sédiments, ainsi que l'application de plusieurs indices géochimiques de pollution. Les paramètres physico-chimiques mesurés dans l'eau montrent globalement des valeurs compatibles avec celles observées dans les systèmes fluviaux tropicaux. La température varie dans une gamme typique des environnements tropicaux, tandis que les valeurs de conductivité électrique et de solides dissous totaux restent relativement faibles, indiquant une minéralisation modérée de l'eau.

Le pH varie entre légèrement acide et neutre, ce qui reste conforme aux recommandations internationales pour les eaux naturelles. Toutefois, certaines valeurs relativement faibles d'oxygène dissous observées dans certaines stations pourraient

indiquer une consommation biologique de l'oxygène liée à la décomposition de la matière organique ou à des apports anthropiques locaux.

L'analyse des métaux dans les sédiments révèle une distribution hétérogène entre les stations et les saisons. Les concentrations de Co, Cr, Cu, Pb et Zn restent globalement faibles par rapport aux valeurs de référence, suggérant que ces éléments proviennent principalement de sources lithogéniques naturelles. En revanche, le cadmium présente des concentrations nettement plus élevées durant la saison des pluies, ce qui suggère un apport anthropique potentiel ou un phénomène de mobilisation des particules contaminées par le ruissellement du bassin versant. Les sédiments jouent ainsi un rôle important de réservoir pour les métaux lourds dans le système fluvial, comme cela a été largement documenté dans les environnements aquatiques. Les concentrations métalliques mesurées dans la colonne d'eau restent globalement faibles pour la plupart des éléments, ce qui suggère une faible contamination de la phase dissoute. L'absence ou les très faibles concentrations de plomb dans l'eau indiquent que ce métal est principalement associé à la phase particulaire et sédimentaire. Ce comportement est cohérent avec la forte affinité du plomb pour les particules fines et les oxydes métalliques présents dans les sédiments.

L'évaluation des indices géochimiques confirme ces observations. Le facteur de contamination (FC) et l'indice de géo-accumulation (Igeo) indiquent une contamination généralement faible pour la majorité des métaux étudiés. Cependant, le cadmium présente des valeurs nettement plus élevées dans certaines stations, ce qui suggère une contribution anthropique notable. Le facteur d'enrichissement (FE) renforce également cette interprétation en montrant un enrichissement plus marqué du cadmium par rapport aux autres métaux. L'indice de charge de pollution (PLI) indique une pollution globale relativement faible à modérée des sédiments, ce qui suggère que la qualité environnementale générale du site reste acceptable. Toutefois, l'indice de risque écologique potentiel (PERI) met en évidence une contribution importante du cadmium au risque écologique global en raison de son facteur de toxicité élevé, comme proposé dans la méthodologie de Håkanson.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que la qualité environnementale du fleuve Congo dans la zone étudiée reste globalement satisfaisante, bien que certaines stations montrent des signes d'enrichissement en cadmium. La variabilité saisonnière observée

suggère que les processus hydrologiques, notamment le ruissellement et l'érosion des sols pendant la saison des pluies, jouent un rôle important dans le transport et la redistribution des métaux dans le système fluvial. Ces résultats soulignent l'importance de mettre en place un suivi environnemental régulier afin de mieux comprendre l'évolution de la contamination métallique dans ce secteur du fleuve Congo et de prévenir les risques écologiques potentiels associés aux activités anthropiques dans le bassin versant.

## Remerciements

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements au Professeur MPUTU KANYINDA Jean-Noël pour ses remarques pertinentes, ses conseils scientifiques et la relecture critique du manuscrit, qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude au laboratoire de sol et pédologie de la faculté d'Agronomie de l'Université de Lubumbashi pour son soutien technique durant les travaux expérimental.

Les auteurs remercient enfin toutes les personnes et institutions ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail scientifique.

## Financement

Les auteurs déclarent n'avoir reçu aucun financement spécifique pour cette étude.

## Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts

## Considérations éthiques

Cette étude n'a impliqué ni sujets humains ni animaux. Toutes les analyses ont été réalisées conformément aux bonnes pratiques de laboratoire et aux normes scientifiques en vigueur.

## Contribution des auteurs

F.M.K. a conçu l'étude et a rédigé le manuscrit principal et la méthodologie ; a participé à la collecte des échantillons, des données et à l'analyse statistique

L.N.K. a contribué à la revue bibliographique, à la révision du manuscrit, à la gestion des données et à la discussion des résultats.

H.M. a participé à la collecte des échantillons et aux analyses physico-chimiques

C.M.M. a participé à la collecte des échantillons

J.M.P. a assuré la révision du manuscrit et à la discussion des résultats ; a validé les données, et a donné l'approbation pour la version finale à soumettre.

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

## ORCID des auteurs

Mesa K.F : <https://orcid.org/0009-0002-0314-4475>

Nkutu K.L : <https://orcid.org/0009-0005-5710-0699>

Mulonso H : <https://orcid.org/0009-0002-7392-9139>

Matamba M.C : <https://orcid.org/0009-0000-3732-3346>

Matadi P : <https://orcid.org/0009-0002-4880-1053>

## Références bibliographiques

- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream ecology: Structure and function of running waters*. Springer.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer.
- Asamoah B.D, Asare A, Okpati S.W Aidoo P. 2021 ; Heavy metal levels and their ecological risks in surface soils at Sunyani magazine in the bono region of Ghana. Scientific African vol. 13 e00937. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00937>.
- Bipendu, M. N., Tangou, T. T., Lutonadio, G. K., & Musibono, E. D. (2025). Caractérisation de la qualité physico-chimique des effluents et évaluation de leur impact environnemental sur l'écosystème aquatique urbain de Kinshasa. *Journal des Sciences et de l'Environnement / CSNRDC*, 5(2), 112-126. [https://csnrdc.net/wp-content/uploads/journal/published\\_paper/volume-5/issue-2/abCGQpRY.pdf](https://csnrdc.net/wp-content/uploads/journal/published_paper/volume-5/issue-2/abCGQpRY.pdf)
- Chapman, P. M., Wang, F., Janssen, C., Persoone, G., & Allen, H. (2013). Ecotoxicology of metals in aquatic sediments.
- D. K. Muyumba et al., « Factors of Variation of Soil Chemical Properties in Metalliferous Ecosystems of Tenke-Fungurume, Katanga, Democratic Republic of the Congo », *Tropicultura*, n° 1, 2019, doi : 10.25518/2295-8010.250. E. Van Ranst, *Manual for the soil chemistry and fertility laboratory : analytical methods for soils and plants equipment and management of consumables*. Gent, Belgium : University of Ghent, International Training Centre for Post-Graduate Soil Scientists, 1999.
- F. M. Adebisi, E. O. Olalekan, O. T. Ore, et A. O. Adegunwa, « Speciation, source identification, and risk assessments of potentially toxic metals in oil-impacted soils around petroleum products retailing stations », *Pet. Res.*, p. S2096249522000503, juill. 2022, doi : 10.1016/j.ptlrs.2022.07.004.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (2012). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (2012). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer.
- Luoma, S. N., & Rainbow, P. S. (2008). *Metal contamination in aquatic environments*. Cambridge University Press.
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Pollution load index.
- G.U. Sikakwe. Evaluation of stream sediment contamination by potentially toxic elements around mining and farming areas (SE Nigeria). *Journal of Mining and Environment (JME)*. Vol. 10, No. 4, 2019, 833-851. DOI: 10.22044/jme.2019.8180.1690
- Gaillardet, J., Viers, J., & Dupré, B. (2003). Trace elements in river waters. WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality*. (Chapman et al., 2013).
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., & Masunaga, S. (2015). Metal contamination in river sediments. Chapman et al., 2013).
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press. (Islam et al., 2015).
- Kazwenga Masawula, P., Luwesi Ngonzo, C., Bomangwa Ibebeke, Y., Shikayi Kalume, J., Kinakina Kianawa, D., Sabimana Gasigwa, R., & Aseke Lukuke, Y. (2026). Analyse multivariée des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux de surface et de consommation : Impacts des dynamiques hydrologiques et anthropiques. *Revue Congolaise des Sciences et Technologies / CRREBaC*, 5(1), 84-98. [rct.cd](http://rct.cd)
- L. Bouida, F. Ya'acoub, M. H. Jaafar, H. Abdullah, et W. Fadhullah, « Human and Ecological Risk Assessment of Soil and Plants Metal Contamination in a Tropical Municipal Solid Waste Dumping Site », *Soil Sediment Contam. Int. J.*, vol. 34, n° 1, p. 34-70, janv. 2025, doi : 10.1080/15320383.2024.2329951.

- L. Chen *et al.*, « Speciation, Fate and Transport, and Ecological Risks of Cu, Pb, and Zn in Tailings from Huogeqi Copper Mine, Inner Mongolia, China », *J. Chem.*, vol. 2018, p. 1-8, 2018, doi : 10.1155/2018/2340542.
- Luoma, S. N., & Rainbow, P. S. (2008). *Metal contamination in aquatic environments*. Cambridge University Press.
- Håkanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. *Water Research*, 14, 975-1001. (Gbombélé Soro *et al.*, 2009 ;
- Maria Latif, Iqra Nasim, Mubeen Ahmad, Rab Nawaz, Arifa Tahir, Muhammad Atif Irshad, Aamal A. Al-Mutairi, Ali Irfan, Sami A. Al-Hussain, Magdi E. A. Zaki. Human health risk assessment of drinking water using heavy metal pollution index: a GIS-based investigation in mega city. *Applied Water Science* (2025) 15 :12 <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02341-w>.
- Müller, G. (1969). Index of geo-accumulation in sediments. (Bouida *et al.*, 2025 ;
- Mwanamoki, P. M., Unyumbe, J. D., Museme, L. B., & Kabamba, M. T. (2024). Évaluation des teneurs en éléments traces métalliques (cadmium et plomb) dans l'eau, les sédiments et les espèces biologiques du Pool Malebo (Fleuve Congo), RD Congo : Risques écotoxicologiques et variations saisonnières. *European Scientific Journal (ESJ)*, 17(25), 174-192. <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/14530/14455> [1, 2]
- N. Mukwevho *et al.*, « Seasonal Pollution Levels and Heavy Metal Contamination in the Jukskei River, South Africa », *Appl. Sci.*, vol. 15, n° 6, p. 3117, mars 2025, doi : 10.3390/app15063117.
- N. Mukwevho *et al.*, « Seasonal Pollution Levels and Heavy Metal Contamination in the Jukskei River, South Africa », *Appl. Sci.*, vol. 15, n° 6, p. 3117, mars 2025, doi : 10.3390/app15063117.
- R. Margesin *et* F. Schinner, Éd., *Manual for soil analysis : monitoring and assessing soil bioremediation*. in *Soil biology*, no. 5. Berlin ; New York: Springer, 2005.
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals. (Rudnick & Gao, 2003).
- Y.B, Tchoukeu, Nga L.E, Tehna.N, Welba. M, Nguetnkam. J-P. (2025). Heavy Metals Contaminations and Ecological Risk Assessment in Soils, Mining Wastes and Sediments of the Ngoura Gold Mining Area, Eastern Cameroon.

Journal of Geoscience and Environment Protection, 2025, 13(3), 238-268.