



Évaluation géochimique et impact environnemental des matériaux de construction exploités artisanalement dans la carrière Kananga-est (Kolwezi, province du Lualaba, RD Congo) : apport des indices de pollution (EF, Igeo)

Mpiana Kasela Olivier^{1,2}, Sem-Sem L'Adjus Christian¹, Kayembe Kitenge Sylva^{1,2}, Kahozi Ndumbula Emedi^{1,2}, Kabwika Kitumbi Celestin²

Université de Lubumbashi¹, Commissariat Général à l'Energie Atomique².

Abstract: In the Democratic Republic of the Congo, rapid infrastructure development and urbanization are driving strong demand for construction materials. In the Kananga-Est quarry (Kolwezi), unregulated artisanal mining of crushed sand, building stone, and shales meets this socio-economic need but poses major environmental risks. This study aims to characterize the geochemical composition of these materials and evaluate the site's contamination level using geochemical indices (pollution indices). The methodological approach relies on X-ray fluorescence (XRF) geochemical analysis of three lithological facies (S1: crushed sand, S2: building stone, S3: shales), as well as the calculation of the enrichment factor (EF) and the geoaccumulation index (Igeo). The results show an under-accumulation of terrigenous refractory elements (Cr, Zn, Ti), reflecting an exclusively lithogenic origin from the natural bedrock ($I_{geo} \leq EF < 3$) [25,31]. Conversely, extreme contamination/enrichment is highlighted for Cobalt (Co) and Copper (Cu), with average enrichment factors reaching 131.67 (S2) and 96.50 (S3), respectively, associated with average Igeo values ranging from 1.92 to 3.22 (moderately to strongly polluted/enriched classes). Shales (S3) display the most intense trapping in an anoxic/euxinic environment, whereas detrital facies (S1, S2) bear witness to hydrothermal inputs or the circulation of mineralizing fluids [31]. The absence of a management plan exposes these rocks to atmospheric weathering, promoting acid mine drainage and the dispersion of Trace Metals (TMs) into surrounding hydrosystems and soils [1,6]. There is therefore an urgent need to install settling ponds, stabilize quarry faces, and regulate artisanal mining to reconcile economic development with environmental preservation.

Keywords: Construction materials; Sedimentary geochemistry; Geoaccumulation index; Enrichment factor; Trace metals; Kananga-Est; Kolwezi.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23063374>

Résumé : En République Démocratique du Congo, le développement rapide des infrastructures et l'urbanisation entraînent une forte demande en matériaux de construction. Dans la carrière Kananga-Est (Kolwezi), l'exploitation artisanale non régulée de sables concassés, moellons et shales répond à ce besoin socio-économique, mais pose des risques environnementaux majeurs. Cette étude vise à caractériser la composition géochimique de ces matériaux et à évaluer le niveau de contamination du site via des indices géochimiques (indices de pollution). L'approche méthodologique repose sur l'analyse géochimique par fluorescence X (XRF) de trois faciès lithologiques (S1 : sable concassé, S2 : moellons, S3 : shales), ainsi que sur le calcul du facteur

d'enrichissement (EF) et de l'indice de géoaccumulation (Igeo). Les résultats montrent une sous-accumulation des éléments réfractaires terrigènes (Cr, Zn, Ti), traduisant une provenance exclusivement lithogénique issue du substrat naturel ($Igeo \leq FE < 3$) [25,31]. En revanche, une contamination/enrichissement extrême est mise en évidence pour le Cobalt (Co) et le Cuivre (Cu), avec des facteurs d'enrichissement moyens atteignant respectivement 131,67 (S2) et 96,50 (S3), associés à des Igeo moyens variant de 1,92 à 3,22 (classes modérément à fortement polluées/enrichies). Les shales (S3) présentent le piégeage le plus intense en milieu anoxique/euxinique, tandis que les faciès détritiques (S1, S2) témoignent d'apports hydrothermaux ou de circulations de fluides minéralisateurs [31].

L'absence de plan de gestion expose ces roches à l'altération atmosphérique, favorisant le drainage minier et la dispersion des Éléments Traces Métalliques (ETM) vers les hydrosystèmes et sols environnants [1,6]. Il est donc urgent de mettre en place des bassins de décantation, de stabiliser les fronts de taille et d'encadrer l'exploitation artisanale pour concilier développement économique et préservation de l'environnement.

Mots-clés : Matériaux de construction, Géochimie sédimentaire, Indice de géoaccumulation, Facteur d'enrichissement, Éléments Traces Métalliques, Kananga-Est, Kolwezi.

1 Introduction

En République Démocratique du Congo (RDC), la croissance démographique et le développement des infrastructures génèrent une demande sans précédent en matériaux de construction (sables, granulats, moellons, argiles). Dans la province du Lualaba, particulièrement autour de la ville de Kolwezi, l'exploitation artisanale des carrières constitue une activité socio-économique cruciale pour les populations locales. Cependant, cette activité extractive s'effectue le plus souvent de manière informelle, sans encadrement technique adéquat, sans étude d'impact environnemental préalable ni suivi géochimique des matériaux extraits [4,14,25]. La carrière Kananga-Est, située dans un contexte géologique particulier, illustre parfaitement cette dynamique d'exploitation non régulée. Les roches et sédiments extraits artisanalement présentent des signatures géochimiques spécifiques. L'analyse de ces matériaux est essentielle pour évaluer leur qualité mécanique et leur durabilité, mais elle s'avère surtout critique pour identifier la présence d'éléments métalliques ou de minéraux susceptibles d'interagir négativement avec le milieu naturel environnant. La région de Kolwezi est mondialement connue pour appartenir à la Ceinture Cuprifère du Katanga, caractérisée par une métallogénie exceptionnelle en cuivre (Cu), cobalt (Co) et autres Éléments Traces Métalliques (ETM). L'ouverture de front de taille et l'extraction artisanale de faciès rocheux à Kananga-Est exposent à l'air libre et aux intempéries des matériaux potentiellement enrichis en métaux favorisant la dispersion et la mobilité des ETM dans le sol, l'eau et les écosystèmes riverains, entraînant des risques sanitaires et environnementaux élevés. C'est dans ce cadre que l'apport des indices de pollution tels que l'indice de géoaccumulation, le facteur d'enrichissement, devient un outil méthodologique indispensable. Ces indicateurs numériques permettent quantitativement de faire la part entre le fond géochimique naturel (bruit de fond) [11,32] et la contamination anthropique induite par l'activité minière artisanale, tout en hiérarchisant le degré de sévérité de la dégradation environnementale [26,34]. C'est dans cette perspective globale que s'inscrit la présente étude. Elle a pour objectif de :

- ✓ Déterminer la composition géochimique (éléments majeurs et traces) des trois principaux faciès de matériaux exploités à Kananga-Est (S1 : sables concassés ; S2 : moellons ; S3 : shales) ;

- ✓ Evaluer le niveau de contamination et d'enrichissement géochimique par le calcul de l'Indice de Géoaccumulation (Igeo) et du Facteur d'Enrichissement (EF) ;
- ✓ Discuter l'origine (géogénique vs anthropique) des métaux et proposer des mesures de mitigation environnementale adaptées.

2. MATERIELS ET METHODES

1.1 Descriptions du site de recherche

La carrière de Kananga-Est se localise dans la ville de Kolwezi, à environ 9 Km au Nord-Est de la mine souterraine de Kamoto et 3,5 Km au Nord –Ouest de la mine à ciel ouvert de Mutoshi [12]. Elle est située entre les points de coordonnées géographique Easting (X) 314000 et 314500, Northing (Y) 8810000 et 8820000, et s'étend sur plus ou moins 6 Km de long.

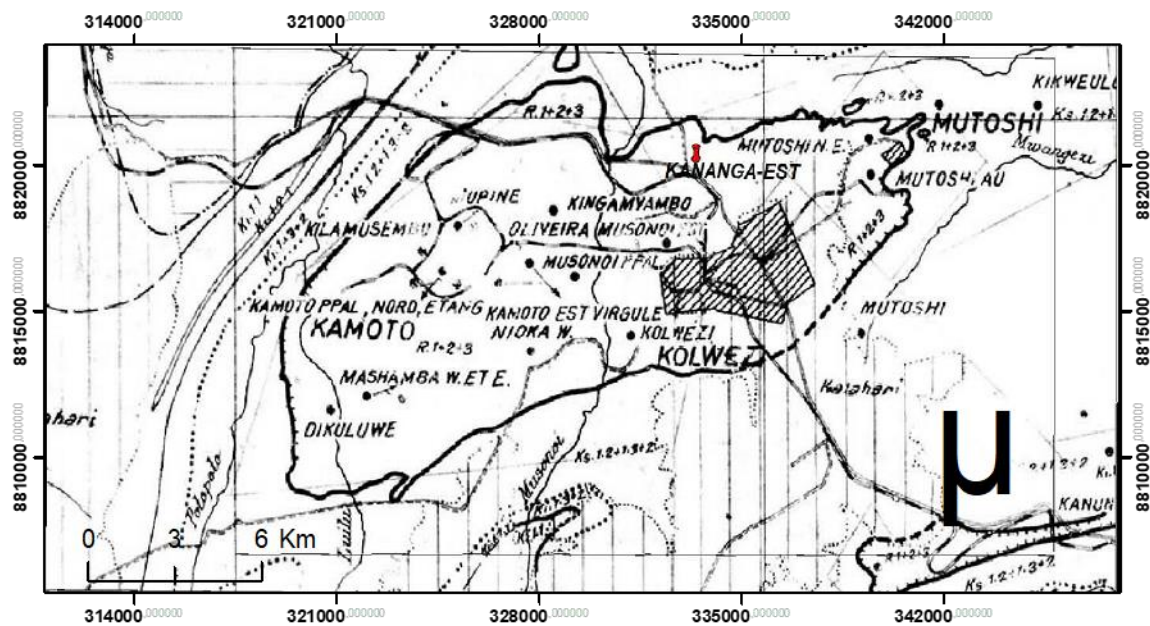


Figure 1. Localisation de la carrière Kananga-Est

1.2 Géologie de Kananga-Est

La géologie de Kananga-Est, est calée dans les formations du Roan (R.1+2+3), Nguba et Kundelungu et pour la majeure partie constituée de roches siliceuses cellulaires (RSC), roche siliceuse feuilletées (RSF), Shales dolomitiques (SD), shales argilo-gréseux et des dolomies silicifiées.(Figure2)

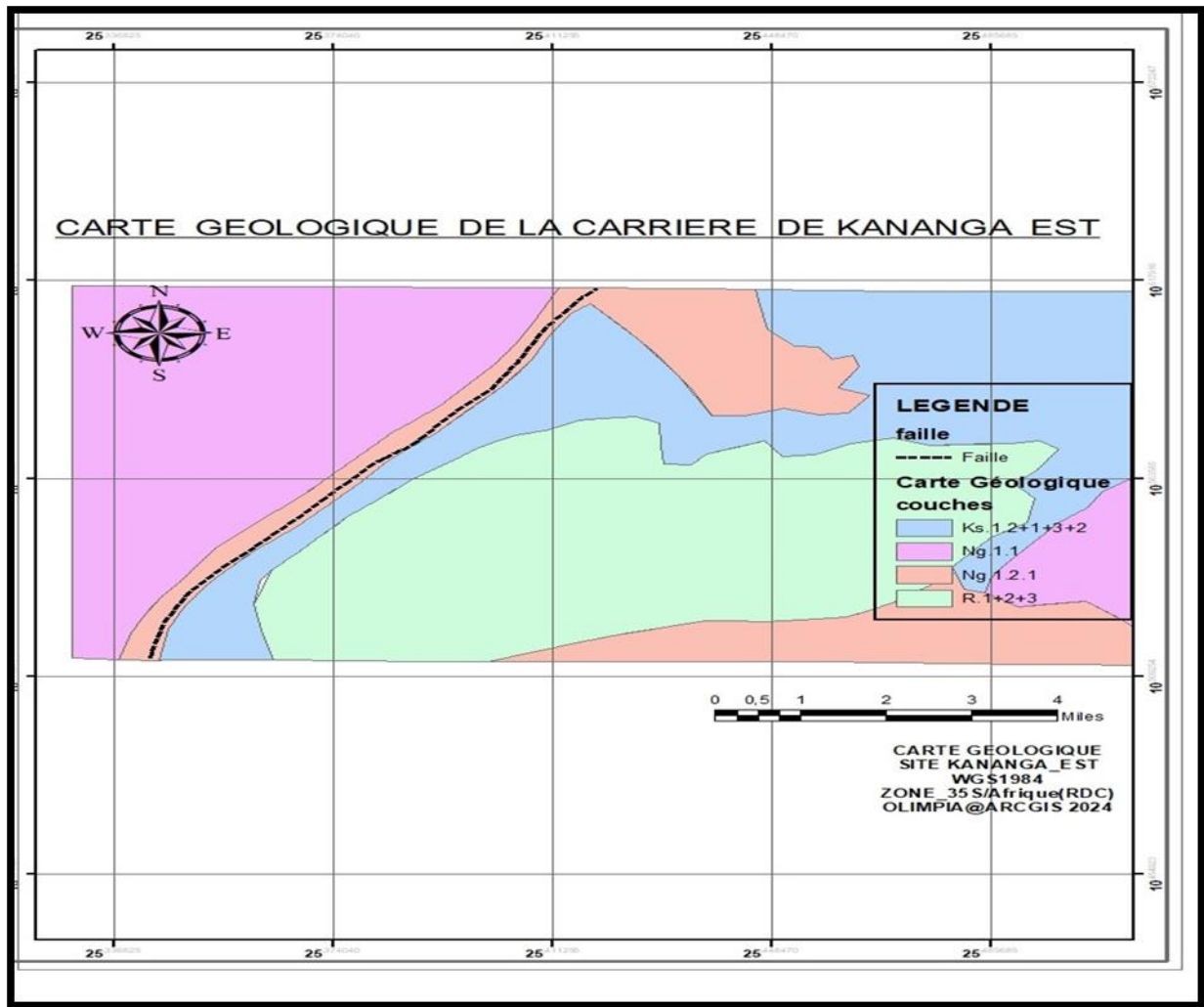


Figure 2. Carte géologique de la carrière Kananga – Est

1.3 Procédures de collecte des échantillons

L'échantillonnage a été effectué systématiquement dans différentes tranchées de la carrière qui sont utilisées par les exploitants miniers artisanaux. Un maillage de 10x10 mètres a été fixé pour récolter plus d'information possible (Figure 3). Au total plus 200 échantillons des roches observées sur le site, ont été récoltés : Grès, dolomies silicifiées, shale micro-gréseux, etc.

Au cours de cet échantillonnage, l'accent a été mis plus sur les roches saines qu'altérées. En plus de l'échantillonnage dans les tranchées, nous avons procédé aussi à une recherche systématique d'affleurements sur certaines parties de la carrière non couvertes par des tranchées, ou là où il n'y a pas encore eu d'activités minières artisanales, en suivant des itinéraires orientés WSW-ENE, pour recouper les différentes formations géologiques affleurant dans la carrière.

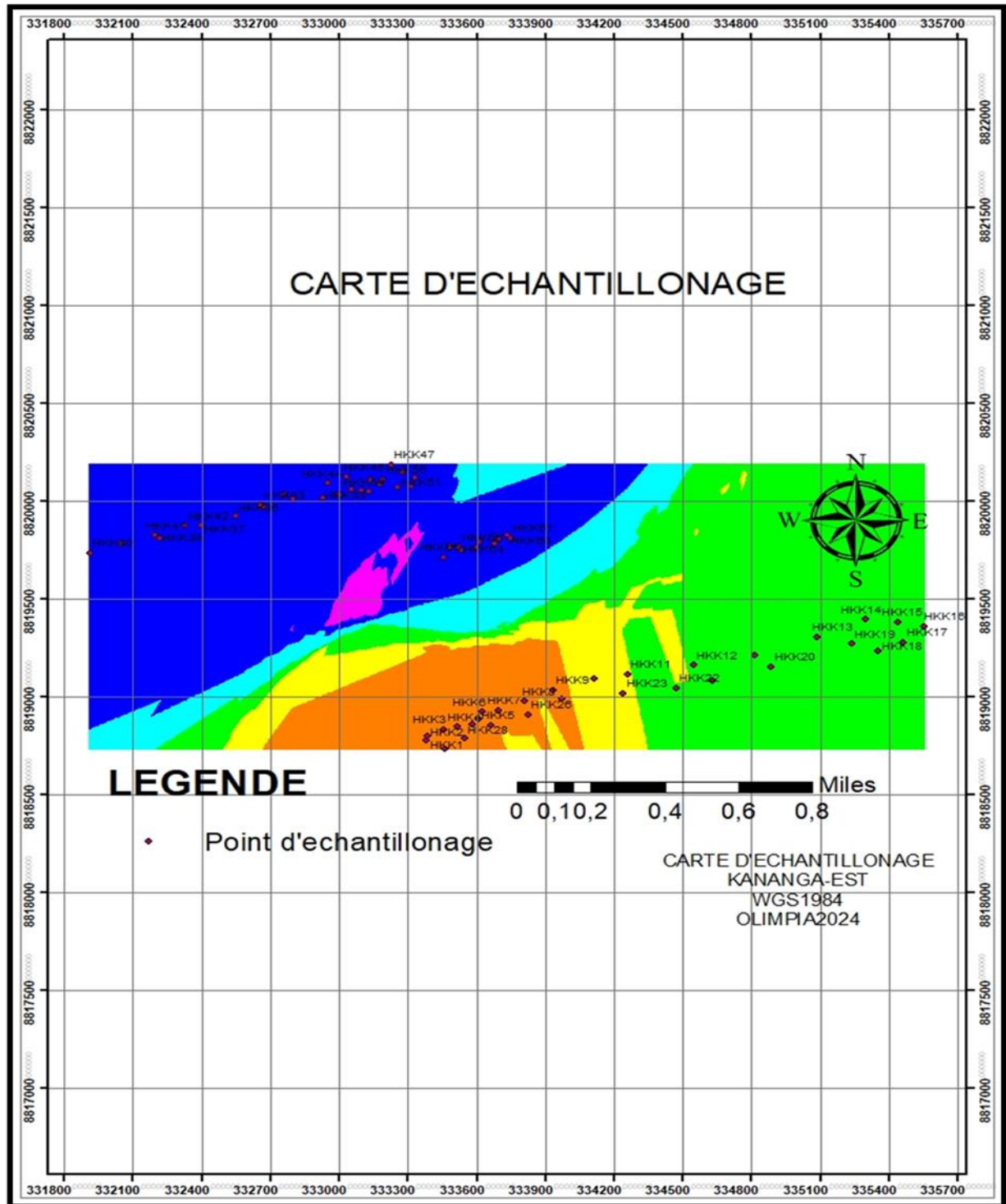


Figure 3. Plan d'échantillonnage dans la carrière Kananga – Est.

1.4 Préparation et analyse chimique des échantillons

La préparation consiste en un broyage des échantillons à l'aide d'un broyeur à mâchoire, afin d'obtenir des particules dont la taille ne dépasse pas 5 millimètres de diamètre. Les échantillons broyés ont été par la suite pulvérisés jusqu'à une granulométrie inférieure à 75 μm . Les analyses quantitatives des éléments majeurs et des éléments traces ont été réalisé par Spectrométrie par Fluorescence X à Dispersion d'Energie (ED-XRF).

La Spectrométrie par Fluorescence X à Dispersion d'Energie (ED-XRF) est une méthode d'analyse non destructive ne nécessitant pas de préparation d'échantillon, qui permet d'obtenir de façon rapide et globale la quasi-totalité

des éléments chimiques contenus dans un échantillon. C'est grâce à ces qualités que cette technique d'analyse est intéressante dans l'étude physico-chimique des matériaux. Cette méthode est largement utilisée dans l'analyse des éléments majeurs et en traces (>80 éléments). Elle est très rapide, cependant ne permet pas d'analyser les éléments légers (numéro atomique < 11 (Na)). Elle s'effectue sur des poudres préalablement pastillées. Elle est basée sur l'excitation de l'élément par les RX. L'intensité des rayons secondaires émis par l'échantillon permet de déterminer la composition des éléments par rapport à un élément standard. Les résultats de la concentration des métaux lourds (Cs, Cr, Co, Cu, Zn, As Pb, Hg et Fe exprimés en ppm) sont présentés dans le tableau 2.

1.5 Indices géochimiques de pollution

2.5.1. Facteur d'Enrichissement (EF)

Le Facteur d'Enrichissement (EF) permet de faire la distinction entre les sources d'éléments d'origine anthropique et naturelle (géogénique). Il normalise la concentration du polluant par rapport à un élément conservatif de référence (comme le fer, l'aluminium ou le scandium) pour s'affranchir des variations de granulométrie ou de la nature des sédiments. Dans cette étude, le fer (Fe) a été retenu comme élément normalisateur terrigène [22,23,24].

$$EF = \frac{(C_x/C_{ref}) \text{ échantillon}}{(B_x/B_{ref}) \text{ référence}}$$

Où :

- C_x est la concentration de l'élément étudié dans l'échantillon ;
- C_{ref} est la concentration de l'élément de référence dans l'échantillon ;
- B_x est la concentration de fond géochimique (UCC – Upper Continental Crust) de l'élément étudié ;
- B_{ref} est la concentration de fond géochimique de l'élément de référence (Fe) dans la croûte continentale supérieure ($B_{Fe} = 30\,890$ ppm).

Grille d'interprétation du EF [26] :

- $EF < 2$: Enrichissement nul ou négligeable (origine principalement lithogénique).
- $2 \leq EF < 5$: Enrichissement modéré.
- $5 \leq EF < 20$: Enrichissement significatif.
- $20 \leq EF < 40$: Enrichissement très élevé.
- $EF \geq 40$: Enrichissement extrême (origine anthropique prédominante).

2.5.2. Indice de Géoaccumulation (Igeo)

L'Indice de Géoaccumulation (Igeo) évalue la pollution en intégrant un facteur correctif (1,5) pour compenser les variations lithologiques naturelles [10,22,23,29] :

$$Igeo = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 * B_n} \right)$$

Où :

- C_n : Concentration mesurée de l'élément n dans l'échantillon ;
- B_n : Fond géochimique (valeur de référence ou bruit de fond) pour l'élément n ;
- 1,5 : Facteur correctif pour atténuer l'effet des variations lithologiques naturelles.

Grille d'interprétation de l'Igeo [22] :

- $Igeo \leq 0$: Classe 0 — Non pollué.
- $0 < Igeo \leq 1$: Classe 1 — Non pollué à modérément pollué.
- $1 < Igeo \leq 2$: Classe 2 — Modérément pollué.
- $2 < Igeo \leq 3$: Classe 3 — Modérément à fortement pollué.
- $3 < Igeo \leq 4$: Classe 4 — Fortement pollué.
- $4 < Igeo \leq 5$: Classe 5 — Fortement à extrêmement pollué.
- $Igeo > 5$: Classe 6 — Extrêmement pollué.

2 RESULTATS

2.1 Caractérisation macroscopique et minéralogique des faciès

Le tableau 1 rassemble les caractéristiques macroscopiques des échantillons collectés sur le front de taille et sur certains affleurements de la carrière Kananga-Est.

Tableau 1. Descriptions macroscopiques des échantillons.

Points	Easting (X)	Northing (Y)	Descriptions
HKK 3	333381	8818780	Graviers blancs grisâtres, majoritairement composés des fragments de RSF. Présence d'oxydes noirs.
HKK 5	333384	8818803	RSC modérément altérée, cariée, noir grisâtre. Présence d'oxydes noirs.
HKK 6	333454	8818833	RSC modérément altérée peu cariée, noir grisâtre. Présence d'oxydes noirs.
HKK 14	333518	8818848	RSF (graviers) blanc grisâtre modérément silicifié ; présence des beaucoup d'oxydes noirs.
HKK 19	333607	8818887	SD (ou D. Strat) et RSF modérément altéré et broyée (graviers), gris noirâtre avec présence d'oxydes noirs et des nodules aplaties.
HKK 23	333582	8818861	Graviers et sables concassés composés majoritairement des RSC grisâtre ; avec traces d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
HKK 25	333624	8818924	RSC altérée et cariée ; broyé en particules fines ; noires grisâtre. Traces d'oxydes noirs & Fer.
HKK 26	333696	8818931	RSF gris noirâtres à rosâtres. Présence d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
HKK 27	333811	8818978	Graviers concassés composés majoritairement des RSF dolomitiques ; présences de beaucoup d'oxydes noirs. Traces d'oxydes de Fer.
HKK 28	333933	8819036	RSC altérée et cariée ; noires grisâtre. Présence d'oxydes noirs & Fer.
HKK 29	334112	8819095	SD altéré, modérément silicifié, gris rosâtre avec traces d'oxydes noirs et oxydes de Fe.
HKK 39	334260	8819118	RSC blanc grisâtre, cariée et modérément altérée. Présence d'oxydes de Fer.
HKK 40	334545	8819163	RSC modérément altéré, blanc grisâtre, cariée. Trace d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
HKK 44	335087	8819306	RSC et RSF (graviers) un peu altérées, gris rosâtre. Traces d'oxydes noirs.
HKK 56	334814	8819213	Graviers composés des RSF et RSC altérés blancs grisâtre à rougeâtre. Traces d'oxydes noirs et oxydes de Fe.
HKK 59	335298	8819397	RSC (graviers) altérée, broyé gris rosâtre et lessivé.
HKK 66	335436	8819382	SD silicifié, altéré, rose grisâtre. Présence d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
JKK 1	335554	8819361	SD (+ Schiste + RSC intercalaire gris) rougeâtre. Présence d'Oxydes Fer et Noirs.
JKK 2	335461	8819279	RSC altérée très lessivée, blanc rougeâtre, présence d'oxydes de Fe et oxydes noirs.
JKK 3	335351	8819237	RSC un peu altérée, carié, lessivé, gris blanchâtre. Présence d'Oxyde Fer et Noirs.
JKK 4	335235	8819272	RSC modérément altérée, cariée, blanc grisâtre. Présence d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
JKK 5	334884	8819154	RSC modérément altérée et cariée. Présence d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
JKK 6	334627	8819083	RSC blanc grisâtre, faiblement altérée et cariée. Présence d'oxydes de Fe et de schert.
JKK 7	334470	8819046	RSC très cariée, broyée, avec présence de beaucoup d'Oxydes noirs mélangés aux oxydes de Fer

JKK 8	334239	8819020	SD altéré gris rougeâtre. Présence d'oxydes de Fer et oxydes noirs.
JKK 10	333973	8818990	RSF (graviers) siliceuse altérée ; broyée, modérément silicifiée. Présence d'oxydes Noirs et oxydes de Fer.
JKK 11	333824	8818910	SD modérément silicifié ; présence d'Oxydes de Fer et de schert. Traces d'Oxydes noirs
JKK 12	333824	8818910	SD silicifié, noir grisâtre ; avec traces d'oxydes noirs et oxydes de Fer.
JKK 13	333663	8818857	RSF modérément silicifiée, grisâtre. Présence d'Oxydes Noirs et Oxyde de Fer.
JKK 14	333546	8818790	RSF siliceuse altérée, gris blanchâtre à rosâtre ; hematitifère. Traces d'Oxydes noirs.
JKK 15	333460	8818735	RSC altérée, cariée, gris noirâtre. Prédominance d'oxydes noirs.
JKK 16	333099	8820054	RSC altérée très lessivée et très silicifiée, blanc rougeâtre, présence d'oxydes de Fe et prédominance d'oxydes noirs.
JKK 17	333055	8820063	SD altéré, silicifié gris rougeâtre. Présence d'oxydes de Fe et traces d'oxydes noirs.
JKK 18	333000	8820033	RSC altérée cariée lessivée, broyée et très silicifiée, gris blanchâtre. Présence d'oxydes de Fe et oxydes noirs.
JKK 19	332928	8820018	RSC / SD altéré, cariés et minéralisés en oxydes noirs. Présence d'Oxydes de Fer.
JKK 20	332802	8820010	RSF / RSC silicifiées, altérées, gris brunâtre. Traces d'oxydes noirs et Oxydes de Fer.
JKK 21	332670	8819971	SD -Schiste intercalaire modérément altéré, rose grisâtre. Présence d'oxydes de Fe.
JKK A	332548	8819922	RSC altéré gris blanchâtre ; avec traces d'oxydes de Fe et oxydes noirs.
JKK B	332400	8819874	RSC gris blanchâtre, cariée. Présence d'Oxydes de Fe.
JKK C	332216	8819811	RSC modérément altéré, très cariées avec traces d'oxydes noirs. Présence d'oxydes de Fe.
JKK D	332050	8819782	RSC gris blanchâtre, cariée et altérée. Présence d'Oxyde de Fer et Oxydes Noirs.
JKK E	331912	8819737	RSC gris rosâtre, un peu altérée, cariée. Présence d'Oxydes Noirs et Oxydes de Fe.
JKK F	332195	8819826	RSC siliceuse, blanc grisâtre et cariée. Présence d'oxydes de Fe et oxydes Noir
JKK G	332328	8819874	RSC / SD modérément altérées, broyée et cariées. Présence de schert, Oxydes noirs et Oxydes de Fer. Traces de minéralisation en Cu.
JKK H	332660	8819979	RSC noire grisâtre, cariée et très altérée. Présence prédominante d'oxydes noirs. Traces d'oxydes de Fer.
JKK I	332950	8820092	RSC légèrement altérée, carié, blanc grisâtre. Présence d'Oxyde Noirs et Oxydes de Fer.
JKK J	332761	8820032	RSC blanche, grisâtre, altérée et cariée. Présence d'oxydes de Fer et oxydes noirs.
JKK K	333035	8820124	RSC (graviers) altérée, cariée, gris blanchâtre à rougeâtre. Présence d'oxydes de Fe & Noirs.
HK 1	333137	8820109	RSC blanc grisâtre, légèrement altérée, mais très lessivée. Traces d'Oxydes Fer.
HK 2	333227	8820186	RSC altéré et lessivé blanc grisâtre ; traces d'oxydes de Fer & Noirs.
HK 3	333279	8820147	RSC modérément altérée ; blanc grisâtre et cariée. Présence d'Oxydes Noirs et oxydes de Fe.
HK 4	333334	8820121	RSC altérée gris rougeâtre. Prédominance d'Oxydes Fer. Présence également d'Oxydes Noirs modérément altéré.
HK 6	333313	8820078	RSC cariée, modérément altérée, gris blanchâtre à jaunâtre. Traces d'Oxydes Noirs et Oxydes de Fer.

HK 7	333257	8820070	RSC gris- blanchâtre, cariée. Présence d'Oxydes noirs.
HK 8	333180	8820086	RSC/ SD Gris rosâtre, silicifiée avec présence d'oxydes Noirs
HK 9	333128	8820047	RSC altérée, cariée et lessivée ; blanc grisâtre. Présence d'oxydes noirs.
HK 11	333190	8820110	RSF dolomitique gris blanchâtre avec présence d'oxydes noirs
JK 1	333483	8819765	Mixage des RSC et RSF altérées, gris -blanchâtre ; avec prédominance d'oxydes noirs. Traces d'oxydes de Fe.
JK 2	333612	8819794	RSF dolomitique gris blanchâtre ; altérée avec présence d'oxydes noirs avec traces Fe
JK 3	333582	8818861	RSC altérée blanc grisâtre, cariée avec présence d'oxyde de Fer et traces d'oxydes noirs.
JK 4	333695	8819807	RSF dolomitique gris blanchâtre, très altérée et très lessivée. Traces d'Oxydes. Fer et noirs
JK 5	333734	8819825	RSC gris -blanchâtre, cariée. Présence d'Oxydes de Fer.
JK 6	333748	8819811	SD / RSC grisâtre, altérée, broyée modérément silicifiée. Présence d'oxydes noirs et traces d'oxydes de Fer.
JK 7	333677	8819781	SD / RSC gris blanchâtre, altérée et lessivés. Présence d'oxydes Fer.
JK 8	333599	8819763	RSC modérément altérée blanc grisâtre à rougeâtre. Présence d'oxydes de Fer.
JK 9	333530	8819752	RSC gris blanchâtre, altérée et très lessivée. Présence d'Oxyde de Fer et traces d'Oxydes noirs.
JK 10	333456	8819714	RSC altérée très lessivée, blanchâtre à rougeâtre, présence d'oxydes de Fe et oxydes noirs.
JK 11	333599	8819763	RSC altérée et cariée. Présence d'oxydes de Fe et oxydes noirs.
JK 12	333524	8819766	RSF Siliceuse, gris blanchâtre, altérée. Présence d'oxyde de Fer
JK 13	333524	8819766	RSF Siliceuse, grisâtre, altérée. Présence d'oxydes de Fer
JK 14	333137	8820109	RSC altéré blanc grisâtre et cariée avec prédominance d'oxydes de Fer. Présence d'Oxydes Noirs.
JK 15	333035	8820124	RSC altérée gris rougeâtre. Prédominance d'Oxydes Fer. Présence également d'Oxydes Noirs modérément altéré.
JK 16	333190	8820110	RSF Siliceuse, grisâtre, altérée. Présence d'oxydes de Fer

2.2 Géochimie des éléments majeurs et traces

L'analyse chimique s'est concentrée sur les éléments traces et majeurs susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement, à savoir : Pb, Cs, As, Cr, Hg, Co, Cu, Zn, Ti, Fe contenus dans le tableau 2. Le Fer est utilisé comme élément normalisateur ou de référence à cause de son abondance crustale élevée et stable ; son origine naturelle dominant qui est peu sensible aux petites variations d'apports anthropiques par rapport à sa masse totale et son comportement géochimique conservateur. Pour calculer les indices des pollutions nous avons utilisé les concentrations de référence de la croûte terrestre (UCC) exprimée en ppm [24,28,33]. Le Tableau 2 présente les résultats d'analyse chimique obtenus par fluorescence X pour les différents échantillons.

Tableau 2. Présentation de résultats d'analyse (ppm)

CODE	Pb	Cs	As	Cr	Hg	Co	Cu	Zn	Ti	Fe
HKK3	45	58	0	144	4	303	321	70	3286	9030
HKK5	22	60	5	156	9	564	268	81	1780	49500
HKK6	0	72	2	146	0	231	193	17	1966	4848
HKK14	0	63	10	231	0	839	349	23	485	19700
HKK19	0	59	3	215	0	378	3759	36	2588	10800
HKK23	0	44	2	167	0	1438	851	28	4422	9712
HKK25	0	70	7	108	0	303	187	17	895	9992

HKK26	0	74	4	123	0	270	212	21	918	12500
HKK27	0	56	0	209	0	73	895	16	2015	5602
HKK28	10	73	9	107	0	1010	619	76	2486	25100
HKK29	83	58	0	166	0	146	382	158	1834	10200
HKK39	0	62	8	185	0	130	149	14	2512	7255
HKK40	0	62	3	123	0	146	171	16	487	5309
HKK44	0	77	0	269	0	128	252	19	281	2896
HKK56	26	45	13	180	0	392	1910	34	1936	12300
HKK59	0	76	0	135	5	108	122	10	877	7507
HKK66	0	53	6	221	0	569	14900	43	1862	13300
JKK1	0	66	10	104	8	137	131	15	741	45
JKK2	137	58	23	116	1	791	649	75	1594	52
JKK3	0	76	8	197	0	230	143	37	255	29100
JKK4	0	70	9	181	7	126	157	18	1680	4247
JKK5	14	71	10	124	0	372	392	20	2614	11300
JKK6	0	54	17	185	4	246	157	20	720	14500
JKK7	0	35	12	192	2	0	87	26	424	11100
JKK8	0	13	7	118	9	369	106	22	2926	5745
JKK10	0	79	7	99	9	240	178	17	614	3626
JKK11	0	57	11	140	7	96	128	12	417	5859
JKK12	0	88	13	10	4	219	151	17	890	10200
JKK13	0	57	24	122	4	145	156	13	2007	12600
JKK14	0	88	12	67	0	119	160	57	1403	11700
JKK15	0	79	10	100	10	240	140	22	658	6230
JKK16	0	66	7	160	4	106	100	22	1248	5571
JKK17	0	0	0	0	1	0	146	45	206	0
JKK18	0	67	23	108	1	149	165	30	559	23300
JKK19	0	71	33	135	11	174	164	17	2026	20100
JKK20	0	58	9	179	0	122	157	22	886	10700
JKK21	0	52	9	92	4	64	53	7	318	3081
HKK1	0	107	10	56	0	95	134	21	775	16300
HKK2	0	66	7	90	0	91	121	18	1034	10300
HKK3	0	62	13	114	5	104	153	42	0	10100
HKK4	0	48	14	142	11	131	96	18	1870	13100
HKK6	0	78	15	86	2	205	71	20	671	16300
HKK7	0	94	12	123	6	141	72	51	1624	4015
HKK8	0	61	9	181	1	100	61	14	467	3895
HKK10	0	16	9	110	6	135	195	19	1583	11900
HKK11	0	76	12	167	6	106	125	29	564	11200
JK1	65	64	9	132	7	245	127	27	959	21300
JK2	0	0	6	41	3	273	140	17	250	7517
JK3	0	64	0	83	7	509	565	15	2546	17700
JK4	1	0	8	69	8	289	196	26	891	27800
JK5	0	74	8	135	0	166	89	12	1456	6012
JK6	0	62	9	210	7	342	344	36	1814	23500
JK7	28	73	16	76	6	421	417	34	712	37300

JK8	16	77	7	72	6	298	237	21	366	249
JK10	0	67	17	70	2	491	181	17	403	3215
JK11	0	94	17	64	2	121	93	17	617	5862
JK12	0	0	10	64	2	108	89	10	993	4420
JK13	21	42	10	133	6	445	311	26	4201	30200
JK14	0	0	7	79	11	137	103	69	512	9065
JK15	0	65	21	117	4	160	119	29	1524	6259
JK16	0	43	31	205	1	1543	600	30	1588	6790
JK17	0	0	22	157	1	1750	481	31	529	3862

Tableau 3. Matrice de corrélation entre les variables

Variables	Pb	Cs	As	Cr	Hg	Co	Cu	Zn	Ti	Fe
Pb	1									
Cs	-0,016	1								
As	0,23	-0,037	1							
Cr	-0,004	0,163	0,028	1						
Hg	-0,015	0,088	0,248	-0,094	1					
Co	-0,086	-0,381	0,235	0,111	-0,266	1				
Cu	-0,087	-0,076	-0,069	0,256	-0,188	0,245	1			
Zn	0,782	-0,082	-0,165	-0,033	-0,079	-0,06	-0,098	1		
Ti	0,157	-0,227	-0,246	0,165	0,03	0,223	-0,003	0,233	1	
Fe	-0,031	0,061	-0,092	0,231	0,105	0,249	-0,051	0,215	0,181	1

L'analyse de la matrice de corrélation (tableau 3) permet de noter une corrélation positive entre le Pb et Zn ($r = 0,782$) ; le pôle Co-Cu-Fe présente une corrélation modérée (r varie entre 0,24 - 0,26) ; le cobalt s'associe positivement avec le cuivre ($r = 0,245$) et le fer ($r = 0,249$). Le chrome s'associe également au cuivre ($r = 0,256$) et au fer ($r = 0,231$). Arsenic - Mercure (As - Hg) : Affinité modérée ($r = 0,248$), Césium - Cobalt (Cs - Co) : Corrélation négative ($r = -0,381$)

Les valeurs de Cr- Co-Cu-Zn-Ti sont significatives et seront utilisées dans le calcul des indices des pollutions

2.3 Evaluation du Facteur d'Enrichissement (EF) et de l'Indice de géoaccumulation (Igeo)

Le calcul des facteurs d'enrichissement normalisés au fer est synthétisé dans le Tableau.

Tableau 4. Valeur de EF dans le sable concassés

CODE	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK3	6.066734075	69.08344733	44.43521595	4.049519843	3.351693186
HKK19	7.573470209	72.05882353	435.0694444	1.741293532	2.20711501
HKK23	6.541660698	304.8381626	109.5294481	1.506061128	4.193672505
HKK25	4.11198524	62.43229878	23.39371497	0.888770718	0.825002107
HKK27	14.19330053	26.82865363	199.7054623	1.492004455	3.312961536
HKK44	35.33734687	90.99772506	108.7707182	3.427269729	0.893700931
HKK56	5.567338282	65.6145385	194.1056911	1.443999515	1.449721866
HKK59	6.841440742	29.61941404	20.31437325	0.695867936	1.076013265
JKK7	6.580493537	0	9.797297297	1.223611671	0.35182551
JKK10	10.38693973	136.2707245	61.36238279	2.44914424	1.559642349
JKK14	2.178558157	20.94017094	17.09401709	2.54496747	1.104475933
JKK18	1.763388692	13.16586721	8.85193133	0.672602652	0.220973571
HKK10	3.516624041	23.35640138	20.48319328	0.834064969	1.225232198
JK6	3.399629972	29.96245307	18.29787234	0.800254049	0.710974244
JK7	0.775148619	23.23765968	13.97453083	0.476171422	0.175814872
EF(S1)	7.66	64.56	85.68	1.28	1.51

Tableau 5 : Valeurs de l'Igeo dans les sables concassés

CODE	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK3	0.061400545	3.570748642	2.934112064	-0.521768674	-0.794629439
HKK19	0.639668393	3.889817082	6.483815777	-1.48112669	-1.139124302
HKK23	0.275179836	5.817422618	4.340697899	-1.843696769	-0.366262894
HKK25	-0.353636955	3.570748642	2.154577037	-2.56358885	-2.671002332
HKK27	0.598834675	1.517399217	4.413426449	-2.651051691	-1.500182081
HKK44	0.962937906	2.327574658	2.584962501	-2.403124178	-4.342319884
HKK56	-0.03170886	2.08246216	1.538419915	-3.329123596	-2.700313171
HKK59	0.476438044	0	1.050626073	-1.950611973	-3.748825749
JKK7	-0.479167837	3.234465254	2.083416008	-2.56358885	-3.214651359
JKK10	-1.042435266	2.222392421	1.929610672	-0.818161677	-2.02244691
JKK14	-0.353636955	2.546743178	1.974004791	-1.744161096	-3.350041731
JKK18	0.39132143	1.971430848	0.538419915	-2.843696769	-3.609467464
HKK10	0.605721061	3.745427173	3.033947332	-1.48112669	-1.651787463
JK6	-0.860596943	4.045251081	3.311586151	-1.56358885	-3.001012773
JK7	0.061400545	3.570748642	2.934112064	-0.521768674	-0.794629439
Igeo (S1)	0.08	2.97	2.93	-1.95	-2.98

Tableau 6 : Facteurs d'enrichissement EF dans le moellon

CODE	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK5b	1.198945982	23.45811052	6.767676768	0.854816825	0.331206805
HKK6	11.45698809	98.09988352	49.76278878	1.831806315	3.735126802
HKK14	4.460935776	87.68289042	22.14467005	0.609894689	0.226756612
HKK28	1.621773774	82.84509023	30.82669323	1.58173277	0.912245754
HKK39	9.700955863	36.89139336	25.67195038	1.008054147	3.189089194
HKK40	8.813991008	56.61861656	40.26181955	1.574347138	0.844890999
JKK2	1.515988828	55.94398529	27.86843009	1.345898471	0.504348298
JKK3	2.575451965	16.27248838	6.142611684	0.664204749	0.080710798
JKK4	16.21349085	61.08117841	46.20908877	2.214029921	3.643438712
JKK5	4.17468257	67.77719938	43.36283186	0.924580637	2.130647415
JKK6	4.853823088	34.92900609	13.53448276	0.720535255	0.457350272
JKK7	6.580493537	0	9.797297297	1.223611671	0.35182551
JKK15	6.106497313	79.31262393	28.08988764	1.844709039	0.972797161
JKK16	10.92614705	39.17345075	22.43762341	2.062921794	2.063316611
JKK17	1.763388692	13.16586721	8.85193133	0.672602652	0.220973571
JKK18	2.555158988	17.82265145	10.19900498	0.441820747	0.928384394
JKK19	1.307015204	11.99927824	10.27607362	0.673015292	0.437923797
JKA	3.324187421	18.18960594	14.68446602	0.912911172	0.924629535
JKB	4.294016358	21.19976704	18.93564356	2.172306783	0
JKC	4.12379688	20.58823529	9.160305344	0.71778512	1.314785054
JKD	2.007201921	25.89317936	5.444785276	0.640966944	0.379157249
JKE	11.65466457	72.30239543	22.41594022	6.635564395	3.725503048
JKF	17.67874086	52.85811372	19.57637997	1.877646428	1.104317276
JKH	3.516624041	23.35640138	20.48319328	0.834064969	1.225232198
JKI	2.357624005	23.68130351	7.453051643	0.662182048	0.414689894
JK5	8.542697214	56.84709013	18.50465735	1.042690738	2.230626466
JK8	110.0052383	2463.973541	1189.759036	44.05682431	13.53836398
JK10	8.283183447	314.4268594	70.37325039	2.762238574	1.154538757
JK11	4.15350155	42.49703976	19.83111566	1.514943196	0.96944639
JK14	3.315427228	31.11514876	14.20297849	3.976257708	0.520219468
EF(S2)	9.3	131.67	61.1	2.94	1.62

Tableau 7. Indice géoaccumulation Igeo dans les moellons

CODE	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK5b	0.176877762	4.46712601	2.673771768	-0.311201688	-1.679084678
HKK6	0.081300102	3.179323699	2.200139614	-2.56358885	-1.535698598
HKK14	0.743224585	5.040101658	3.054765803	-2.127489735	-3.554905267
HKK28	-0.36705747	5.307714236	3.881478176	-0.403124178	-1.197135623
HKK39	0.422857004	2.349942471	1.826851098	-2.843696769	-1.182125455
HKK40	-0.16600995	2.517399217	2.025535092	-2.651051691	-3.548968242
JKK2	-0.25054346	4.955108543	3.949757245	-0.422233001	-1.83831029
JKK3	0.513527363	3.173064709	1.767553914	-1.441598326	-4.482392767
JKK4	0.39132143	2.304854582	1.902303326	-2.48112669	-1.762500686
JKK5	-0.15432814	3.866733469	3.222392421	-2.329123596	-1.124702778
JKK6	0.422857004	3.270089163	1.902303326	-2.329123596	-2.984893108
JKK7	0.476438044	0	1.050626073	-1.950611973	-3.748825749
JKK15	-0.46466826	3.234465254	1.736965594	-2.191620073	-3.11480243
JKK16	0.213403638	2.055495113	1.251538767	-2.191620073	-2.191343985
JKK17	0	0	1.797507136	-1.159198595	-4.790245677
JKK18	-0.35363695	2.546743178	1.974004791	-1.744161096	-3.350041731
JKK19	-0.03170886	2.770518154	1.965234582	-2.56358885	-1.492327745
JKA	-1.30116953	1.897430266	1.673771768	-2.258734268	-2.878693704
JKB	-0.61667136	1.835369298	1.526545814	-2.48112669	-2.462725734
JKC	-0.27563444	2.028014376	1.86507042	-1.258734268	0
JKD	0.041222663	2.36099766	1.192645078	-2.48112669	-1.607923649
JKE	-0.68225970	3.007054758	0.757429697	-2.329123596	-3.086577248
JKF	-0.16600995	2.46712601	0.777607579	-0.978626349	-1.811410287
JKH	-0.32716474	2.404390255	2.215012891	-2.403124178	-1.848300664
JKI	0.275179836	2.055495113	1.573466862	-1.793070696	-3.337194852
JK5	-0.03170886	2.702614089	1.083416008	-3.06608919	-1.968951564
JK8	-0.93859945	3.546743178	2.496425826	-2.258734268	-3.961046366
JK10	-0.97924144	4.267153872	2.107528464	-2.56358885	-3.822110175
JK11	-1.10852446	2.246437895	1.146841388	-2.56358885	-3.207619525
JK14	-0.80474371	2.425606741	1.294183104	-0.542527234	-3.476746204
Igeo(S2)	-0.18	2.8	1.92	-1.95	-2.55

Tableau 8 : Indice géoaccumulation Igeo dans le shale

	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK26	-0.16600995	3.404390255	2.335603032	-2.258734268	-2.634395861
HKK29	0.266514975	2.517399217	3.185111405	0.652729057	-1.63596828
HKK66	0.679378103	4.4798595	8.470707287	-1.224786936	-1.614108846
JKK1	-0.40808473	2.425606741	1.641105579	-2.744161096	-2.943416472
JKK8	-0.22588140	3.855051664	1.335603032	-2.191620073	-0.96203215
JKK12	-3.78659636	3.102361718	1.846087317	-2.56358885	-2.679084678
JKK13	-0.17778711	2.507483748	1.893084796	-2.950611973	-1.505921303
JKK14	-1.04243526	2.222392421	1.929610672	-0.818161677	-2.02244691
JKK17	0	0	1.797507136	-1.159198595	-4.790245677
JKK20	0.37529132	2.258311996	1.902303326	-2.191620073	-2.685583315
JKK21	-0.58496250	1.327574658	0.335603032	-3.843696769	-4.163863249
JK1	-0.06413033	3.264212597	1.596367264	-1.896164189	-2.571359199
JK2	-1.75097245	3.420331799	1.736965594	-2.56358885	-4.510961919
JK3	-0.73348502	4.319096504	3.749789635	-2.744161096	-1.1627295
JK4	-1	3.502500341	2.222392421	-1.950611973	-2.677464582
JK8	-0.93859945	3.546743178	2.496425826	-2.258734268	-3.961046366
JK12	-1.10852445	2.08246216	1.083416008	-3.329123596	-2.521096296
JK13	-0.05324202	4.125236184	2.888453347	-1.950611973	-0.440229133
JK16	0.570955643	5.919097005	3.836501268	-1.744161096	-1.843751007
Igeo(S3)	-0.5	3.22	2.49	-2.07	-2.54

Tableau 9 : Facteurs d'enrichissement EF dans le shale

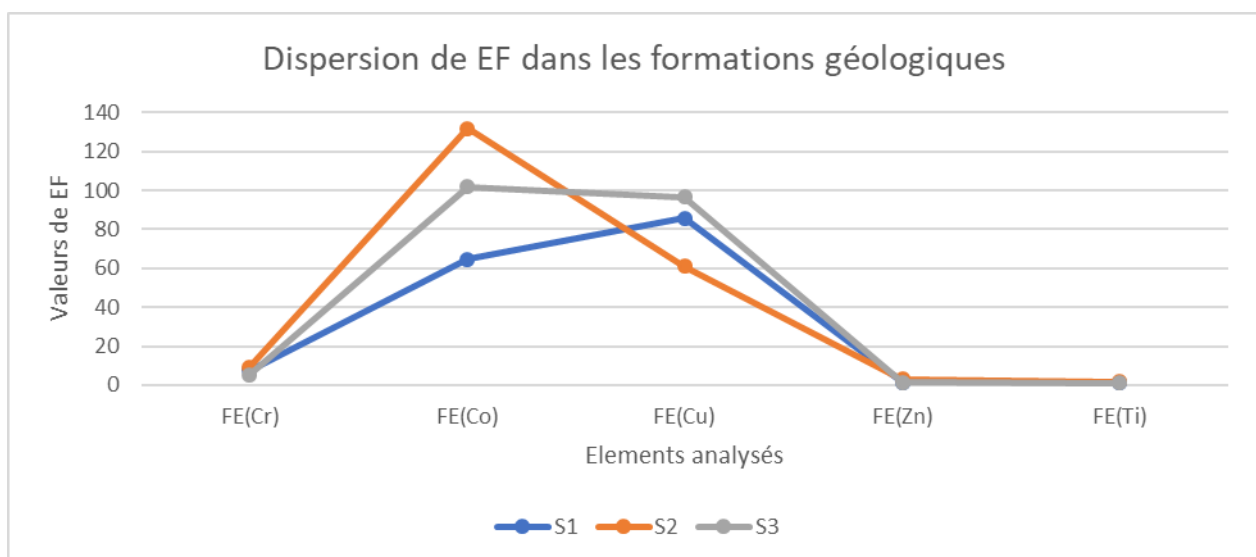
CODE	Cr	Co	Cu	Zn	Ti
HKK26	3.743478261	44.47058824	21.2	0.87761194	0.676421053
HKK29	6.191389599	29.46943483	46.81372549	8.091893474	1.656088751
HKK66	6.321510297	88.08049536	1400.37594	1.688923802	1.289473684
JKK1	8.691831589	61.96371343	35.97319859	1.721401778	1.499340949
JKK8	0.372975277	44.20415225	18.50490196	0.870646766	0.803663571
JKK12	3.683574879	23.69281046	15.47619048	0.538971808	1.467105263
JKK13	2.178558157	20.94017094	17.09401709	2.54496747	1.104475933
JKK14	0	0	0	0	0
JKK17	6.364282812	23.4744365	18.3411215	1.074068908	0.762666011
JKK20	11.35994807	42.76686332	21.50275884	1.186860246	0.950648286
JKK21	17.67874086	52.85811372	19.57637997	1.877646428	1.104317276
JK1	5.672554348	19.48529412	13.95089286	1.35261194	0.463815789
JK2	2.357624005	23.68130351	7.453051643	0.662182048	0.414689894
JK3	2.075006796	74.77169396	23.28056405	1.181401758	0.306323211
JK4	1.783959715	59.20571618	39.90112994	0.442701746	1.324858757
JK8	0.944244604	21.4028777	8.81294964	0.488564372	0.295200682
JK12	0.775148619	23.23765968	13.97453083	0.476171422	0.175814872
JK13	5.508557938	50.30609529	25.16968326	1.181873438	2.069242677
JK16	1.675424705	30.33696922	12.87251656	0.449738065	1.281239108
EF(S3)	5.44	101.67	96.5	1.58	1

Le Facteur d'enrichissement et l'indice de géoaccumulation sont définis par rapport à un fond géochimique naturel correspondant aux teneurs métalliques pré-anthropique.

Pour garantir une représentativité spatiale et lisser l'hétérogénéité minéralogique intrinsèque aux roches, les valeurs des indices géochimiques (EF et Igeo) ont été calculées sur la base des teneurs moyennes par unité lithologique (S1 pour le sable concassé, S2 pour les moellons et S3 pour les shales). Cette démarche d'agrégation par faciès permet de comparer efficacement la signature géochimique propre à chaque formation géologique face au bruit de fond [11,32]. Les différentes valeurs sont reprises dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10. Valeurs moyennes du Facteur d'enrichissement (EF)

CODE	EF(Cr)	EF(Co)	EF(Cu)	EF(Zn)	EF(Ti)
S1	7.66	64.56	85.68	1.28	1.51
S2	9.3	131.67	61.1	2.94	1.62
S3	5.44	101.67	96.5	1.58	1


Figure 4. Dispersion du facteur d'enrichissement

Le Shale (S3) affiche les valeurs EF le plus élevé pour le Cuivre (96,50) et pour le cobalt (101,67). Sables (S1) et Moellons (S2) montrent un pic de EF du Cobalt à 131,67 dans les moellons (S2), tandis que le Cuivre domine dans le sable concassé (S1 avec le pic à 85,68).

Tableau 11. Valeurs moyennes de l'indice géoaccumulation

CODE	Igeo(Cr)	Igeo(Co)	Igeo(Cu)	Igeo(Zn)	Igeo(Ti)
S1	0.08	2.97	2.93	-1.95	-2.98
S2	-0.18	2.8	1.92	-1.95	-2.55
S3	-05	3.22	2.49	-2.07	-2.54

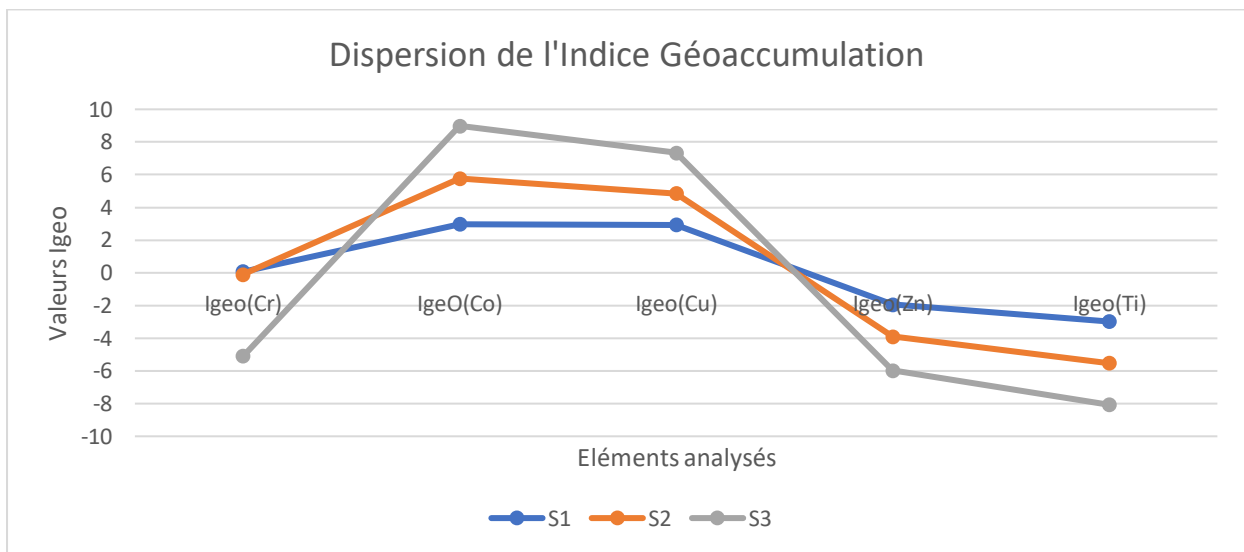


Figure 5. Dispersion de l'Igeo dans les différentes formations géologiques S1, S2, S3.

3 Discussion

4.1. Origine géogénique vs anthropique des éléments

Les valeurs négatives de l'Igeo pour le Cr, Zn et Ti (-2,98 à -1,95) indiquent une sous-accumulation par rapport au bruit de fond géochimique. Le Ti et le Cr sont des éléments réfractaires typiques de l'apport détritique continental (minéraux lourds terrigènes comme le rutile, l'ilménite ou le chromite). Leur absence d'enrichissement confirme qu'ils proviennent uniquement du fond pédogéochimique naturel [18,28].

Les valeurs du Facteur d'enrichissement montrent que :

- Le Cobalt a des valeurs qui varient entre 64,56 et 131,67 ; traduisant ainsi un enrichissement extrêmement fort ($EF > 50$). Le cobalt présente les valeurs les plus élevées de la série, avec un pic majeur sur S2 (131,67).
- Le Cuivre présente un EF qui varie entre 61,10 et 96,50 ; traduisant un enrichissement extrêmement fort ($EF > 50$).

Toutes les valeurs dépassent largement le seuil de 50. Cela signale un piégeage massif du cuivre, très probablement lié à une forte accumulation de matière organique, des pièges sulfurés en milieu réducteur, ou une minéralisation syn-diagénétique [2,20,31].

- Le Chrome a des valeurs qui vont de 5,44 à 9,30 – Enrichissement Modéré ($3 < EF \leq 10$). Les valeurs restent modérées mais nettement supérieures au fond terrigène ($EF > 3$). Cela indique un milieu d'incubation suboxique à anoxique favorisant la rétention du chrome ou une signature lithologique légèrement mafique.

- Le Zinc a des valeurs allant de 1,28 à 2,94 ; traduisant un enrichissement nul à négligeable ($1 \leq EF \leq 3$). Le zinc reste proche de la ligne de base naturelle. Son apport est quasi exclusivement terrigène/détritique, sans accumulation authigène marquée.
- Le Titane quant à lui, montre un facteur d'enrichissement qui varie entre 1 et 1,62 ; élément normalisateur terrigène. Des valeurs proches de 1 confirment que le titane reflète le fond géochimique naturel (apports silico-clastiques) sans enrichissement exogène.

Les valeurs de l'indice de géoaccumulation montrent que :

- Cobalt (Igeo compris entre 2,80 et 3,22) – Modérément à Fortement Pollué ou Enrichi (Classe 3 à 4)
 - ✓ S1 (2,97) et S2 (2,80) se situent au sommet de la classe 3 (fort enrichissement).
 - ✓ S3 (3,22) franchit le seuil de la Classe 4 (Fortement pollué / très fortement enrichi).

Le cobalt est l'élément présentant l'accumulation la plus critique.

- Cuivre (Igeo varie entre 1,92 et 2,93) – Modérément à Fortement Pollué / Enrichi (Classe 2 à 3).
 - ✓ S2 (1,92) : Classe 2 (Modérément pollué/enrichi).
 - ✓ S3 (2,49) et S1 (2,93) : Classe 3 (Modérément à fortement pollué/enrichi).

Le cuivre montre une contamination/enrichissement très marqué.

- Chrome (Igeo varie entre -0,50 et 0,08) – Non Pollué (Classe 0 à 1).
 - ✓ S2 (-0,18) et S3 (-0,50) : Igeo < 0 (Aucune pollution/enrichissement, fond naturel intact).
 - ✓ S1 (0,08) : Légère présence juste au-dessus de 0, indiquant une trace insignifiante.
- Zinc (Igeo varie entre -2,07 et -1,95) & Titane (Igeo entre -2,98 et -2,54) – Non Pollués (Classe 0).
 - ✓ Des valeurs fortement négatives (Igeo < 0) confirment un appauvrissement net ou un niveau strictement inférieur au fond géochimique de référence pour le Zinc et le Titane.

Les résultats d'Igeo concordent parfaitement avec les résultats du facteur d'enrichissement (EF) :

1. Signature Anomale Cu-Co : Les échantillons sont caractérisés par une accumulation sélective et massive en Cobalt (Igeo = 3 et EF compris entre 64,56 et 131,67 :) et en Cuivre (Igeo compris entre 2 et 3 et EF compris entre 61,10 et 96,50).
2. Absence de pollution diffuse : Le Zn, le Cr et le Ti ne montrent aucune accumulation, ce qui exclut une contamination anthropique globale non spécifique et pointe vers un phénomène géologique marqué par une minéralisation ciblée (type cuivre-cobalt) ou une condition de piège réducteur très spécifique.

Nous constatons également que ces échantillons partagent une signature géochimique très homogène : $EF(Co) \geq EF(Cu) > EF(Cr) \geq EF(Zn)$ qui traduit :

- Conditions Redox : L'association conjointement extrême des EF du Co et du Cu ($EF > 50$) indique un dépôt en bassin fortement réducteur (anoxique/euxinique) à forte préservation de sulfures ou de matière organique.
- Hypothèse Minéralisation : comme la carrière Kananga-Est est située dans l'arc cupro-cobaltifère du Katanga, ces valeurs de EF pour le Cu et le Co sont la signature directe d'une minéralisation hydrothermale ou d'un enrichissement d'intérêt économique.

4.2. Evaluation des risques environnementaux et du Drainage Minier (DMA/DMN)

L'utilisation de ces matériaux de construction (moellons S2, sables S1 et shales S3) pour des ouvrages d'infrastructure pose un problème d'ordre environnemental et sanitaire :

- **Drainage Minier et Remobilisation** : L'exposition à l'air libre et aux précipitations de matériaux concassés ou pulvérisés accélère l'oxydation des sulfures accessoires (chalcopryrite, carrollite). En fonction du pouvoir tampon carbonaté des faciès (teneurs en CaO et MgO élevées dans le faciès S2), la lixiviation peut générer un **Drainage Minier Acide (DMA)** ou un **Drainage Minier Neutre (DMN)**. Même sous un pH neutre ou légèrement alcalin, le cobalt et le cuivre conservent une mobilité non négligeable sous forme de complexes solubles.
- **Impact sur les constructions et les populations** : L'utilisation des shales (S3) pour fabriquer des briques artisanales ou des sables (S1) pour les mortiers risque de favoriser l'émission de poussières riches en Co-Cu ou la contamination des eaux de ruissellement adjacentes aux zones habitées.

4 Conclusion

L'étude géochimique des matériaux de construction de la carrière artisanale de Kananga-Est démontre que si les éléments terrigènes (Cr, Zn, Ti) conservent des concentrations naturelles non polluées ($Igeo \leq 0$ $EF < 1$), les faciès extraits présentent un enrichissement exceptionnel en cobalt et en cuivre ($EF > 40$, Igeo jusqu'à 4,90). Ces teneurs très élevées découlent de l'empreinte métallogénique régionale de Ceinture Cuprifère du Katanga.

L'apport des indices de pollution (EF et Igeo) dans l'évaluation géochimique et impact environnemental des matériaux de construction exploités artisanalement dans la carrière Kananga-Est montre :

1. Origine des métaux : Les fortes valeurs d'EF et d'Igeo mesurées pour le cuivre et le cobalt ne reflètent pas une pollution anthropique, mais constituent une anomalie géochimique d'origine naturelle (fond géochimique enrichi ou minéralisation syn-diagénétique) liée aux conditions de dépôt du bassin et à la nature de la roche-mère. Minéralisation Syn-diagénétique du Cuivre (Gisements Stratiformes) [7,9,15].
2. Sélectivité extrême (Co-Cu uniquement) : Une pollution anthropique (industrielle, minière active, urbaine) s'accompagne presque toujours d'une contamination multi-élémentaire incluant des traces significatives de Zinc (Zn), de Chrome (Cr), ou d'autres métaux lourds associés. Ici, Zn et Cr restent strictement aux niveaux du fond naturel ($I_{geo} < 0$) [5,19,26].
3. Absence d'anomalie sur le Zinc (Zn) : Le zinc est le traceur le plus mobile et le plus classique des pollutions de surface. Des valeurs d'Igeo $< -1,9$ pour le zinc excluent un apport contaminant externe récent. [16,23].
4. Proportion géologique cohérente : L'association massive Cuivre-Cobalt ($EF > 50$, Igeo contenu entre 2 et 3) est la signature typique des formations géologiques minéralisées (comme les gisements stratiformes de type Copperbelt) [15].
5. Impact environnemental (Pollution potentielle à avérer) : Même si ces métaux sont initialement piégés dans les roches (faciès shales S3 ou moellons S2), l'extraction artisanale non régulée et l'absence de plan de gestion exposent ces faciès à l'air et à l'eau. Cela déclenche le drainage minier et solubilise ces métaux traces toxiques (Cu, Co), les rendant biodisponibles pour les sols et les aquifères environnants. Ces résultats permettent de conclure formellement à une forte contamination géochimique en Co et Cu, qui se traduit sur le terrain par un risque majeur de pollution environnementale et sanitaire dû au mode d'exploitation informel [1,6].
6. Pour réduire l'impact environnemental et prémunir les populations environnantes contre la dispersion des métaux lourds, les recommandations suivantes doivent être mises en œuvre :
 - ✓ **Gestion des effluents géochimiques** : L'aménagement de bassins de décantation au bas des fronts de taille de la carrière Kananga-Est pour piéger les fines particules sédimentaires et neutraliser les eaux de ruissellement avant leur rejet dans le réseau hydrographique [1,6].
 - ✓ **Gestion des terrils et réhabilitation** : Procéder à la stabilisation physique et à la couverture végétale (planter des espèces végétales tolérantes aux métaux phytostabilisation) des haldes de stériles et des stocks de fines pour limiter l'érosion éolienne et pluviale [30].
 - ✓ **Encadrement et cartographie sélective** : Réaliser un zonage géochimique de la carrière afin d'orienter l'extraction artisanale vers les niveaux les moins minéralisés pour les usages en construction résidentielle.
 - ✓ **Encadrement technique et sanitaire** : La formalisation de l'activité artisanale, sensibilisant les exploitants à la sécurité et imposant le port d'équipements de protection individuelle (EPI) [13] et la mise en place d'un programme régulier de suivi de la qualité des eaux souterraines et de surface aux alentours du site.

REFERENCES

- [1] Akcil, A., & Koldas, S. (2006). *Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies*. Journal of Cleaner Production, 14(12–13), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- [2] Algeo, T. J., & Maynard, J. B. (2004). Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*, 206(3-4), 289-318. (Détaille les seuils d'enrichissement métallique et le rôle des faciès anoxiques/euxiniques). <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.009>

- [3] Annels, A. E. (1989). Ore deposits of the Zambian Copperbelt. In *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits* (pp. 165-188). Geological Association of Canada Special Paper 36.
- [4] Bendixen, M., et al. (2019). *Time is running out for sand*. Nature, 571(7763), 29–31.
- [5] Biolchi, L. G., et al. (2020). Distinguishing natural background from anthropogenic contamination of trace elements in sediments. *Environmental Earth Sciences*, 79(12), 1-15. (Analyse l'utilisation conjointe des indices Igeo et EF pour isoler les fonds géochimiques locaux des apports anthropiques multi-élémentaires). <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>
- [6] Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., & Blowes, K. E. (2014). *The Geochemistry of Acid Mine Drainage*. In: *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Elsevier, Vol. 11, pp. 131–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- [7] Boyle, R. W. (1984). Sediment-hosted stratiform copper deposits. *Geoscience Canada*, 11(3), 127-140. (Analyse l'accumulation du cuivre diagénétique en lien avec les matières organiques et les pyrites syn-sédimentaires). <https://doi.org/10.12789/geocanj.v11i3.18181>
- [8] Buat-Menard, P., & Chesselet, R. (1979). Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(3), 399–411. (Référence standard pour la normalisation par un élément conservateur comme Al, Fe ou Ti. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90049-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90049-9)
- [9] Cailteux, J. L. H., Kampunzu, A. B., & Lerouge, C. (2005). The Katangan Copperbelt of DRC and Zambia: Ore genesis constraints from mineralogical, geochemical and isotopic data. *Ore Geology Reviews*, 27(1-4), 79-108. (Consacré aux pièges diagénétiques et réducteurs massifs du cuivre dans la ceinture cupro-cobaltifère). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.011>
- [10] Chakravarty, M., & Patgiri, A. D. (2009). Metal Pollution Assessment in Sediments of the Dikrong River, N.E. India. *Journal of Human Ecology*, 27(1), 63–67. <https://doi.org/10.1080/09709274.2009.11906193>
- [11] Covelli, S., & Fontolan, G. (1997). *Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines: Gulf of Trieste, Italy*. *Environmental Geology*, 30(1), 34–45. <https://doi.org/10.1007/s002540050130>
- [12] FRANCOIS A. (1973) : L'extrémité occidentale de l'arc Cuprifère Shabien : étude géologique. Rapport inédit, Gécamines/groupe centre, Départ. de Géologie. p12-20. https://www.kaowarsom.be/documents/PDF%20BULLETIN/PRAOS-1_A4_Fran%C3%A7ois.pdf
- [13] Hentschel, T., Hruschka, F., & Priester, M. (2002). *Global Report on Artisanal and Small-Scale Mining*. Working Paper No. 70, Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD) Project, International Institute for Environment and Development (IIED) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), London, UK, 96 p. <https://www.iied.org/g00723>
- [14] Hilson, G. (2002). *An overview of land use conflicts in mining communities*. *Land Use Policy*, 19(1), 65–73. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(01\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(01)00043-6)
- [15] Hitzman, M. W., Kirkham, R., & David, D. (2005). Sediment-hosted stratiform copper deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 609-642. (Ouvrage de référence sur les gisements de cuivre hébergés dans les sédiments, décrivant la précipitation syn-diagénétique au contact des piègeurs réducteurs). <https://doi.org/10.5382/AV100.19>
- [16] Horowitz, A. J. (1991). *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*. Lewis Publishers, Chelsea, 136 p. (Ouvrage de référence expliquant pourquoi l'absence d'enrichissement sur le zinc (Igeo<0) permet d'exclure un apport contaminant récent de surface). ISBN 978-0-87371-360-3
- [17] Martin, J. M., & Meybeck, M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7(3), 193–206. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(79\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(79)90039-2)
- [18] McLennan, S. M. (1993). Weathering and global sedimentary geochemistry. *The Journal of Geology*, 101(2), 295–303. <https://doi.org/10.1086/629633>
- [19] Meybeck, M., & Helmer, R. (1989). The quality of rivers: from pristine stage to global pollution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 75(4), 283-309. (Étude fondamentale montrant que les rejets urbains et industriels génèrent un cortège pluri-élémentaire typique comprenant Zn, Cr, Pb, Cd

- et Cu, contrairement aux signatures d'origine naturelle). [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00258-6](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00258-6)
- [20] Morse, J. W., & Luther III, G. W. (1999). Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19-20), 3373-3378. (Traite des réactions chimiques entre les métaux de transition et la phase sulfurée diagénétique). [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00258-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00258-6)
- [21] Muchez, P., Brems, D., Haest, M., Dewaele, S., & El Desouky, H. (2010). Sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits in the Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *Geologica Belgica*, 13(4), 341-346.
- [22] Müller, G. (1981). *Die Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme*. *Chemiker-Zeitung*, 105, 157-164.
- [23] Müller, G. (1979). Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins—Veränderungen seit 1971. *Umschau*, 79(24), 778-783. (L'article princeps détaillant l'utilisation du Zn comme traceur universel d'impacts anthropiques fluviaux et sédimentaires).
- [24] Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Vol. 3, pp. 1-64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- [25] Spiegel, S. J. (2012). *Governance institutions, resource rights pathways: Assessing the coalition against artisanal mining in Sub-Saharan Africa*. *Development and Change*, 43(2), 541-570. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7660.2012.01770.x>
- [26] Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment classification for trace elements in an urban stream. *Environmental Management*, 25(5), 555-567. (Démontre que les pollutions anthropiques perturbent simultanément plusieurs métaux de transition, notamment le zinc et le plomb, servant d'indicateurs de contamination globale). <https://doi.org/10.1007/s002679910043>
- [27] Sweeney, M. A., Binda, P. L., & Vauchez, A. (1991). Genesis of the Central African Copperbelt: a review. *Ore Geology Reviews*, 6(4), 365-385. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90011-G](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90011-G)
- [28] Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 312 p.
- [29] Tessier, A., Campbell, P. G., & Bisson, M. (1979). *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals*. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- [30] Tordoff, G. M., Baker, A. J. M., & Willis, A. J. (2000). *Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes*. *Chemosphere*, 41(1-2), 219-228. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00414-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00414-2)
- [31] Tribouillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232(1-2), 12-32. (Article incontournable expliquant les mécanismes d'enrichissement et de précipitation des métaux comme le cuivre et le molybdène en présence d'H₂S et de matière organique). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- [32] Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). *Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust*. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72)
- [33] Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232. (Référence classique pour les concentrations de fond géochimique / UCC). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- [34] Zhang, J., & Liu, C. L. (2002). *River geochemistry of toxic metals in the Asia-Pacific region*. *Quaternary International*, 82(1), 43-52. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00078-3)