



Caractérisation de la qualité physico-chimique des effluents et sédiments de carrière de la société CARRIGRES à Kinsuka Pêcheur dans la ville de Kinshasa (RD Congo)

[Characterization of the physicochemical quality of effluents and sediments from the CARRIGRES quarry in Kinsuka Pêcheur in the city of Kinshasa (DR Congo)]

Samuel Kabengele Mayimbi ^{1*}, Willy Swana Lusasi ², Fils Empwal Milau ¹, Michel Lufuluabo Kapembo ³ & René Valu Gizanga ¹

¹ Université de Kinshasa (UNIKIN), B.P. 190 Kinshasa XI, Mention Sciences et Gestion de l'Environnement, Faculté des Sciences et Technologies, R.D. Congo.

² Université de Kinshasa (UNIKIN), B.P. 190 Kinshasa XI, Mention Sciences de la Vie, Faculté des Sciences et Technologies, R.D. Congo.

³ Université de Kinshasa (UNIKIN), B.P. 190 Kinshasa XI, Mention Chimie et Industrie, Faculté des Sciences et Technologies, R.D. Congo

Résumé

L'exploitation des carrières s'est intensifiée en raison de l'expansion urbaine et des besoins croissants en matériaux de construction dans la ville de Kinshasa en République Démocratique du Congo. Cette étude a pour objectif de caractériser la qualité physico-chimique des effluents et des sédiments de carrière de la société CARRIGRES ainsi que l'eau du Fleuve Congo au point de rejet en vue de mettre en évidence l'influence de rejet des effluents issus de cette activité sur la qualité des milieux récepteurs. Le monitoring de la qualité des effluents et des sédiments a été réalisé à travers de prélèvement in situ pour quelques paramètres et dosage au laboratoire pour d'autres paramètres physico-chimiques entre les mois de février et octobre 2025. Au laboratoire, les paramètres d'intérêt ont été déterminés à l'aide du spectrophotomètre à fluorescence X et spectrophotomètre à UV. Les résultats obtenus montrent que la concentration de quelques paramètres physico-chimiques des effluents et sédiments de carrière CARRIGRES sont en contradiction avec les valeurs normatives fixées par l'OMS avec comme conséquence directe, la dégradation de la qualité physico-chimique de l'eau du Fleuve Congo pour certains paramètres. Parmi les paramètres les plus préoccupants figurent notamment la turbidité (effluents de rejet = 183,4±2,8 UNT, Puisard = 182,1±1,1 UNT et effluents bruts = 161,5±1,1 UNT), la demande biochimique en oxygène (puisard = 69,02±0,21 mg/L et effluents bruts = 63,05±0,14 mg/L) et les ions phosphates (Rejet = 3,41±0,03 mg/L, Puisard = 3,17±0,07 mg/L et effluents bruts = 2,89±0,03 mg/L), traduisant une charge importante en matières en suspension et en substances susceptibles d'altérer l'équilibre écologique du milieu récepteur. L'analyse des ETMs révèle une accumulation notable de certains métaux lourds, en particulier le Pb, l'Al, le Cr et le Ni. Les effluents bruts, du puisard et de rejets sont biodégradables et, ont présenté des indices de biodégradabilité compris entre 1,5 et 1,6. L'optimisation et/ou l'installation d'un système de traitement adapté au sein de la société CARRIGRES contribuera à réduire les charges en matières en suspension, nutriments et métaux lourds avant rejet.

Mots clés : Caractérisation, Physico-chimique, Effluent, Sédiments, Carrière.

Abstract

Quarry exploitation has intensified due to urban expansion and growing demand for construction materials in the city of Kinshasa in the Democratic Republic of Congo. The aim of this study is to characterize the physicochemical quality of effluents and sediments from the CARRIGRES quarry, as well as the water of the Congo River at the discharge point, in order to highlight the influence of effluent discharge from this activity on the quality of the receiving environments. The quality of effluents and sediments was monitored through in situ sampling for some parameters and laboratory testing for other physicochemical parameters between February and October 2025. In the laboratory, the parameters of interest were determined using an X-ray fluorescence spectrophotometer and a UV spectrophotometer. The results obtained show that the concentration of certain physicochemical parameters in the effluents and sediments from the CARRIGRES quarry are inconsistent with the standard values set by the WHO, with the direct consequence of a deterioration in the physicochemical quality of the water in the Congo River for certain parameters. Among the most worrying parameters are turbidity (effluent discharge = 183.4±2.8 UNT, sump = 182.1±1.1 UNT and raw effluent = 161.5±1.1 UNT), biochemical oxygen demand (sump = 69.02±0.21 mg/L and raw effluent = 63.05±0.14 mg/L) and phosphate ions (discharge = 3.41±0.03 mg/L, Sump = 3.17±0.07 mg/L and raw effluent = 2.89±0.03 mg/L), reflecting a significant load of suspended solids and substances likely to alter the ecological balance of the receiving environment. Analysis of heavy metals reveals a notable accumulation of certain heavy metals, in particular Pb, Al, Cr, and Ni. The raw effluents from the sump and discharges are biodegradable and had biodegradability indices of between 1,5 and 1,6. The optimization and/or installation of a suitable treatment system at CARRIGRES will help to reduce the loads of suspended solids, nutrients, and heavy metals before discharge.

Keywords: Characterization, Physicochemical, Effluent, Sediments, Quarry.

*Auteur correspondant: Samuel Kabengele Mayimbi, (samuelmayimbik@gmail.com). Tél. : (+243) 826 363 322

<https://orcid.org/0009-0001-5701-2518> ; Reçu le 18/02/2026 ; Révisé le 12/03/2026 ; Accepté le 03/04/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i2.256>

Copyright: ©2026 Mayimbi 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 activités extractives et minières jouent un rôle essentiel dans le développement économique de nombreux pays en fournissant des matériaux indispensables aux secteurs du bâtiment, des travaux publics et des infrastructures (The world Bank, 2024). Cependant, ces activités sont également reconnues comme l'une des principales sources de dégradation environnementale, en particulier dans les pays en développement où les mesures de contrôle et de gestion environnementale restent souvent insuffisantes (Ripley *et al.*, 1996 ; Lottermoser, 2010). Les impacts négatifs associés aux exploitations minières concernent principalement la dégradation des sols, la pollution atmosphérique et, de manière plus marquée, la contamination des ressources en eau (Banza Wa Mutombo *et al.*, 2022).

Ainsi, les industries extractives sont un secteur comprenant toutes activités d'extraction de produits minéraux présents à l'état naturel sous forme solide (houille et minerais), liquide (pétrole) ou gazeuse (gaz naturel) (Atibu, 2021). Ces activités sont responsables généralement de l'épuisement des ressources, de la pollution et de la destruction des habitats (Okerefor, 2020).

En effet, les effluents générés par les activités extractives résultent notamment des opérations de lavage des matériaux, du ruissellement sur les zones d'exploitation et du drainage des eaux en contact avec les roches exploitées. Ces effluents contiennent des concentrations élevées de matières en suspension, de composés chimiques dissous et d'éléments traces métalliques susceptibles de modifier profondément les caractéristiques physico-chimiques des milieux aquatiques récepteurs (Younger *et al.*, 2002 ; Akcil & Koldas, 2006). Du point de vue pollution, les rejets des métaux lourds et le phénomène de drainage minier acides sont les principaux enjeux de la destruction des écosystèmes (Unyumba, 2021). Une fois rejetés dans l'environnement sans traitement adéquat, ces effluents constituent une source majeure de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines.

Cependant, les paramètres physico-chimiques permettent d'apprécier l'ampleur de la pollution et d'identifier les processus physico-chimiques dominants liés aux activités extractives (Chapman, 1996 ; APHA, 2017). Ainsi, la caractérisation physico-chimique des effluents des carrières est une approche fondamentale pour évaluer leur qualité et leur niveau

de dangerosité pour les écosystèmes récepteurs (Banza wa Mutombo *et al.*, 2022).

Par ailleurs, en milieu urbain, les impacts des effluents issus des carrières et des exploitations minières sont souvent exacerbés par la proximité des populations et l'utilisation directe des eaux réceptrices à des fins domestiques, agricoles ou halieutiques (Ilunga *et al.*, 2020). La ville de Kinshasa, en République Démocratique du Congo, est confrontée à des défis environnementaux croissants liés à l'industrialisation et à l'urbanisation rapide (Boongo, 2025). Parmi ces défis, la gestion des effluents industriels représente un enjeu majeur pour la protection des ressources en eau et la santé publique (Mokhtar *et al.* (2024). A Kinshasa, plusieurs études ont mis en évidence la vulnérabilité des cours d'eau face aux rejets industriels et artisanaux non contrôlés, soulignant la nécessité d'un suivi rigoureux de la qualité des eaux (Wanga *et al.*, 2014 ; Nzapo *et al.*, 2018 ; Munganga *et al.*, 2020 ; Pwema *et al.*, 2020).

Les zones riveraines, telles que celles situées le long du Fleuve Congo et de ses affluents, sont particulièrement exposées aux pressions environnementales liées aux activités extractives (Pwema *et al.*, 2020 ; Lusasi *et al.*, 2024).

La société CARRIGRES, implantée dans le quartier Kinsuka Pêcheur, dans la commune de Ngaliema dans la ville de Kinshasa, mène des activités d'exploitation de grès susceptibles de générer des effluents et des substances chimiques issues de l'altération des matériaux géologiques. Les métaux lourds de source naturelle ou anthropique rejetés dans un milieu aquatique sont en grande partie piégés dans les sédiments (Sin *et al.*, 2001). L'activité extractive peut donc générer des concentrations en métaux lourds supérieures au fond géochimique dans les sols, les sédiments et les eaux par rapport à celle qui existaient avant, dans les sites d'exploitation (Runnels *et al.*, 1992). Les sédiments sont considérés comme des puits recevant les métaux lourds par adsorption et par conséquent, ils sont souvent utilisés pour évaluer le degré de pollution des milieux aquatiques, les rivières étant très dynamiques. Toutefois, les données scientifiques relatives à la qualité physico-chimique de ces effluents et à leurs impacts potentiels sur l'environnement aquatique local demeurent limitées et, cette lacune entrave l'évaluation objective des risques environnementaux associés à ces activités.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'impact des effluents de carrière sur la qualité physico-chimique du Fleuve Congo en comparant les

paramètres mesurés dans les effluents de la carrière avec ceux mesurés en amont et en aval du point de rejet. Spécifiquement, il s'agit ; d'analyser la composition physico-chimique des effluents de la société Carrigrès ainsi que celle des eaux du Fleuve Congo ; de quantifier les principaux métaux lourds susceptibles de contribuer à la pollution tant dans les effluents que dans les sédiments issus de la carrière et calculer l'indice de biodégradabilité des effluents afin d'évaluer leur potentialité de décomposition biologique.

2. Matériel et méthodes

2.1. Cadre d'étude

Cette étude a eu lieu dans le quartier Kinsuka-Pêcheur situé dans la commune de Ngaliema dans la ville de Kinshasa en République Démocratique du Congo. Les échantillons, constitués des effluents, de sédiment et de l'eau ont été précisément prélevés dans la carrière de la société CARRIGRES et dans le Fleuve Congo (figure 1).

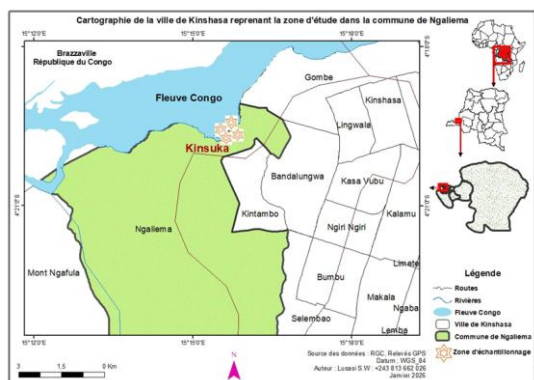


Figure 1. Cartographie de la ville de Kinshasa reprenant les sites de prélèvement des échantillons à la carrière la société CARRIGRES et dans le Fleuve Congo

Du point de vue géographique, le quartier Kinsuka-Pêcheur est borné au Nord par le Fleuve Congo, au Sud par le quartier Mama Yemo, à l'Est par le Camp Tshatshi et à l'Ouest par les rivières Mbinza et Lukunga.

2.2.1. Collecte des données

Le monitoring de la qualité des effluents et des sédiments a nécessité la réalisation de plusieurs campagnes de prélèvement, soit 10 campagnes pour les paramètres réalisés *in-situ* et 5 campagnes pour ceux analysés au laboratoire. Les prélèvements correspondent à des répliques temporels réalisés entre février et octobre 2025 afin de tenir compte de la variabilité des conditions environnementales. Le choix

des points d'échantillonnages a été basé sur l'accessibilité, la sécurité et l'éventualité de la contamination des eaux et des sédiments.

Un échantillonnage stratifié a été mis en œuvre afin de sélectionner les points de prélèvement des effluents au sein de l'entreprise CARRIGRES, en tenant compte de la trajectoire hydrodynamique des écoulements depuis leur zone de production jusqu'à leur déversement dans le Fleuve Congo. Le prélèvement des eaux au niveau du point de rejet dans le Fleuve Congo visait à évaluer l'incidence potentielle des effluents de carrière sur l'écosystème aquatique récepteur. À cet effet, des échantillons ont été collectés à une distance de 100 m en amont et de 100 m en aval du point de rejet, afin de permettre une analyse comparative de la qualité des eaux et d'apprécier l'impact spatial des rejets.

2.2.2. Caractérisation physico-chimique des échantillons

La caractérisation physico-chimique des effluents de carrière de CARRIGRES a été faite *in situ* pour quelques paramètres et au laboratoire pour d'autres paramètres.

A. Prélèvement des paramètres *in situ*

Six (6) paramètres physico-chimiques ont été mesurés *in situ*, à savoir : la température ($^{\circ}\text{C}$), le pH, la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la turbidité (NTU), l'oxygène dissous (mg/L) et la salinité (%). Les mesures de température, pH, conductivité, turbidité et salinité ont été effectuées à une profondeur de 30 cm sous la surface de l'eau, tant dans le fleuve Congo qu'au niveau des effluents de la carrière.

Pour ces relevés deux sondes multi paramètres respectivement de marque EZ-9909SP et Water Quality Tester ont été utilisées ; permettant d'obtenir rapidement des données précises sur le terrain, tout en minimisant les risques de modification des paramètres avant analyse en laboratoire.

La taille de l'échantillon était de dix (10) prélèvements pour la température, le pH, la conductivité, la turbidité et la salinité. Concernant l'oxygène dissous, cinq (5) répétitions ont été réalisées, assurant ainsi une meilleure représentativité des données collectées.

B. Analyse des paramètres au laboratoire

a) Préparation des échantillons d'effluents et d'eaux

Les échantillons d'effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo ont d'abord été préalablement décongelés à la température ambiante. Un agent

précipitant (DDTC : diéthylthiocarbamate de sodium) y a été ajouté pour que les métaux contenus dans l'eau forment un précipité. L'eau a été filtré à travers un filtre à membrane, ce dernier a été séché soigneusement à l'étuve à 60° pendant minimalement 30 minutes pour éliminer toutes traces d'humidité car l'eau interfère avec la mesure. Le filtre séché est placé dans un porte-échantillon XRF puis analyser.

b) Préparation des échantillons de sédiments

Les échantillons de sédiments ont été soumis à un process de séchage à une température de 105 °C dans une étuve de marque Memmert US pendant une durée de 24 heures, afin de garantir l'élimination complète de l'humidité. Après séchage, les échantillons ont été broyés à l'aide d'un broyeur à mortier de marque OSI. Le matériel broyé a ensuite été tamisé à l'aide de tamis de mailles fines, avec une ouverture inférieure à 100 micromètres, pour isoler les fractions de particules fines.

Pour la détermination des éléments traces métalliques (ETMs) dans les sédiments, un protocole de minéralisation par fusion alcaline a été appliqué. Dix (10) grammes de sédiment, préalablement séchés à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante et finement pulvérisés, ont été homogénéisés avec 40 g de carbonate de sodium (Na_2CO_3) dans un creuset en platine. Le mélange a été recouvert d'environ 1 g supplémentaire de carbonate de sodium, puis soumis à un chauffage progressif dans un four électrique : initialement à température modérée afin d'assurer la déshydratation complète, puis à température plus élevée jusqu'à obtention d'une fusion totale accompagnée du dégagement complet du dioxyde de carbone (CO_2). Après fusion, le creuset encore chaud a été introduit dans un bécher contenant 50 mL d'eau distillée, suivi de l'ajout de 10 mL d'acide chlorhydrique concentré (HCl). L'ensemble a été chauffé sur plaque chauffante jusqu'à dissolution complète du résidu. La silice a été rendue insoluble par évaporation à sec, puis le résidu a été repris par l'acide chlorhydrique afin d'assurer la mise en solution des éléments d'intérêt. La solution obtenue a été filtrée afin d'éliminer les particules résiduelles, puis ajustée à un volume final de 100 mL dans une fiole jaugée. Cette solution mère a servi à la quantification des éléments traces métalliques ciblés dans les sédiments.

c) Dosage des métaux lourds dans les effluents, eau et le sédiment

Au laboratoire, les paramètres d'intérêt à l'exception de la Demande Chimique en Oxygène (DCO), Demande Biologique en Oxygène en cinq jours (DBO_5) et les ions nitrates ont été déterminés à l'aide du spectrophotomètre à fluorescence X, version énergie dispersive (ED-XRF), XEPOS III, en utilisant les méthodes « FP-Water » et « Solo-water » du spectrophotomètre XEPOS III avec un étalon synthétique préparé à l'aide des produits chimiques du laboratoire et contenant certains éléments d'intérêt pour les échantillons liquide. Les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) des éléments traces métalliques d'intérêts au spectromètre ED-XRF se présentent comme suit (Jenkins et al., 1995 ; Van Grieken et Markkowitz, 2002) : Aluminium (LOD = 1 – 500 ppm et LOQ = 300 – 1500 ppm), Chrome (LOD = 0,5 – 50 ppm et LOQ = 15 – 150 ppm), Nickel (LOD = 0,5 – 50 ppm et LOQ = 15 – 150 ppm) Arsenic (LOD = 0,2 – 20 ppm et LOQ = 6 – 60 ppm), Cadmium (LOD = 0,5 – 10 ppm) et Plomb (LOD = 1 – 20 ppm et LOQ = 6 – 60 ppm).

La XRF est une méthode rapide, non destructive et multi-élémentaire, applicable à divers types de matrices (solides, poudres, liquides) et particulièrement adaptée à la détection des éléments traces métalliques dans les matrices environnementales (Beckhoff et al., 2006).

L'échantillon (constitué respectivement de l'eau, effluent et sédiment) à analyser sous un faisceau de rayons X entre en résonance et réémet lui-même des rayons X qui lui sont propres ; c'est la fluorescence. Si l'on regarde le spectre en énergie des rayons X fluorescents, on voit des pics caractéristiques des éléments présents, on sait donc quels éléments on a, et la hauteur des pics permet de déterminer en quelle quantité.

Les intensités normalisées du spectromètre proportionnelles aux concentrations ont servi de calculer les concentrations de nos échantillons par étalonnage externe. Le Pic $\text{K}\alpha_1$ (3,313 Kev) du K a servi pour le calcul, la cible HOPG Crystal de Bragg (17,4KV de tension et 1 ,99 mA de courant) a donné les surfaces qui ont été normalisées par rapport au pic de diffusion cohérente et incohérente. Les résultats ont été obtenus avec un intervalle de confiance selon t-Student à $\alpha = 0,95$.

Le spectrophotomètre à UV de marque HACH DR/2400 a été utilisé pour déterminer DCO, DBO_5 et NO_3^- dans les échantillons. L'analyse des échantillons par cette méthode repose sur la loi de Beer-Lambert : Absorbance = $\log(I^0/I)$ où I^0 est l'intensité lumineuse

avant l'échantillon et I celle en sortie de l'échantillon. L'Incertitude relative < 10%. La demande biochimique en oxygène (DBO₅) a été déterminée après incubation des échantillons pendant cinq jours à 20°C conformément aux méthodes standard APHA.

Dans le cadre de cette étude, six éléments traces métaux, notamment l'aluminium, le chrome, le nickel, l'arsenic, le cadmium et le plomb ont été ciblés et analysés respectivement dans les effluents de carrière, l'eau du Fleuve Congo et le sédiment.

2.2.3. Indice de biodégradabilité des effluents

Le rapport DCO/DBO₅ donne une indication sur la biodégradabilité des effluents. Pour un rapport inférieur à 3, l'effluent est facilement biodégradable ; au-delà de 5, l'effluent est difficilement biodégradable (Bipendu et al., 2025). La valeur de la DCO est toujours supérieure ou égale à celle de la DBO₅. Pour qu'une pollution soit biodégradable, le rapport doit être inférieur à 2,5 (Rodier et al., 2009). Ainsi, la détermination de la capacité de biodégradabilité est établie en fonction des fourchettes suivantes (Rodier, 2009 ; Bomba, 2022) :

- DCO/DBO₅ : < 3 effluent facilement biodégradable ;
- DCO/DBO₅ : > 3 < 5 effluent moyennement biodégradable ;
- DCO/DBO₅ : > 5 effluent difficilement biodégradable.

2.2.4. Analyses des données

A. Classification hiérarchique ascendante de similarité des effluents

Les analyses de regroupements, encore appelées analyses de classification ou « cluster analysis » en anglais sont réalisées pour regrouper les entités écologiques ou unités d'échantillonnage ayant des caractéristiques similaires à une variable donnée (Piérou, 1984). Elles sont basées sur la mesure des distances des similitudes entre les entités écologiques étudiées (Piérou, 1984). Selon Mergen (2002), l'étape cruciale dans une analyse de regroupement est d'utiliser un indice de similarité ou de dissimilarité le mieux adapté au type de données disponibles. Les résultats d'une analyse de classification hiérarchique ascendante est un dendrogramme (Koumelan, 1999 ; Pwema, 2014).

Dans le cadre de la présente étude, la classification hiérarchique ascendante a permis de détecter si les effluents de carrière et l'eau du Fleuve

Congo en comparaison avec la norme OMS (2011) sont suffisamment proches les uns des autres pour former des groupes distincts. Ainsi, deux types des données ont été utilisées notamment : les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques ainsi que celles des ETMs dosés dans les différents échantillons.

B. Analyse en composantes principales

Les Analyses en Composantes Principales (ACP) sont réalisées pour réduire la dimensionnalité des données tout en préservant une part significative de l'information contenue dans les variables. Cette méthode permet d'identifier les structures sous-jacentes dans les données écologiques, facilitant ainsi la comparaison des entités écologiques ou des unités d'échantillonnage basées sur leurs caractéristiques communes (Piérou, 1984).

L'ACP repose sur la mesure de la variance expliquée par les différentes composantes, ce qui est crucial pour déterminer l'efficacité de la réduction des dimensions. Selon Mergen (2002), cette analyse est particulièrement utile lorsque les données sont multivariées, permettant de visualiser les relations entre les différentes entités écologiques étudiées.

Dans le cadre de la présente étude, les données ont été centrées et réduites avant la réalisation de l'analyse en composantes principales afin d'éliminer l'effet des unités de mesure. Cette analyse a permis d'identifier si ces échantillons présentent des corrélations suffisantes pour se regrouper en fonction des valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques, des éléments traces métalliques (ETMs) dosés dans les différents échantillons ainsi de l'indice de biodégradabilité des effluents, révélant ainsi le mécanisme de mobilisation ou de rétention des polluants.

C. Traitement statistique des données

Les valeurs obtenues lors de différentes analyses d'échantillons des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo ont été encodées sur le logiciel Excel 2013 où la moyenne et l'écart-type ont été calculés pour chaque paramètre physico-chimique et toxicologique. La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro–Wilk, tandis que l'homogénéité des variances a été évaluée à l'aide du test de Hartley (1959). L'analyse de variance à un facteur a été utilisée pour comparer les moyennes des paramètres physico-chimiques entre les différents types d'échantillons (effluents bruts, puisard, effluents de rejet et eau du Fleuve Congo) (ANOVA 1) selon

Scherrer (1984), suivie du test LSD (Least Significant Difference) de Fisher tel que décrit par Saville (1990), a été réalisée au seuil de signification de 5 % (intervalle de confiance de 95 %) à l'aide du logiciel Statistix. Les graphiques ont été générés avec le logiciel Origin. La cartographie de la carrière ainsi que des points de prélèvement a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS, sur la base des coordonnées géographiques (longitude et latitude) relevées à l'aide d'un GPS de marque Garmin ETrex 64s.

3. Résultats

3.1. Paramètres physico-chimiques des effluents et l'eau du Fleuve Congo

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des effluents de carrière, réalisés dans le cadre de cette étude, sont présentés ci-après. La taille de l'échantillon comprend dix (10) répétitions pour les prélèvements in situ et cinq (5) répétitions pour les paramètres analysés en laboratoire. Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques portant la même lettre alphabétique n'indiquent pas de différence statistiquement significative ($p \geq 0,05$), tandis que celles affichant des lettres distinctes sont considérées comme statistiquement significatives les unes par rapport aux autres ($p < 0,05$).

3.1.1. Potentiel d'hydrogène

Les effluents de carrière ainsi que l'eau du fleuve Congo présentent des valeurs de pH comprises entre la neutralité et une légère basicité. Le pH mesuré dans l'eau du fleuve Congo est de $7,00 \pm 0,02$, tandis que les effluents bruts enregistrent la valeur la plus élevée ($8,07 \pm 0,03$). L'analyse de variance (ANOVA) révèle une différence très hautement significative entre les moyennes observées ($F = 46,8$; $p < 0,001$). Le test de comparaison multiple de Fisher (LSD = 0,1964) indique que les effluents bruts présentent la valeur moyenne de pH la plus élevée, suivis des effluents du puisard ($7,84 \pm 0,05$), des effluents de rejet ($7,44 \pm 0,09$) et enfin de l'eau du fleuve Congo ($7,00 \pm 0,03$) (figure 2). En référence aux normes de l'OMS (2011), qui recommandent une plage de pH comprise entre 6,5 et 8,5 pour les eaux destinées à divers usages, les valeurs enregistrées dans l'ensemble des échantillons demeurent dans l'intervalle admissible. Ces résultats suggèrent ainsi que le pH des effluents analysés respecte les seuils normatifs établis.

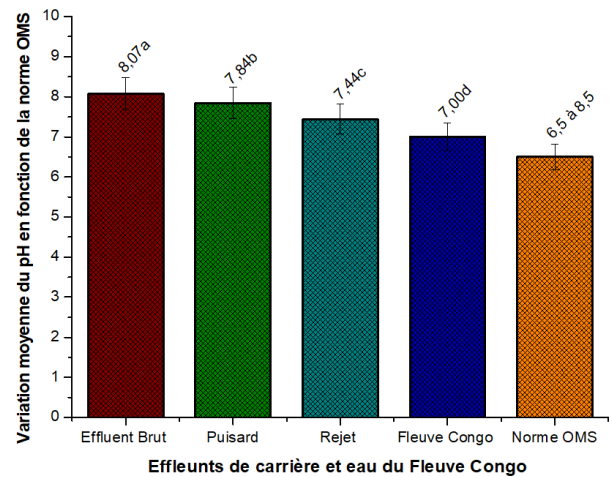


Figure 2. Variation moyenne du potentiel d'hydrogène des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS.

3.1.2. Température

L'eau de surface du Fleuve Congo ainsi que les effluents de carrière sont chaudes avec une température moyenne comprise entre $27,71 \pm 0,11$ °C (Fleuve Congo) et $29,61 \pm 0,29$ °C (Puisard) (figure 3) avec une différence statistique très hautement significative ($F = 78,5$; $p = 0,0000$; LSD = 0,2713) entre les valeurs moyennes de température relevées. En comparaison avec la valeur normative (température comprise entre 25 et 29°C) selon OMS (2011), il s'observe que les valeurs de température obtenues dans le cadre de cette étude sont dans la fourchette de la gamme exigée par l'OMS.

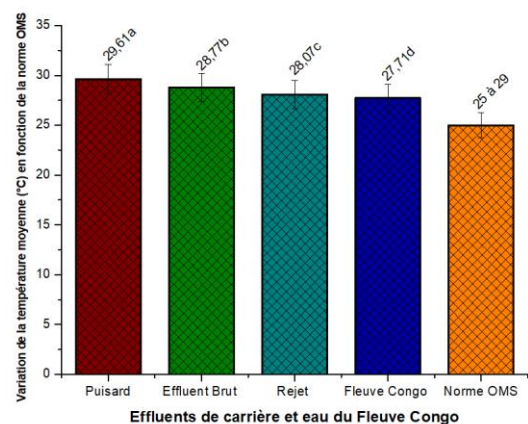


Figure 3. Variation moyenne de la température (°C) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.3. Conductivité

Il ressort des résultats consignés sur la figure 4 ci-dessous que les effluents de carrière sont plus conductibles et concentrés en ions majeurs avec une

différence statistique très hautement significative ($F = 2716$; $p = 0,0000$) entre les concentrations moyennes. La valeur critique de comparaison ($LSD = 7,4860$) révèle que les effluents de Puisard ($366 \pm 0,8 \mu S/cm$) et ceux de de Rejet ($360,4 \pm 13,92 \mu S/cm$) présentent des conductivités moyennes plus élevées suivis des effluents bruts ($326,6 \pm 1,08 \mu S/cm$) et la faible conductivité est celle de l'eau du Fleuve Congo ($81,2 \pm 2,76 \mu S/cm$). En comparaison avec les valeurs guides (conductivité comprise entre 50 et 1500 $\mu S/cm$) de l'OMS (2011), il s'observe que les conductivités moyennes de l'eau du Fleuve Congo ainsi que des effluents de carrière sont dans la fourchette de la norme OMS.

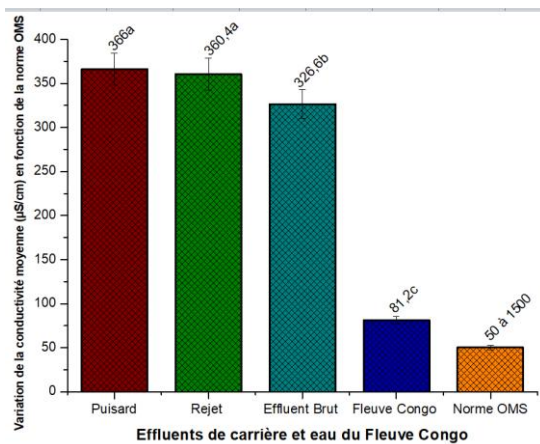


Figure 4. Variation moyenne de la conductivité ($\mu S/cm$) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.4. Turbidité

Il ressort des résultats repris sur la figure 5 ci-dessous que les effluents de carrière sont très chargés en particules solides et présentent une concentration variable de turbidité avec une différence statistique très hautement significative ($F = 9444$; $p = 0,0000$) entre les échantillons analysés et, dépassent largement la valeur normative (turbidité < 5 UNT) fixée par l'OMS (OMS, 2011). Avec une valeur critique de comparaison de 1,9727, le LSD test montre que les effluents de Rejet ainsi que du Puisard avec respectivement $183,4 \pm 2,8$ UNT et $182,1 \pm 1,1$ UNT sont plus troubles que les effluents bruts (soit $161,5 \pm 1,1$ UNT) et de l'eau du Fleuve Congo (soit $43,5 \pm 0,9$ UNT) qui présente une turbidité élevée bien qu'elle soit inférieure à celle des effluents de carrière.

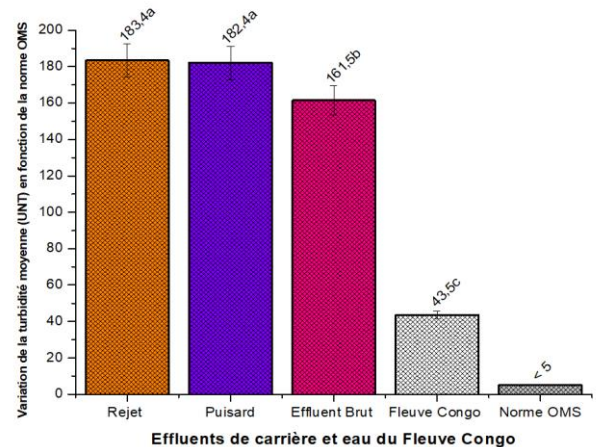


Figure 5. Variation moyenne de la turbidité (UNT) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.5. Salinité

Des faibles teneurs en sels dissous avec une différence statistique très hautement significative ($F = 3,7E+32$; $p = 0,0000$) sont relevées dans les échantillons des effluents de carrière et l'eau du Fleuve Congo (figure 6). Les valeurs moyennes de salinité les plus élevées sont celles des effluents bruts, du Puisard et de Rejets avec respectivement $0,01 \pm 0,00$ % par rapport à l'eau du Fleuve Congo qui présente une faible salinité ($0,00 \pm 0,00$ %).

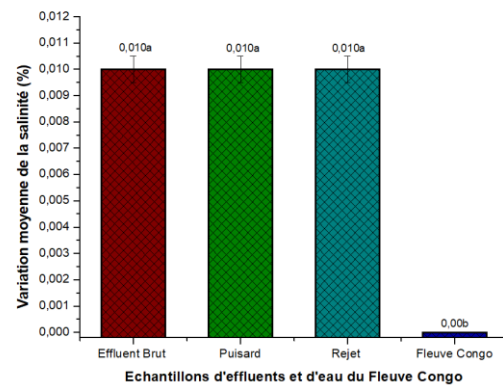


Figure 6. Variation moyenne de la salinité (ppm) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo

3.1.6. Oxygène dissous

La teneur de l'oxygène dissous dans les effluents de carrière et l'eau du Fleuve Congo varie d'un échantillon à l'autre (figure 7). L'analyse de la variance à un facteur appliqué aux données de teneur moyenne de l'oxygène montre une différence statistique très hautement significative ($F = 2482$; $p = 0,0000$; $LSD =$

0,0418) où les concentrations moyennes de l'eau du Fleuve Congo ($5,3 \pm 0,02$ mg/L) est plus oxygénée avec une teneur moyenne la plus élevée suivie de celle des effluents de Rejet ($4,89 \pm 0,03$ mg/L) puis les effluents bruts ($4,11 \pm 0,02$ mg/L) et enfin les effluents du Puisard ($3,79 \pm 0,02$ mg/L). En comparaison avec les valeurs guides établies par l'OMS (2011), seules les valeurs moyennes obtenues dans les échantillons du Fleuve Congo dans le cadre de cette étude sont dans la gamme de la fourchette établie ; les concentrations moyennes des effluents de Rejet, Brut et du Puisard ne sont pas conformes à la norme établie par l'OMS (OMS, 2008).

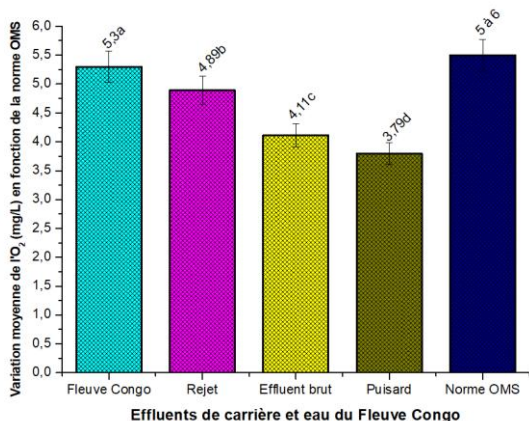


Figure 7. Variation moyenne de la demande biochimique en oxygène (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.7. Demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène est plus élevée avec une différence statistique très hautement significative ($F = 3897$; $p = 0,0000$) entre les valeurs moyennes relevées. La valeur critique de comparaison ($LSD = 0,7635$) montre que la forte demande chimique est celle de des effluents du Puisard ($69,02 \pm 0,21$ mg/L) suivie des effluents bruts ($63,05 \pm 0,14$ mg/L) ensuite de Rejet ($57,53 \pm 0,66$ mg/L) tandis que la faible demande chimique est celle de l'eau du Fleuve Congo ($32,82 \pm 0,52$ mg/L) (figure 8). En comparant les concentrations moyennes obtenues par rapport à la valeur normative fixée par l'OMS (2008), constate que les valeurs moyennes de DCO relevés dans la présente étude sont dans la gamme de la fourchette exigée par l'OMS.

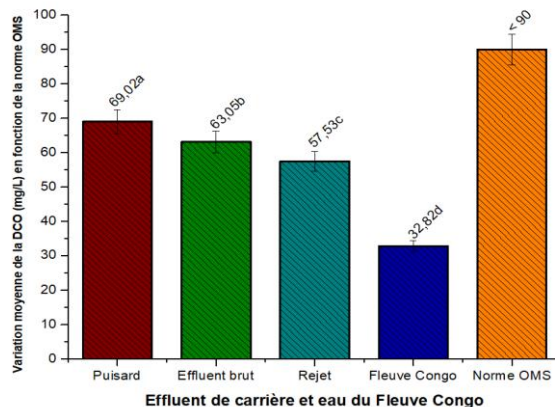


Figure 8. Variation moyenne de la demande chimique en oxygène (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.8. Demande biochimique en oxygène

L'analyse de la variance à facteur appliqué aux données de teneur moyennes de demande chimique en oxygène dans les effluents de carrière révèle une différence statistique très hautement significative ($F = 5281$; $p = 0,0000$) entre les valeurs moyennes (figure 9). Avec une valeur critique de comparaison de $0,5302$; le LSD test montre que l'eau du Fleuve Congo ($16,83 \pm 0,42$ mg/L) présente une faible teneur de demande biochimique en oxygène par rapport aux effluents de carrière où, les fortes teneurs de DBO_5 sont celles de Puisard ($45,76 \pm 0,38$ mg/L), Brut ($42 \pm 0,06$ mg/L) et de Rejet ($35,76 \pm 0,15$ mg/L) et, les concentrations moyennes de ces effluents sont supérieures en comparaison avec celles de la norme (DBO_5 mg/L < 30 mg/L) (OMS, 2008).

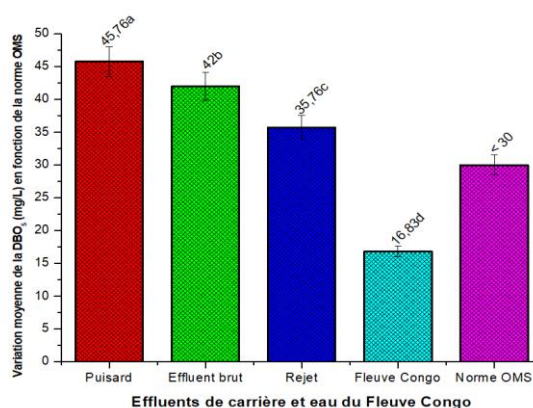


Figure 9. Variation moyenne de la demande biochimique en oxygène (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.9. Matière en suspension

(mg/L) en fonction de la norme OMS

La matière en suspension est plus concentrée dans les effluents de carrière avec une différence statistique très hautement significative ($F = 5651$; $p = 0,0000$) à la concentration moyenne relevée dans l'eau du Fleuve Congo ($22,85 \pm 0,09$ mg/L) ainsi que la valeur normative (MES < 20 mg/L) fixée par l'OMS (2008) (figure 10). Avec une valeur critique de comparaison de 0,6070, le LSD Test montre que les effluents de Puisard ($59,51 \pm 0,09$ mg/L) sont plus concentrés en MES suivis des effluents bruts ($47,03 \pm 0,08$ mg/L) et de Rejet ($42,78 \pm 0,73$ mg/L).

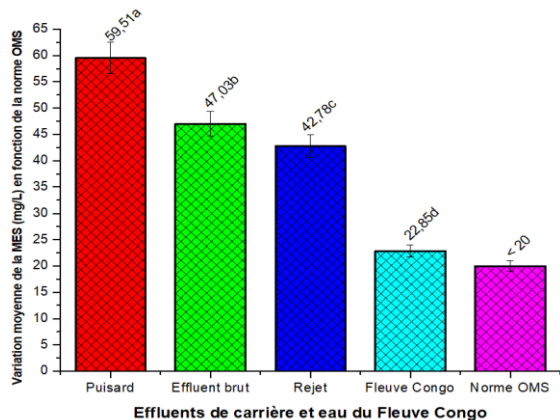


Figure 10. Variation moyenne de la matière en suspension (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.10. Nitrates

De manière générale, les effluents de carrière sont les plus contaminés en nitrates avec une différence statistique hautement significative ($F = 6,94$; $p = 0,0033$) que l'eau du Fleuve Congo (figure 11). La valeur critique du test de LSD (18,611) montre que la concentration la plus élevée en nitrates est celle relevée dans le Puisard ($84,78 \pm 0,14$ mg/L) suivie des effluents bruts ($63,93 \pm 0,1$ mg/L) et de Rejet ($55,88 \pm 19,86$ mg/L). En faisant une comparaison avec la valeur normative (1 mg/L) de l'OMS (2008), on constate que la concentration en nitrates dans l'eau du Fleuve Congo ($46,37 \pm 0,19$ mg/L) comme dans les effluents de carrière reste de loin supérieure que celle de la norme OMS.

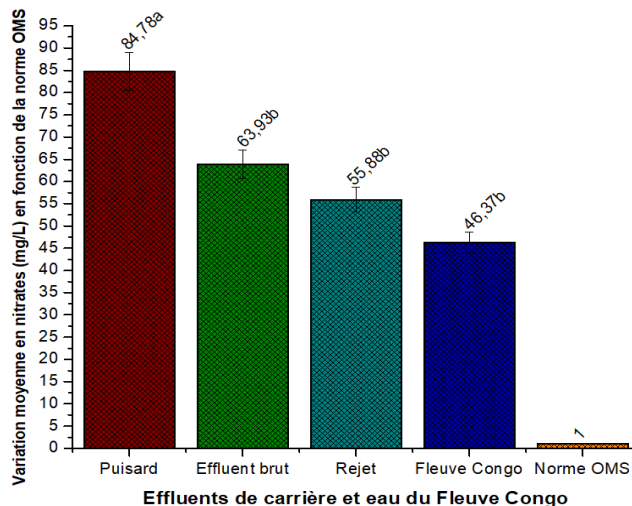


Figure 11. Variation moyenne en nitrates (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.1.11. Phosphate

L'analyse des résultats consignés sur la figure 12 ci-dessous montre que les effluents de carrière sont moins contaminés en phosphate par rapport à l'eau du Fleuve Congo et, tous les échantillons analysés présentent des taux de contamination élevés en phosphate par rapport à la norme OMS (OMS, 2008). L'analyse de la variance à un facteur appliqué aux concentrations moyennes de phosphate dans les échantillons dosés montre une différence statistique très hautement significative ($F = 1324$; $p = 0,0000$; $LSD = 0,0837$) où, le taux de phosphate le plus élevé est relevé dans l'eau du Fleuve Congo ($5,15 \pm 0,05$ mg/L) suivi des effluents de Rejet ($3,41 \pm 0,03$ mg/L), du Puisard ($3,17 \pm 0,07$ mg/L) ainsi que des effluents bruts ($2,89 \pm 0,03$ mg/L).

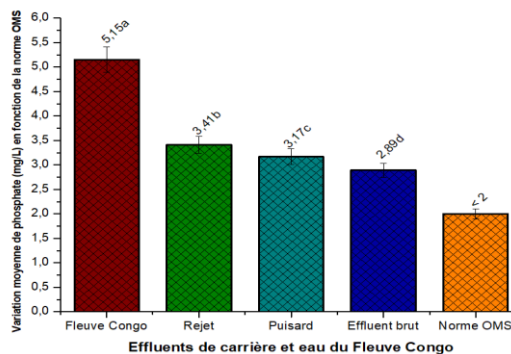


Figure 12. Variation moyenne des ions phosphates (mg/L) des effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.2. Teneurs des éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (aluminium, chrome, nickel, arsenic, cadmium et plomb) ont été dosés dans les effluents de carrière, l'eau du Fleuve Congo ainsi que dans les sédiments des effluents de carrière. La taille de l'échantillon est de cinq (5) répétitions pour chaque métal et dans chaque échantillon considéré. Les teneurs moyennes des ETMs qui portent les mêmes lettres alphabétiques ne présentent pas de différence statistique significative ($p \geq 0,05$) tandis que celles qui portent des lettres différentes sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) les unes des autres.

3.2.1. Variation globale des ETMs dosés dans les effluents

Les résultats visualisés sur la figure 13 ci-dessous montrent que, de manière générale, le Plomb est le métal qui contamine le plus les effluents de carrière suivi de l'Aluminium, Cadmium et Chrome. Par ailleurs, l'Arsenic et le Nickel présentent des faibles valeurs moyennes de contamination. En comparaison avec les valeurs normatives établies par l'OMS pour chaque métal, on constate une pollution des effluents par les différents ETMs dosés.

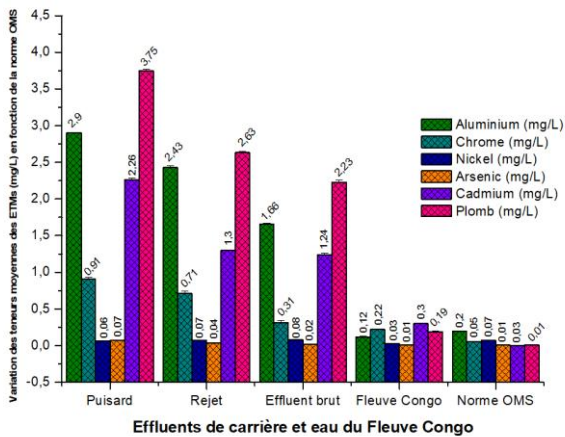


Figure 13. Variation moyenne des teneurs des ETMs (mg/L) dosés dans les effluents de carrière et d'eau du Fleuve Congo en fonction de la norme OMS

3.2.2. Variation globale des ETMs dosés dans les sédiments

De manière générale et dans tous les échantillons de sédiment, le Plomb est le métal le plus accumulé dans le sédiment suivi de l'Aluminium, le Chrome et le Nickel. La contamination en Arsenic et Cadmium reste faible. La comparaison des différentes valeurs normatives suivant la classification établie par Sediment Quality Guideline (SQG) montre une contamination pour certains métaux (dont les valeurs normatives restent supérieures par rapport aux valeurs moyennes obtenues dans cette étude) et une pollution

(dont les valeurs normatives restent inférieures par rapport aux valeurs moyennes obtenues dans cette étude) pour d'autres métaux (figure 14).

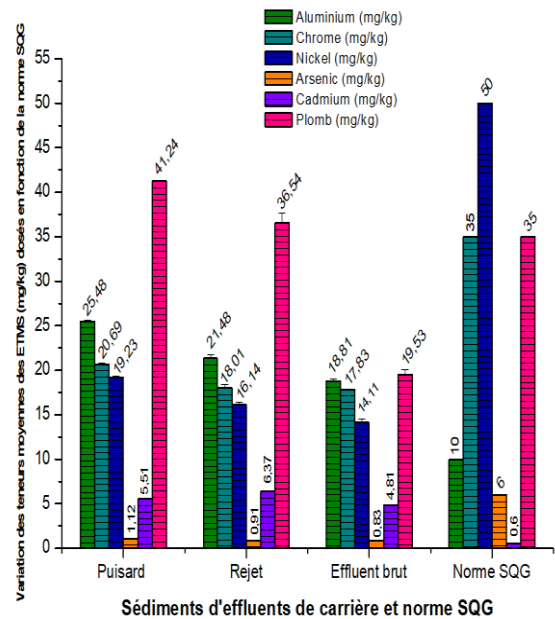


Figure 14. Variation globale de la teneur des ETMs (mg/kg) dosés dans les sédiments des effluents de carrière en fonction de la norme SQG

3.3. Similarité des effluents et sédiments

3.3.1. En fonction de la qualité physico-chimique des effluents

L'analyse des résultats consignés sur la figure 15 ci-dessous montre que la qualité physico-chimique des effluents de carrière n'est pas similaire entre eux comme avec l'eau du Fleuve Congo et les valeurs normatives de l'OMS (OMS 2011). Le dendrogramme de similarité met en évidence deux principaux groupes très distincts avec un coefficient de corrélation significative ($R^2 = 0,9829$) où le premier groupe est constitué de l'eau du Fleuve Congo ainsi que la norme OMS. Le deuxième groupe, subdivisé en deux autres sous-groupes traduit que les effluents bruts et du puisard sont de mauvaise qualité physico-chimique et, ce qui justifie leur rapprochement ou similarité par rapport aux effluents de rejet qui, forme un autre sous-groupe.

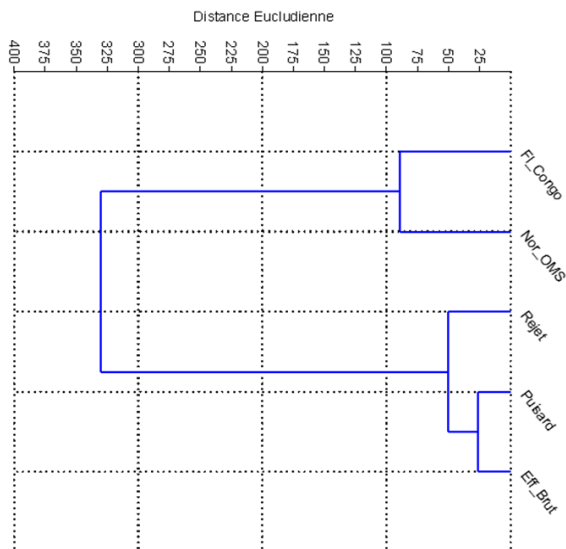


Figure 15. Similarité des effluents de carrière et de l'eau du Fleuve Congo en fonction de la qualité physico-chimique des échantillons considérés

Légende : FI_Congo = Fleuve Congo, Nor_OMS = Norme OMS et Eff_Brut = Effluent brut

3.3.2. En fonction des teneurs des ETMs dans les effluents

La classification hiérarchique ascendante des effluents de carrière en fonction de leur qualité sur base des teneurs des ETMs dosés montre un rapprochement statistiquement significatif ($R^2 = 0,8701$) des effluents, de l'eau du Fleuve Congo ainsi que de la norme OMS, traduisant ainsi une similarité entre les entités considérées sur base des teneurs des ETMs pris en compte. Les effluents de carrière, l'eau du Fleuve Congo ainsi que la valeur normative de l'OMS se classent dans deux principaux groupes où le premier groupe est constitué de l'eau du Fleuve Congo et de la norme OMS qui, présentent une même qualité toxicologique. Le deuxième groupe, constitué des effluents de Rejet, bruts et de Puisard est subdivisé en deux autres sous-groupes où, les effluents de rejet et bruts forment un sous-groupe différemment des effluents du Puisard qui, seul, forment le deuxième sous-groupe dans le groupe 2 (figure 16).

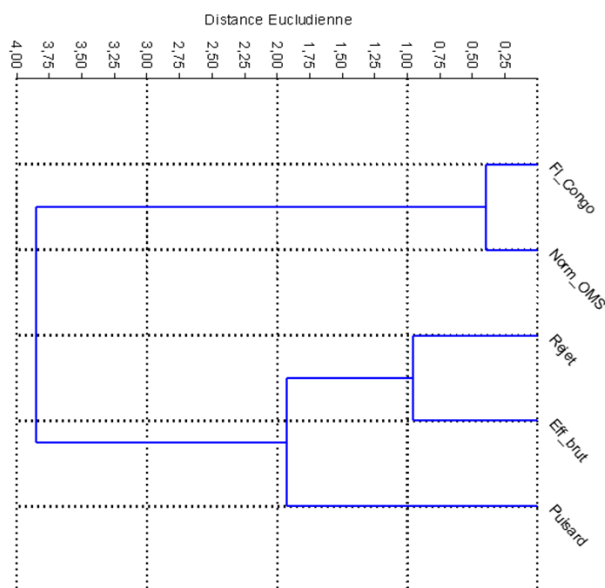
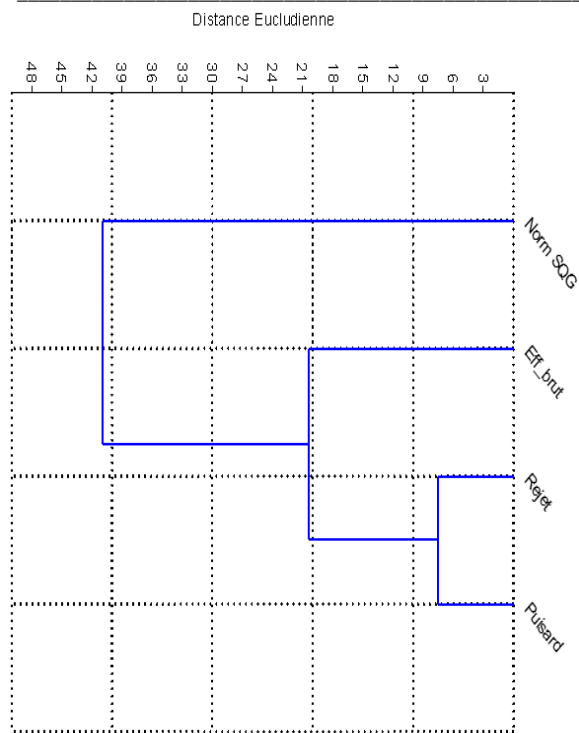


Figure 16. Similarité de la qualité des effluents de carrière et de l'eau du Fleuve Congo en fonction des teneurs des ETMs dosés dans les échantillons considérés

Légende : FI_Congo = Fleuve Congo, Nor_OMS = Norme OMS et Eff_Brut = Effluent brut

3.3.3. En fonction de la teneur des ETMs dans les sédiments

Le dendrogramme issu de la classification hiérarchique ascendante (CHA) met en évidence deux groupes distincts, présentant une séparation statistiquement significative ($R^2 = 0,9835$). Le premier groupe regroupe les valeurs normatives établies par les Sediment Quality Guidelines (SQG), lesquelles se distinguent nettement des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) mesurées dans les sédiments des effluents analysés au cours de cette étude (figure 17). Le second groupe est constitué des trois types de sédiments provenant des effluents de carrière. Ces derniers présentent une forte similarité, suggérant une homogénéité de leur qualité toxicologique au regard des concentrations en ETM déterminées.



Légende : Fl_Congo = Fleuve Congo et Eff_Brut = Effluent brut

Figure 17. Similarité de la qualité des sédiments des effluents de carrière en fonction des teneurs des ETMs dosés dans les échantillons considérés

3.4. Indice de biodégradabilité des effluents

Les résultats relatifs à l'indice de biodégradabilité des effluents de carrière, analysés dans le cadre de cette étude, sont présentés dans le **Tableau I** ci-dessous :

Tableau I. Variation de l'indice de biodégradabilité des effluents de carrière analysés

Types d'échantillons	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	IBD
Effluent brut	63,05±0,14	42±0,06	1,5
Puisard	69,02±0,21	45,76±0,38	1,5
Rejet	57,53±0,66	35,76±0,15	1,6

Les résultats consignés dans ce **Tableau I** indiquent que les effluents bruts, ceux du puisard ainsi que les effluents de rejet présentent une biodégradabilité faible, avec un indice compris entre 1,5 et 1,6. Ces valeurs traduisent un caractère facilement biodégradable de la matière organique contenue dans les échantillons analysés. Par ailleurs, parmi les trois types d'effluents étudiés, les effluents de rejet affichent l'indice de biodégradabilité le plus élevé (1,6), suivis des effluents bruts et des effluents du puisard, dont les valeurs sont similaires (1,5).

3.5. Analyse en composantes principales

La matrice issue de l'analyse en composantes principales (ACP), réalisée à partir des paramètres physico-chimiques, des caractéristiques des sédiments de carrière et de l'indice de biodégradabilité, met en évidence une structuration nette des échantillons selon les axes factoriels. L'axe 1, expliquant 96,21 % de la variance totale, regroupe la majorité des paramètres analysés dans les effluents bruts, les effluents du puisard ainsi que dans l'eau du fleuve Congo. En revanche, l'effluent de rejet est principalement corrélé à l'axe 2, qui ne représente que 3,27 % de la variance totale (**Figure 18**). Les effluents bruts, ceux du puisard et l'eau du fleuve Congo présentent une forte association avec le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique, la turbidité, la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO₅), les matières en suspension (MES), les ions nitrates ainsi que les concentrations en éléments traces métalliques (ETMs), notamment le cadmium et le plomb. À l'inverse, l'effluent de rejet est principalement caractérisé par la température, la salinité, l'oxygène dissous, les ions phosphates et les concentrations en certains ETMs, en particulier le chrome, le nickel et l'arsenic.

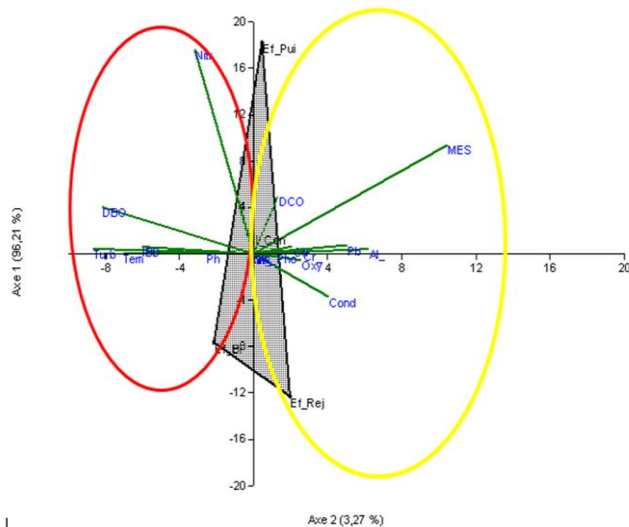


Figure 18. Matrice d'analyse en composantes principales des effluents et sédiments de carrière ainsi l'eau du Fleuve Congo

Légende : pH = Potentiel d'hydrogène, Temp = Température, Cond = Conductivité, Turb = Turbidité, Sal = Salinité, Oxy = Oxygène dissous, DCO = Demande Chimique

en Oxygène, DBO₅ = Demande Biochimique en Oxygène, MES = Matière en Suspension, Nitr = Nitrates, Pho = Phosphate, Al = Aluminium, Cr = Chrome, Ni = Nitrate, As = Arsenic, Cd = Cadmium, Pb = Plomb et IBD = Indice de Biodégradabilité

4. Discussion

La contamination de l'eau douce par les métaux lourds est devenue une matière préoccupante [Katemo et al. \(2010\)](#), non seulement parce qu'elle limite l'utilisation de l'eau pour les usages domestiques mais aussi pour les dommages qu'elle cause aux organismes aquatiques ([Unyumbe et al., 2025](#)). Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence le danger que représente l'industrie extractive pour les milieux récepteurs où sont rejetés les effluents issus des exploitations de carrière. Les valeurs guides de l'OMS concernent principalement l'eau destinée à la consommation humaine. Leur utilisation dans cette étude est indicative et ne remplace pas les normes environnementales applicables aux rejets d'effluents industriels.

Du point de vue physico-chimique, les résultats obtenus ont montré que les concentrations moyennes de quelques paramètres restent dans la fourchette de la gamme exigée par l'OMS (2011) notamment pour la température, le potentiel d'hydrogène, la conductivité, la salinité, l'oxygène dissous et la demande chimique en oxygène. Par contre, les concentrations moyennes de la turbidité, la demande biochimique en oxygène, les ions nitrates et phosphates ainsi que la matière en suspension dosées dans les effluents de carrière comme dans l'eau du Fleuve Congo sont restées supérieures aux valeurs normatives préconisées par l'OMS (2011). La variation et l'instabilité de la plupart de ces paramètres trouvent des raisons dès par la nature des activités anthropiques exercées dans ce site. D'après [Katemo \(2010\)](#), les eaux de lavage des industries, les effluents de production et les rejets divers sans un traitement préalable dans les cours d'eau contiennent des polluants, notamment des métaux lourds ainsi que des résidus des différents produits susceptibles de contaminer le milieu récepteur.

Les valeurs de pH ont révélé un potentiel d'hydrogène variant entre la neutralité dans les effluents de rejet ($7,44 \pm 0,09$) ainsi que l'eau du Fleuve Congo ($7 \pm 0,3$) et la basicité dans les effluents bruts (pH = $8,07 \pm 0,03$) et, se situant dans le seuil de l'OMS (2011) (pH = 6,5 à 8,5). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par [Kawaya et al. \(2017\)](#), où les valeurs

de pH variaient entre 6,2 et 7,4, traduisant des eaux faiblement acides à neutres ont été obtenus. De même, [Musanga et al. \(2019\)](#), dans leur étude sur la rivière Lukaya, ont rapporté des valeurs de pH comprises entre 6,5 et 7,3, compatibles avec les normes OMS pour les eaux de surface. La conformité du pH observée dans la présente étude suggère, comme l'indiquent [Akatumbila et al. \(2016\)](#) pour la rivière Gombe, que malgré les pressions anthropiques, le pouvoir tampon naturel des eaux permet souvent de maintenir le pH dans des limites acceptables.

La conductivité de l'eau renseigne sur la quantité des sels ionisables ([Bondombe, 2015](#)) et, constitue de ce fait, une bonne indication du degré de minéralisation d'une eau ([Luizi et al., 2024](#)). Les résultats de la présente étude sur la conductivité indiquent que les effluents de Puisard ($366 \pm 0,8 \mu\text{S/cm}$) et ceux de Rejet ($360,4 \pm 13,92 \mu\text{S/cm}$) présentent une conductivité moyenne plus élevée et la faible conductivité a été celle de l'eau du Fleuve Congo ($81,2 \pm 2,76 \mu\text{S/cm}$). Ces valeurs restent dans les limites des valeurs guides préconisées par l'OMS (2011) (conductivité comprise entre 50 et 1500 $\mu\text{S/cm}$) et, témoignant d'une minéralisation modérée. Les valeurs de conductivité relevées dans la présente étude restent inférieures à celles rapportées par [Mpiana et al. \(2011\)](#) qui, dans une étude sur les eaux de puits de la ville de Kinshasa en RD Congo, ont trouvé des valeurs atteignant 850 $\mu\text{S/cm}$ dans certaines zones urbanisées. La différence de la concentration de la conductivité relevée dans la présente étude et par rapport à celle de [Mpiana et al. \(2011\)](#) suggère une hétérogénéité des apports ioniques, souvent liée au lessivage des sols.

La turbidité constitue un indicateur pertinent des pressions anthropiques exercées sur les ressources en eau mais aussi de la charge des particules organiques et inorganiques dont est chargé un liquide notamment des effluents industriels ([Bipendu et al., 2025](#)). Les activités d'exploitation minière et des carrières, contribuent à l'augmentation des matières en suspension et, par conséquent, à l'élévation de la turbidité ([Unyumbe et al., 2025](#)). Les valeurs moyennes de la turbidité obtenues ont montré que les effluents de rejet ainsi que du Puisard avec respectivement $183,4 \pm 2,8 \text{ UNT}$ et $182,1 \pm 1,1 \text{ UNT}$ ont été les plus troubles que les effluents bruts (soit $161,5 \pm 1,1 \text{ UNT}$) et de l'eau du Fleuve Congo (soit $43,5 \pm 0,9 \text{ UNT}$) qui ont présenté une faible turbidité bien que supérieure à la valeur normative. La turbidité

des effluents de carrière sous étude a été supérieure à la valeur normative fixée par l'OMS (2011), ce qui constitue un point critique surtout pour le Fleuve Congo avec comme corollaires la réduction de la transparence de l'eau qui limite la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau (Luizi *et al.*, 2024). Cette réduction de la luminosité affecte directement la photosynthèse des organismes autotrophes, notamment le phytoplancton et les macrophytes aquatiques, entraînant une baisse de la production primaire et un déséquilibre de la chaîne trophique (Munganga *et al.*, 2020, 2025). Kayembe *et al.* (2018) ont également observé des taux de turbidité élevés (dépassant 50 NTU) dans le bassin de la N'djili, les attribuant à l'érosion hydrique et aux rejets domestiques non traités.

Dans la présente étude, les concentrations en MES mesurées se sont différenciées de manière significativement selon les compartiments analysés, avec des valeurs moyennes comprises entre $59,51 \pm 0,09$ mg/L pour les effluents du puisard, $47,03 \pm 0,08$ mg/L pour les effluents bruts, $42,78 \pm 0,73$ mg/L pour les effluents de rejet, et $22,85 \pm 0,09$ mg/L pour l'eau du Fleuve Congo. Ces résultats montrent suffisamment que les effluents issus des installations de CARRIGRES présentent des teneurs en MES nettement supérieures à celles de l'eau du Fleuve Congo, ce qui indique une contribution significative de l'activité de la carrière à la charge en particules solides dans le milieu récepteur. La littérature rapporte que les observations faites dans la présente étude sont comparables à celles relevées par Kabeya *et al.* (2020) qui ont noté des concentrations en MES allant jusqu'à 55 à 65 mg/L dans des cours d'eau périphériques recevant des rejets industriels et urbains à Kinshasa, associées à une turbidité élevée et à un transport actif de particules. De même, Mukendi *et al.* (2018) ont observé des concentrations de MES supérieures à 40 mg/L dans des rivières urbaines de la ville de Kinshasa. Les résultats de cette étude montrent une relation étroite entre la conductivité électrique, la turbidité et la matière en suspension (MES) dans les effluents de la carrière. Les effluents du puisard et les effluents bruts présentent simultanément des valeurs élevées de MES et de turbidité, traduisant une forte charge en particules fines issues des activités d'extraction et de traitement des matériaux.

La demande chimique en oxygène (DCO) constitue un indicateur fondamental de la charge globale en matières oxydables, qu'elles soient biodégradables ou non biodégradables, présentes dans un milieu aquatique. Les résultats obtenus dans la

présente étude ont montré une variabilité spatiale marquée des concentrations en DCO selon les sites de prélèvement, traduisant l'influence des activités anthropiques, en particulier celles liées à l'exploitation de CARRIGRÈS. Les valeurs les plus élevées de DCO ont été enregistrées dans les effluents du puisard ($69,02 \pm 0,21$ mg/L) et des effluents bruts ($63,05 \pm 0,14$ mg/L). À l'inverse, la plus faible valeur a été observée dans l'eau du Fleuve Congo ($32,82 \pm 0,52$ mg/L). Cette distribution de concentration de DCO suggère une diminution progressive de la charge polluante au fur et à mesure de l'éloignement de la source de contamination, traduisant un effet combiné de dilution et de processus naturels d'autoépuration du milieu récepteur (Bipendu *et al.*, 2025). Les fortes valeurs de DCO observées au niveau du puisard et des effluents bruts s'expliquent par l'accumulation de matières organiques et minérales oxydables issues des activités de carrière, notamment le lavage des matériaux, le ruissellement des eaux chargées en fines particules et la présence de résidus hydrocarbonés provenant des engins mécaniques. Des observations similaires ont été rapportées par Akatumbila *et al.* (2011) ; Mukendi *et al.* (2016) ; Bipendu *et al.* (2025) dans des études menées sur des effluents industriels et miniers à Kinshasa comme dans d'autres régions de la RD Congo, où les valeurs élevées de DCO ont été associées à une forte charge en substances oxydables d'origine anthropique.

Concernant la DBO₅, la plus faible valeur a été enregistrée dans l'eau du Fleuve Congo ($16,83 \pm 0,42$ mg/L), tandis que les valeurs les plus élevées ont été observées dans les effluents de carrière, notamment au niveau du puisard ($45,76 \pm 0,38$ mg/L), des effluents bruts ($42,00 \pm 0,06$ mg/L) et des effluents de rejet ($35,76 \pm 0,15$ mg/L). Cette répartition met en évidence une charge organique biodégradable nettement plus importante dans les effluents de carrière que dans le milieu récepteur. Les fortes teneurs en DBO₅ observées dans les effluents du puisard et les effluents bruts sont attribués à l'accumulation de matières organiques et de substances biodégradables issues des activités de carrière, telles que le ruissellement des eaux chargées en fines particules, la présence de résidus organiques, ainsi que les apports indirects liés aux activités maraichères et mécaniques sur les sites d'exploitation. Des résultats similaires ont été rapportés par Gizanga *et al.* (2016) ; Boko *et al.* (2022) dans des études menées sur des effluents industriels à Kinshasa, où des valeurs élevées de DBO₅ traduisaient une forte pollution organique liée aux activités anthropiques.

Cette situation peut entraîner une consommation excessive de l'oxygène dissous dans le Fleuve Congo, particulièrement dans les zones proches des points de rejet. Ainsi, cela peut provoquer des conditions d'hypoxie, défavorables à la survie des organismes aquatiques sensibles, perturber les équilibres écologiques et contribuer à la dégradation progressive de la biodiversité aquatique (Boko et al., 2022).

En ce qui concerne la biodégradabilité des effluents de carrière analysés, les résultats obtenus dans la présente étude ont montré que les effluents bruts, les effluents du puisard et les effluents rejetés présentent sont biodégradables et, ont présenté des indices de biodégradabilité compris entre 0,03 et 1,51. Cette large variabilité met en évidence une différenciation marquée de la nature de la pollution organique selon le type d'effluent et le stade du rejet. Les effluents du puisard enregistrent la valeur la plus élevée (1,51), suivis des effluents bruts (1,5), tandis que les effluents rejetés présentent la valeur la plus faible (0,03). Les indices élevés observés pour les effluents du puisard et les effluents bruts sont en cohérence avec les fortes valeurs de DBO₅ mesurées dans ces matrices. Cette relation traduit une charge organique dominée par des composés biodégradables, responsables d'une consommation importante de l'oxygène dissous lors de leur dégradation biologique. Des résultats comparables ont été rapportés par plusieurs autres auteurs notamment en RD Congo. Mulaji et al. (2013) ont mis en évidence, dans les effluents industriels de Kinshasa, des rapports DBO₅/DCO compris entre 0,6 et 1,2, indiquant une bonne biodégradabilité de la matière organique. De même, Kabeya et al. (2020), étudiant les eaux de surface recevant des rejets industriels dans la ville de Kinshasa, ont signalé des indices de biodégradabilité supérieurs à 0,5 associés à des valeurs élevées de DBO₅, traduisant une pollution organique fraîche et facilement assimilable par les micro-organismes. Ainsi, les indices de biodégradabilité trouvés dans la présente étude donnent la possibilité de proposer ou appliquer un traitement biologique aux effluents de CARRIGRÈS sous étude.

Les éléments traces métalliques (ETMs) constituent des contaminants majeurs des milieux aquatiques en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants et les sédiments (Bipendu et al., 2025 ; Unyumba et al., 2025 ; Boko et al., 2022). Dans la présente étude, les concentrations en aluminium (Al),

chrome (Cr), nickel (Ni), arsenic (As), cadmium (Cd) et plomb (Pb) ont été déterminées dans les effluents et sédiments de la société CARRIGRÈS ainsi que l'eau du Fleuve Congo. Les résultats obtenus ont montré une contamination métallique généralisée des effluents, avec une prédominance du plomb, suivi de l'aluminium, du cadmium et du chrome, tandis que l'arsenic et le nickel ont présenté des teneurs moyennes relativement faibles. Ces résultats obtenus révèlent une contamination significative des effluents et sédiments de carrière par plusieurs ETMs, principalement le plomb, l'aluminium, le cadmium et le chrome. Cette situation souligne l'impact des activités de la société CARRIGRÈS sur la qualité des eaux et des sédiments.

5. Conclusion

En conclusion, les résultats de la présente étude mettent en évidence une contamination des effluents et des sédiments issus de la carrière CARRIGRÈS par certains éléments traces métalliques (ETMs). Par ailleurs, plusieurs paramètres physico-chimiques présentent des concentrations supérieures aux seuils recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé, suggérant une altération de la qualité physico-chimique de l'eau du fleuve Congo. L'analyse des éléments traces métalliques (ETMs) met en évidence une accumulation notable de certains métaux, notamment le plomb (Pb), l'aluminium (Al), le chrome (Cr) et le nickel (Ni), traduisant une pression métallique susceptible d'affecter la qualité écologique du milieu aquatique. Les effluents bruts, ceux du puisard ainsi que les effluents de rejet présentent des indices de biodégradabilité compris entre 1,5 et 1,6 indiquant une variabilité du potentiel de dégradation biologique de la matière organique selon le type d'effluent considéré. Dans cette optique, il semble indispensable d'optimiser ou d'implémenter un système de traitement adéquat au sein de l'entreprise CARRIGRÈS pour diminuer les coûts liés aux substances en suspension, aux nutriments et aux métaux avant leur déversement dans l'environnement naturel.

Perceptives

Les études futures devraient inclure un suivi saisonnier de la qualité des eaux et de l'air, l'utilisation de bioindicateurs, la modélisation de la dispersion des polluants ainsi que l'analyse détaillée des sédiments du Fleuve Congo.

Limites de l'étude

Cette étude présente certaines limites notamment : un nombre limité de sites

d'échantillonnage, l'absence d'un suivi saisonnier complet, l'absence d'analyses microbiologiques, l'absence d'analyse des sédiments du Fleuve Congo.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement les Responsables de la société CARRIGRES pour leur ouverture d'esprit pour nous avoir ouverts leur porte et faciliter l'accès dans le prélèvement des effluents et sédiment analysés dans le cadre de cette étude.

Financement

Cette étude n'a bénéficié d'aucun financement pour sa réalisation et sa publication.

Conflit d'intérêt

Les auteurs ne reconnaissent aucun conflit d'intérêt pour ce travail. Les résultats de cette recherche découlent d'un travail original. La collecte, analyse et traitement des données ont été rendu possible par les efforts et financement propres des auteurs.

Considérations éthiques

Cette recherche a été menée en totale conformité avec les normes éthiques, en préservant l'intégrité scientifique, la confidentialité des données collectées et le consentement éclairé des intervenants.

Contributions des auteurs

M.K.S. : a rédigé le projet de recherche, collecté les données, rédaction et révision du manuscrit.

L.S.W. : a participé à la rédaction, l'analyse et traitement statistique des données

M.E.F. : a contribué à l'analyse statistique des données et la révision du manuscrit

K.L.M. : a participé à la révision et correction du manuscrit.

G.V.R.: a validé et dirigé le projet de recherche ainsi que la révision du manuscrit.

ORCID DES AUTEURS

Mayimbi K.S.: <https://orcid.org/0009-0001-5701-2518>

Lusasa S.W. : <https://orcid.org/0000-0002-2526-7903>

Milau E.F. : <https://orcid.org/0009-0003-0046-9749>

Kapembo L.M.: <https://orcid.org/0009-0000-9952-8603>

Gizanga V.R.: <https://orcid.org/0009-0009-0692-8348>

Références bibliographiques

Akatumbila, L., Mabilia, M., Lubini, A., Pwema, K. & Musibono, E.A. (2016). Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de

l'eau — cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa. *Larhyss Journal*.

Akcil, A. & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*.

APHA (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Beckhoff, B., Kanngießler, B., Langhoff, N., Wedell, R. & Wolff, H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. (éds.) Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg. ISBN 978-3-540-28603-5.

Bipendu, M.N., Lusasi, S.W., Tangou, T.T., Pwema, K.V., Mputu, K.J.N. & Mulaji, K.C. (2025). Physico-chemical and microbiological characterization of dairy effluents and water from the N'Djili River in the city of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Orapuh Journal*, 6(6), e1256. <https://dx.doi.org/10.4314/orapuh.v6i6.56>.

Boko, L.F., Musibono, D.E., Matand, T.P., Ngelikoto, P. & Iketsh L.B. (2022). Evaluation de la contamination en éléments -traces métalliques (Mn, Co, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn) des eaux et sédiments de la rivière Yolo (Kinshasa, RDC). *Int. J. Adv. Res.* 10(07) : 894 – 903. DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/15110>.

Bomba, V. (2022). Caractérisation des effluents industriels et leurs impacts sur la station d'épuration des eaux usées de Dogona (Bobo-Dioulasso) - Burkina Faso. Mémoire de Master en Génie de l'Eau de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-Agricoles (GEAAH), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso, 103 p.

Bondombe, W.Y.M.G. (2015). Etudes écologiques et biologique de *Schilbe intermedius* Rüppell 1832 (*Schilbeidae*, *Siluriformes*) et tentative de son introduction en pisciculture d'étangs. Thèse en Sciences Biologiques, FGRNR, Université de Kisangani, R.D Congo, 336 p.

Chapman, D. (1996). *Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. UNESCO/WHO/UNEP.

Gizanga, V.R., Musibono, D.E., Lina, A.A. & Milau, E.F. (2016). Évaluation de la qualité des effluents industriels et de leurs impacts sur les milieux récepteurs dans la ville de Kinshasa (RDC). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 25(2) : 456 - 468.

Hartley, H.O. (1959). Smallest composite designs for quadratic response surface. *Biometrics*, 15: 611-624.

Jenkins, R., Gould, R.W. & Gedcke, D. (1995). *Quantitative X-Ray Spectrometry : Méthodologie, calculs LOD/LOQ*. 2nd ed., Marcel Dekker.

- Kabeya, J.B., Mulaji, C.K. & Tshibanda, D.K. (2020). Qualité physico-chimique des eaux de surface recevant des rejets industriels à Kinshasa. *Revue Congolaise de l'Environnement*, 5(2) : 45 – 58.
- Kashimbo, K. S., Mukanya, S. S., Mukoj, K. A., Mwenge, T. L., Kesonga, N. M., Meli, K., & Kiyukeno, K. Y. (2016). Études d'impacts des rejets liquides de l'usine STL (Société de Terril de Lubumbashi) sur la rivière Lubumbashi (Haut-Katanga, R.D. Congo). *Revue Internationale d'Innovation et de Recherche Scientifique*, 21, 285–292.
- Katemo, M.B., Colinet, G., André, L., Chocha, M.A., Marquet, J-P. & Micha, J-C. (2012). Evaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/R Congo). *Tropicultura*, 28 (4), 246-252, 2010.
- Kawaya, J.M., Otamonga, J.P., Ngelinkoto, P., Kabatusuila, P. & Mubedi, I.J. (2017). Caractérisation physico-chimique de l'eau de la rivière Lukunga dans la ville de Kinshasa (RDC). *Larhyss Journal*.
- Kayembe, J. M., Thevenon, F., Laffite, A., Sivalingam, P., Ngelinkoto, P., Mulaji, C.K., Otamonga, J-P., Mubedi, J.I. & Poté, J. (2018). High levels of faecal contamination in drinking groundwater and recreational water due to poor sanitation, in the sub-rural neighbourhoods of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), 400-408.
- Koumelan, E.P. (1999). L'effet du lac de barrage Ayamé (Côte d'Ivoire) sur la distribution et l'écologie alimentaire des poissons *Mormyridae* (*Teleostei*, *Osteoglossiformes*). *Thèse de Doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, Belgique*, 221 p.
- Lottermoser, B.G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*. Springer
- Luizi, B.A., Lusasi, S.W., Kamb, T.J.C., Pwema, K.V. & Nyongombe U.N.F. (2024). Caractérisation physico-chimique des eaux de quelques écosystèmes aquatiques du bassin versant côtier de la République Démocratique du Congo dans la Province du Kongo Central, Territoire de Muanda. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 47(1), 335-366.
- Lusasi, S.W., Mukoy, L.F., Yaga, N.C., Tumenga, P.R., Kavumbu M.S., Munganga K.C., Robijaona R.B. & Pwema K.V. (2024). Contribution à l'étude des parasites du tube digestif et des branchies des poissons *Distichodus maculatus* Boulenger, 1898 (*Distichodontidae*) et *Schilbe grenfelli* Boulenger, 1900 (*Schilbeidae*) du Pool Malebo (Fleuve Congo) à Kinshasa, R.D. Congo. *Rev. Cong. Sci. Technol.*, 03(02) : 209 - 220. DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.024.v3.i2.86>.
- Mergen, P. (2002). Distribution spatio – temporelle des communautés dans les lacs de barrage de Nisramont (Belgique) et d'Esch – sur – Sûre (Grand – Duché du Luxembourg). *Thèse de Doctorat de l'Université de Namur, Presses Universitaires de Namur*, 416 p.
- Mpiana, P.T., Ngbolua, K.N., Mudogo, V., Tshibangu, D.S.T., Atibu, E.K., Tshilanda, D.D. & Misengabu, N.M. (2011). Antisickle erythrocytes haemolysis properties and inhibitory effect of anthocyanins extracts of *Trema orientalis* (ULMACEAE) on the aggregation of human deoxyhemoglobin S *in vitro*. *Journal of Medical Sciences*, 11(3) : 129-137.
- Mukendi, L.M., Kabeya, J.B. & Tshibanda, D.K. (2018). Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de la rivière Gombe à Kinshasa (RDC). *Mémoire de Master, Université de Kinshasa*.
- Mulaji, C.K., Poté, J. & Ndikumana, T. (2013). Caractérisation de la pollution organique des effluents industriels de Kinshasa à l'aide des paramètres DBO₅ et DCO. *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 7(1) : 23 – 34.
- Munganga, K.C., Lusasi, S.W. & Pwema, K.V. (2020). Evaluation de la qualité écologique de la rivière Musolo à Kinshasa: Basée sur les macroinvertébrés benthiques en République Démocratique du Congo. *Editions Universitaires Européennes, Riga: Latvia, ISBN: 978-613-8-9503-1*, 96 p.
- Munganga K.C., Kavumbu M.S., Lusasi S.W., Tangou T.T., Mbomba N.B. & Pwema K.V. (2025). Influence des facteurs environnementaux sur l'ichtyofaune de la rivière Mpieme (Kinshasa, République Démocratique du Congo). *European Scientific Journal, ESJ*, 21(21) : 185 – 207. <https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n21p185>.
- Musanga, M.J., Thambwe, M.T., Isulu, M.G., M.K.E. & Landa, A. (2019). Détermination de quelques paramètres indicateurs de la pollution organique de la rivière Lukaya à Kinshasa en République Démocratique du Congo. *Congo Sciences*, 118 - 126.
- Nzapo, K.H, Ngbolua, K-te-N., Bongema A.L., Bongo N.G., Inkoto L.C, Falanga, M.C., Ashande M.C., Ndembo, N.J.L., Lokilo, L.E. & Djoza D.R. (2018). Evaluation de la bioaccumulation de métaux lourds chez *Clarias gariepinus*

- (Burchell, 1822), *Chrysichthys nigrodigitatus* (Lacepède, 1803), *Mormyrops anguilloides* (Linnaeus, 1758) et *Coptodon rendalli* (Boulenger, 1897). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 38(1) : 185 - 191.
- OMS (2008). Directives pour la qualité de l'eau de boisson. Troisième édition, Genève.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé), (2011). Normes pour la qualité de l'eau potable
- Piélou, E.C. (1984). The interpretation of ecological data. *Wiley. New York*.
- Pwema, K.V. (2014). Ecologie alimentaire, reproduction et modes d'adaptation de cinq espèces de *Labeo* Cuvier, 1987 dans les milieux lenticules et lotiques du Pool Malebo dans le fleuve Congo. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques, Université de Kinshasa, R.D Congo, 163 p.
- Pwema, K.V., Nakweti, K.J., Kavumbu, M.S., Munganga, K.C., Lusasi, S.W., Tembeni, M.J., Mapasi, M.T. & Mbomba, B.N. (2020). Endoparasites humains présents dans les tubes digestifs de deux espèces de poissons *Cichlidae* : *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) et *Tilapia tholloni* (Sauvage, 1884) pêchés dans le Pool Malebo (fleuve Congo), R.D Congo. *Agricultural Science*, 2(2): 129-140. <https://doi.org/10.30560/as.v2n2p129>.
- Ripley, E.A., Redmann, R.E. & Crowder, A.A. (1996). Environmental Effects of mining.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. & Brunet R. (2009). L'analyse de l'eau, Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer : Analyse de l'eau, 9ème édition, Dunod, Paris, France, 1600 p.
- Runnells, D.D., Shepherd, T.A. & Angino, E.E. (1992). Metals in water- Determining natural background concentrations in mineralized areas. *Environmental Science & Technology*, 26(12) : 2316 – 2323.
- Saville, D.J. (1990). Multiple comparison procedures: the practical solution. *American Statistician*, 44 (2): 174 - 180.
- Scherrer, B. (1984). Présentation des données. *Biostatistique. Morin, G (Eds)*, 850 p.
- Sin, S.N., Chua, H., Lo, W. & Ng L.M. (2001). Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong. *Environnement International*, 26(5-5) : 297 – 301
- Unyumbe, Y.K.B. (2021a). Industries minières, ses impacts et outils d'évaluation environnementale : Risques professionnels, drainage miniers acides et devenir des métaux lourds. Éditions universitaires européennes, ISBN : 978-620-3-44594-7.
- Unyumbe, Y.K.B. (2021b). Industries minières, ses impacts et outils d'évaluation environnementale : Risques professionnels, drainage miniers acides et devenir des métaux lourds. Éditions Universitaires Européennes, ISBN : 978-620-3-44594-7.
- Unyumbe, Y.K.B., Gizanga, V.R., Lusasi, S.W., Tangou, T.T., Nsimanda, I.C. & Musibono, E.A.D. (2025). Indices de pollution des eaux du bassin hydrographique de la rivière Lufira par des métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) rejetés dans les effluents miniers de la ville de Likasi et ses environs, Haut Katanga (RD Congo). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 47(2) : 189 – 208.
- Van Grieken, R., & Markowicz, A.A. (2002). Principes, limites, exemples d'analyses XRF. Eds., Handbook of X-Ray Spectrometry. 2nd ed., CRC Press.
- Wanga, B.M., Musibono, D.E., Mpiana, P.T., Mafuana, L., Kiza, N.J. & Diana. (2014). État microbiologique des eaux de la rivière Kalamu de Boma et son influence sur la santé de la population. *Congo Sciences*, 2 : 15-20.
- Younger, P. L., Banwart, S. A. & Hedin, R. S. (2002). Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation.