

## **Signature géochimique des formations ferrifères rubanées et leur rôle dans la minéralisation aurifère de Zani-Koddo (Supergroupe de Kibali, RDC)**

***Serge Safari Madjabulu***

Université de Bunia, RDC

***Gabriel Makabu Kayembe***

***Pierre Mashala Tumone***

Université de Lubumbashi, RDC

***Désiré Katembo Kasekete***

Université Officielle de Rwenzori, RDC

---

Approved: 17 May 2026

Posted: 19 May 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

*Cite As:*

Madjabulu, S.S., Kayembe, G.M., Tumone, P.M., & Kasekete, D.K. (2026). *Signature géochimique des formations ferrifères rubanées et leur rôle dans la minéralisation aurifère de Zani-Koddo (Supergroupe de Kibali, RDC)*. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2026.p736>

---

### **Résumé**

Le gisement aurifère de Zani-Koddo, situé dans le Supergroupe de Kibali au nord-est de la République Démocratique du Congo, est encaissé dans des formations ferrifères rubanées (BIF) associées aux roches de la ceinture verte. Cette étude vise à caractériser la signature géochimique des Banded Iron Formation et à préciser leur rôle dans la concentration de l'or. Les données géochimiques issues de vingt-trois échantillons montrent une anomalie positive marquée en or (Au) et en argent (Ag), tandis que les éléments lithophiles (Nb, Ta, W) sont globalement appauvris. L'analyse en composantes principales distingue une association Au-Ag-Fe typique des systèmes aurifères orogéniques. Les corrélations indiquent une origine hydrothermale des minéralisations, contrôlée par les structures tectoniques. Les BIF jouent un double rôle : mécanique et chimique, agissant comme pièges à fluides minéralisateurs. Ces résultats indiquent un modèle de gisement de type « BIF-hosted gold deposit ».

**Mots-clés :** BIF, minéralisation aurifère, géochimie, Kibali, Zani-Koddo, hydrothermalisme

---

## **Geochemical Signature of Banded Iron Formations and Their Role in Gold Mineralization at Zani-Koddo (Supergroup, DR Congo)**

*Serge Safari Madjabulu*

Université de Bunia, RDC

*Gabriel Makabu Kayembe*

*Pierre Mashala Tumone*

Université de Lubumbashi, RDC

*Désiré Katembo Kasekete*

Université Officielle de Rwenzori, RDC

---

### **Abstract**

The Zani-Koddo gold deposit, located within the Kibali Supergroup in northeastern Democratic Republic of Congo, is hosted by banded iron formations (BIF) within Archean greenstone belts. This study investigates the geochemical signature of BIF and their role in gold mineralization using trace element data from twenty-three samples. Results indicate strong enrichment in Au and Ag, with high Fe concentrations and depletion of lithophile elements (Nb, Ta, W). Principal Component Analysis highlights a dominant Au-Ag-Fe association characteristic of orogenic gold systems. Element correlations suggest hydrothermal fluid control rather than magmatic origin. BIF act as both mechanical and chemical traps, promoting sulfide formation and gold precipitation. These findings indicate a BIF-hosted orogenic gold deposit model.

---

**Keywords:** BIF, gold mineralization, geochemistry, Kibali, Zani-Koddo, hydrothermal system

---

### **I. Introduction**

Les gisements aurifères associés aux formations ferrifères rubanées (BIF) sont largement décrits dans les ceintures de roches vertes archéennes (Groves et al., 1998). Dans le district minier de Kilo-Moto, ces formations constituent des hôtes privilégiés de la minéralisation aurifère (Antoine, 1933 ; Legraye, 1940). Le gisement de Zani-Koddo s'inscrit dans ce contexte géodynamique et présente une minéralisation contrôlée par des facteurs lithologiques et structuraux. L'hypothèse centrale de cette étude postule que

la minéralisation aurifère de Zani-Koddo résulte d'un système orogénique polyphasée dans lequel les formations ferrifères rubanées jouent un rôle de piège chimique favorisant la précipitation de l'or, tandis que les structures tectoniques notamment les zones de cisaillement ; fractures et plis, assurent le contrôle structural en facilitant la circulation et la concentration des fluides hydrothermaux aurifères (Goldfarb et al., 2005 ; Groves et al., 1998 & Hageman et Cassidy, 2000). Ce modèle est cohérent avec les travaux réalisés dans les terrains archéens du Kibalien, où les interactions litho-structurales contrôlent fortement la minéralisation aurifère (Lavreau, 1982 ; Lepersonne, 1957 & Woodtli, 1954). L'objectif de cette étude est de :

- (1) Caractériser la signature géochimique des BIF ;
- (2) Analyser leur rôle dans la concentration de l'or.

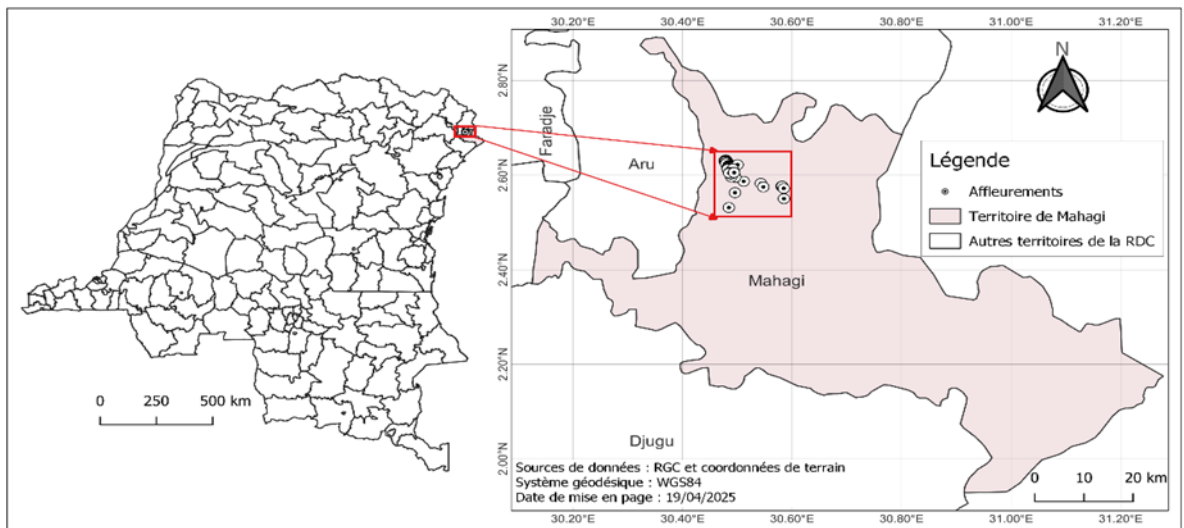
## **II. Methodologie**

### **II.1. Description de la zone d'étude et Contexte géologique**

La présente étude a été réalisée à Zani-Koddo en Chefferie des Alurs Djuganda, Territoire de Mahagi, Province de l'Ituri, en République Démocratique du Congo (Figure 1). Ce secteur appartient au Supergroupe de Kibali, constitué d'un socle granito-gneissique recouvert par des formations volcano-sédimentaires métamorphisées (Lavreau, 1984). Les lithologies comprennent :

- (1) Amphibolites, schistes et quartzophyllades ;
- (2) Granitoïdes (granite, tonalite, granodiorite) ;
- (3) Formations ferrifères rubanées (BIF).

Les BIF sont caractérisés par une alternance de quartz et d'oxydes de fer (hématite, goéthite), confirmée par les observations microscopiques. L'accessibilité à Zani-Koddo par l'axe Bunia-Djalasiga a permis l'observation et description directes des affleurements sur terrain et favorisé le prélèvement des échantillons.



**Figure 1 : Milieu d'étude**

## II.2. Echantillonnage et travaux de terrain

Les campagnes de terrain ont été réalisées suivant des itinéraires bien définis afin de garantir la représentativité lithologique. L'échantillonnage lithogéochimique nous a permis d'obtenir vingt-trois échantillons représentatifs permettant de caractériser la composition chimique des roches et d'identifier d'éventuelles anomalies métalliques, notamment aurifères. Nous avons tenu compte du contexte lithologique en intégrant la lithologie, les structures tectoniques et les indices de minéralisation tels que l'altération hydrothermale ou la présence des sulfures (Rollinson, 1993).

Les échantillons ont été prélevés sous forme des roches fraîches en évitant les surfaces altérées afin de garantir des résultats analytiques représentatifs. Le prélèvement s'est fait à l'aide d'un marteau géologique en extrayant des fragments homogènes de masse suffisante comprise entre 0,5 et 2kg tout en minimisant les risques de contamination (Govett, 1983).

## II.3. Préparation et analyses géochimiques

Les échantillons de roches ont tout d'abord été séchés, concassés puis pulvérisés jusqu'à l'obtention d'une poudre fine et homogène afin d'assurer une distribution uniforme des éléments chimiques. Cette étape est essentielle pour limiter les biais analytiques liés à l'hétérogénéité minéralogique (Rollinson, 1993). La poudre obtenue a été soumise à la spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) après digestion acide afin d'assurer une dissolution quasi-totale des phases minérales réfractaires notamment les minéraux accessoires présents dans les BIF au laboratoire géologique de l'Université de Lubumbashi. La fusion au métaborate et tétraborate de

lithium, suivie d'une dissolution acide a permis d'obtenir des solutions homogènes adaptées aux analyses ICP-MS, garantissant ainsi une meilleure représentativité géochimique des échantillons (Rollinson, 1993 ; Hall, 1996). L'ICP-MS a été privilégié en raison de ses très faibles limites de détection, généralement de l'ordre du ppm (partie par million) à ppb (partie par billion) pour les éléments en traces analysés, ce qui est particulièrement important dans l'étude des signatures géochimiques des formations ferrifères rubanées. Cette méthode permet notamment la quantification précise des éléments en traces utilisés pour l'interprétation des environnements de dépôt, des processus hydrothermaux et des conditions tectono-sédimentaires associées à la genèse des formations ferrifères (Rollinson, 1993 ; Potts, 1987). Les limites de détection ont été contrôlées à partir des blancs analytiques et du bruit instrumental afin d'assurer la fiabilité des données produites. Le contrôle qualité analytique a constitué une étape essentielle de la procédure méthodologique. Des blancs analytiques ont été insérés régulièrement afin de détecter toute contamination potentielle provenant des réactifs, des verreries ou des étapes de préparation. Des duplicatas de préparation et d'analyses ont également été utilisés pour le calibrage instrumental et le contrôle de l'exactitude analytique. Les standards internes ont permis de corriger les dérives instrumentales et les effets de matrice susceptibles d'influencer les concentrations mesurées. Les écarts observés entre duplicatas sont restés dans les limites acceptables généralement admises pour les analyses lithogéochimiques, attestant ainsi de la qualité et de la cohérence des données géochimiques acquises (Govindaraju, 1994 ; Potts, 1987). Spécifiquement pour l'or, la méthode dite de Pyroanalyse (fire assay) a été utilisée en raison de sa faible teneur et de sa distribution hétérogène (Govett, 1983). Les éléments en traces concernés sont notamment : or (Au), argent (Ag), fer (Fe), étain (Sn), tungstène (W), niobium (Nb), tantale (Ta), cuivre (Cu), cobalt (Co) et plomb (Pb).

L'ensemble de ces procédures analytiques a permis d'obtenir des données géochimiques fiables et précises, utilisées pour caractériser la signature géochimique des formations ferrifères rubanées de Zani-Koddo, évaluer leurs affinités géodynamiques et interpréter les processus métallogéniques associés à leur mise en place.

#### **II.4. Approche analytique et interprétative des données**

Les anomalies géochimiques ont été détectées en évaluant le niveau d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments analysés dans les échantillons, en procédant notamment par la normalisation des teneurs. Cette normalisation a été effectuée en divisant la teneur brute (exprimée en g/t, voire tableau 2 en annexe) de chaque trace-élément par son clarcke (voir tableau 3 en annexe). A partir des valeurs normalisées, un diagramme multi-

élément a été élaboré sous Microsoft Excel pour présenter les courbes d'évolution des teneurs dans les différents échantillons (voir figure 2). La comparaison des teneurs des éléments a été effectuée en utilisant le test apparié de Student (fonction « t.test » du package « stats » du logiciel R). Ce test « t » a été utilisé pour vérifier si les différences observées entre les concentrations moyennes de certains éléments géochimiques sont statistiquement significatives. Ce test permet de comparer deux groupes d'échantillons afin de déterminer si leurs signatures géochimiques traduisent réellement des conditions de formation différentes ou si les variations observées sont simplement dues aux fluctuations analytiques. Le calcul repose sur la comparaison des moyennes, des écarts-types et du nombre d'échantillons de deux groupes. Si la valeur calculée de « t » dépasse la valeur critique statistique au seuil de confiance choisi (généralement 95%), la différence entre les groupes est considérée comme significative. Pour cette étude, ce test contribue à renforcer l'interprétation des données lithogéochimiques et à valider les variations géochimiques observées dans les BIF de Zani-Koddo. Le lien entre les teneurs brutes des éléments dans les échantillons a été détecté en étudiant la corrélation. De ce fait, une matrice de corrélation inter-éléments a d'abord été élaborée en utilisant la fonction « cor » du package « stats » du logiciel R. Cette matrice a ensuite été affichée sous forme de corrélogramme (voir Tableau 4) grâce à la fonction « corrplot » du package « corrplot » (Taiyun & Viliam, 2024). Les coefficients de corrélation significatives (voir Tableau 4) ont été repérés en soumettant la matrice inter-éléments à un test de corrélation grâce à la fonction « corr.test » du package « psych » (William, 2026). Le test de corrélation a été utilisé pour évaluer le degré de relation entre différents éléments chimiques et identifier les associations géochimiques susceptibles de refléter les processus de dépôt, d'altération ou de minéralisation. Cette approche permet notamment de déterminer si certains éléments évoluent conjointement au sein des échantillons analysés. Les coefficients de corrélation obtenus ont ainsi permis de mieux interpréter les relations entre les éléments en traces dans les formations ferrifères étudiée. Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée en utilisant la fonction « PCA » du package « FactoMineR » pour générer le biplot montrant en superposition la distribution des éléments et des échantillons (figure 3). C'est une méthode statistique multivariée utilisée pour réduire la complexité des données géochimiques tout en conservant l'essentiel de l'information contenue dans les variables analysées. Elle permet de regrouper les éléments chimiques présentant des comportements similaires et d'identifier les principaux facteurs contrôlant la signature géochimique des roches étudiées. Cette méthode a permis de mettre en évidence les associations géochimiques dominantes, de distinguer les influences lithologiques et hydrothermales

ainsi que d'identifier les processus géodynamiques et métallogéniques ayant contribué à la formation des formations ferrifères rubanées. L'ACP repose sur la transformation des variables initiales en nouvelles composantes principales orthogonales, exprimées sous forme matricielle. Le diagramme de corrélation Au/Fe (Figure 4) a été réalisé à l'aide du logiciel Microsoft Excel à partir de données géochimiques obtenues sur les échantillons analysés. Les teneurs de fer ont été placées sur l'axe des abscisses (X) et celles de l'or sur l'axe des ordonnées (Y). Un graphique de type nuage de points (Scatter plot) a ensuite été généré afin de visualiser la relation entre les deux variables. Une droite de tendance linéaire a été ajoutée au diagramme, accompagnée de son équation et du coefficient de détermination ( $R^2$ ), permettant d'évaluer le degré de corrélation entre l'or et le fer dans le gisement étudié. Enfin, les cartes de distribution spatiales des teneurs en éléments enrichis dans la zone d'étude ont été générées par krigeage en utilisant l'algorithme « Interpolation TIN » du logiciel QGIS (voir figure 5). Cela consiste à estimer et spatialiser la distribution de variable géochimique à partir des points d'échantillonnage mesurés sur le terrain. Les données analytiques sont d'abord géo référencées puis intégrées dans le logiciel QGIS. L'algorithme TIN construit un réseau de triangles irréguliers reliant les points voisins les plus proches afin de modéliser la continuité spatiale des données. Le krigeage est ensuite appliqué pour interpoler les valeurs entre les points d'échantillonnage à partir de la structure de variabilité spatiale définie par le variogramme. Cette approche a permis de visualiser la répartition spatiale des signatures géochimiques et d'identifier les sites présentant des anomalies métallifères potentielles.

### III. Resultats

#### III.1. Présentation des Résultats

##### III.1.1. Données brutes

Le tableau 1 ci-dessous reprend les teneurs brutes (en g/t ou ppm) des éléments analysés dans les vingt-trois échantillons.

**Tableau 1:** Teneurs brutes des éléments en traces

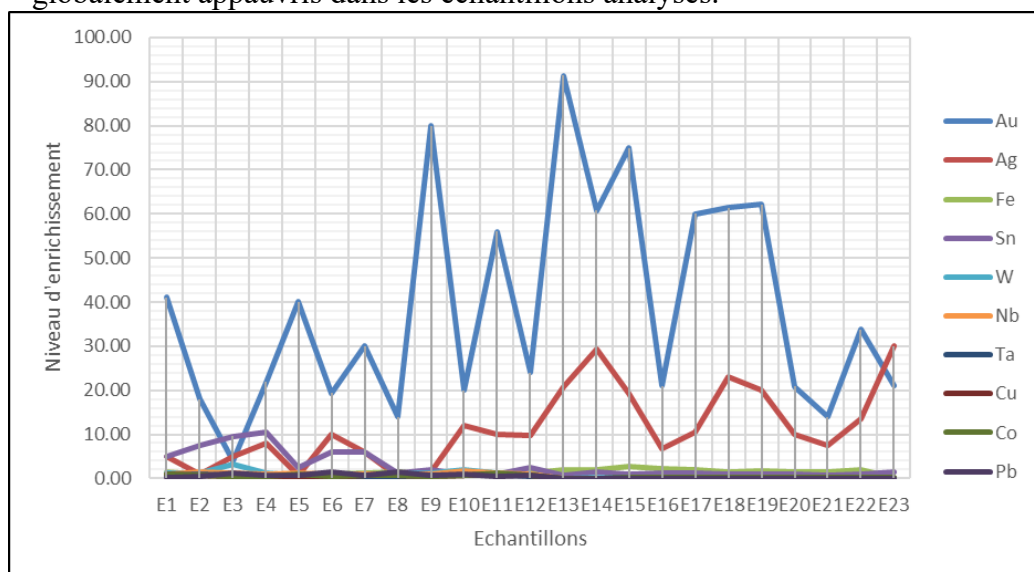
Ech	g/t									
	Au	Ag	Fe	Sn	W	Nb	Ta	Cu	Co	Pb
E1	2.05	0.5	70000	10	2	19	1.6	57	25	3
E2	0.9	0.09	52000	15	1.9	31	2	38	17	7
E3	0.2	0.5	42000	19	5	22	1.3	20	9	20
E4	1.09	0.8	35000	21	2	19	1	22	11	11
E5	2	0.07	50000	5	1.2	24	0.98	25	21	10
E6	0.97	1	53000	12	1	18	1.3	15	9	25
E7	1.5	0.6	61000	12	0.8	17	0.61	33	18	11
E8	0.7	0.04	73000	2.5	2	20	0.85	35	18.5	23
E9	4	0.15	43000	4	1.9	21	1.3	25	12	13
E10	1	1.2	85000	1.8	3	32	1.6	37	15	14

E11	2.8	1	65000	2	1.7	25	2	55	27	9
E12	1.2	0.98	55000	5	0.89	17	0.87	35	15	12
E13	4.57	2.07	100000	1.64	0.08	0.05	0.02	0.08	0.7	1
E14	3.04	2.94	101600	3.13	0.35	0.06	0.06	0.15	1.78	0.17
E15	3.75	1.94	137300	1.8	0.1	0.09	0.5	0.03	3.8	0.11
E16	1.05	0.67	107500	2.38	0.03	0.12	0.03	0.47	4.95	0.09
E17	3	1.04	93640	2.37	0.02	0.15	0.01	0.6	5.54	0.06
E18	3.07	2.3	74280	2.04	0.04	0.11	0.06	0.09	5	0.2
E19	3.11	2.01	87850	2.13	0.035	0.17	0.08	0.04	6.88	0.02
E20	1.04	1.01	76400	1.92	0.04	0.1	0.09	0.13	2.45	0.05
E21	0.7	0.75	77850	1.28	0.05	0.07	0.03	0.12	3.28	0.75
E22	1.69	1.35	94280	1.8	0.05	0.06	0.02	0.07	6	1.3
E23	1.05	3	11560	2.88	0.05	0.32	0.08	0.05	4.94	1.07

A partir de ces résultats, nous constatons que la répartition des éléments dans les échantillons n'est pas régulière. Certains échantillons concentrent plus les éléments que d'autres et inversement. Aussi, certains sites se révèlent riches que d'autres en tels ou tels autres métaux.

### III.1.2. Détection des anomalies géochimiques

La normalisation des teneurs en traces métalliques par rapport aux clarkes respectifs des éléments analysés a mis en évidence deux principaux éléments qui présentent des anomalies géochimiques positives dans la région étudiée. Il s'agit notamment de l'or (Au) et de l'argent (Ag). L'étain (Sn) s'est également révélé enrichi dans les sept premiers échantillons et appauvri dans tous les autres (figure 2). Quant aux autres éléments, ils sont globalement appauvris dans les échantillons analysés.



**Figure 2:** Evolution des teneurs normalisées des éléments dans les échantillons

### III.1.3. Analyse factorielle

L'analyse en composantes principales (ACP) indique que le premier groupe est constitué des échantillons qui montrent des fortes teneurs brutes en Au, Ag et Fe (figure 3). Sur le plan pétrographique, ces échantillons comprennent principalement les BIF accompagnés de micaschiste, tonalite, amphibolite, granite, quartzophyllade, granodiorite et andésite. Cet axe explique 59,9% de la répartition des éléments dans les différents échantillons. Le deuxième groupe rassemble les échantillons montrant des teneurs brutes relativement élevées en Cu, Co, Ta, Nb, W, Pb et Sn mais qui, en principe, ne sont pas enrichis. Les échantillons composant ce groupe sont notamment des amphibolites, argilite carbonatée, granite, quartzite ferrugineux, schiste et séricite-schiste. Les teneurs en cuivre, cobalt, niobium, tantale, plomb, étain et tungstène sont plus liées à l'axe 2 qui, probablement correspond au comportement géochimique de ces éléments et explique 13,7% de cette répartition. En somme, les deux axes expliquent 73,6% de l'inertie totale ou de la présence de métaux analysés dans les différents échantillons ; le reste de l'inertie (26,4%) concerne les autres facteurs tels le contexte structural, origine et concentration des éléments dans les solutions minéralisantes, facteurs physico-chimiques du milieu et profondeur de dépôt.

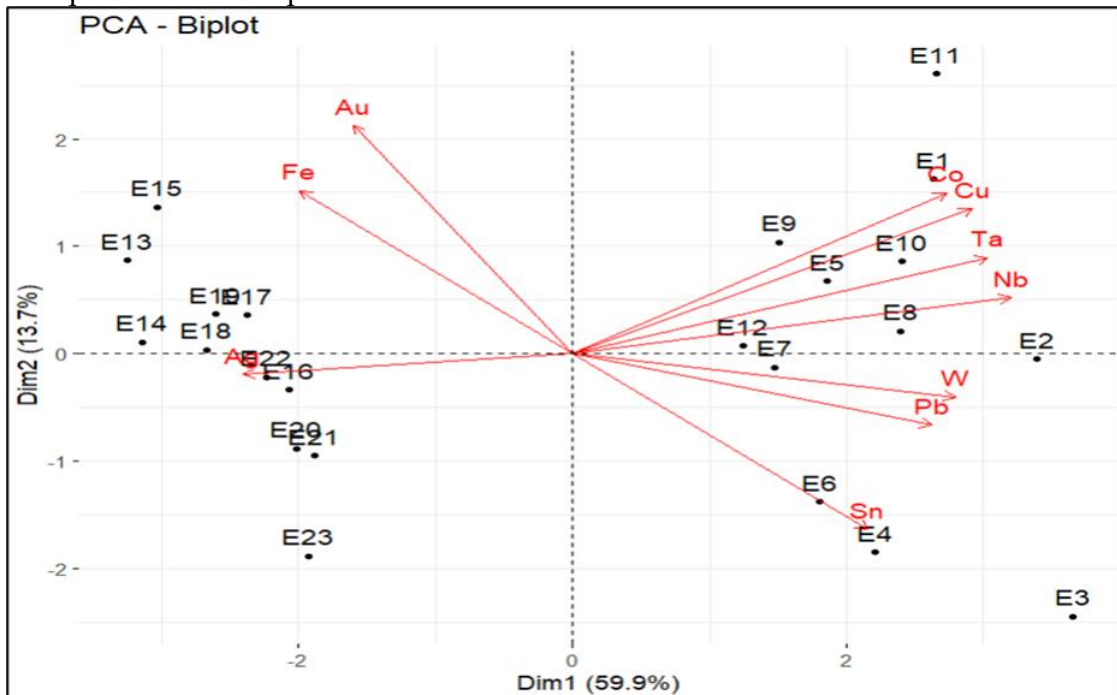
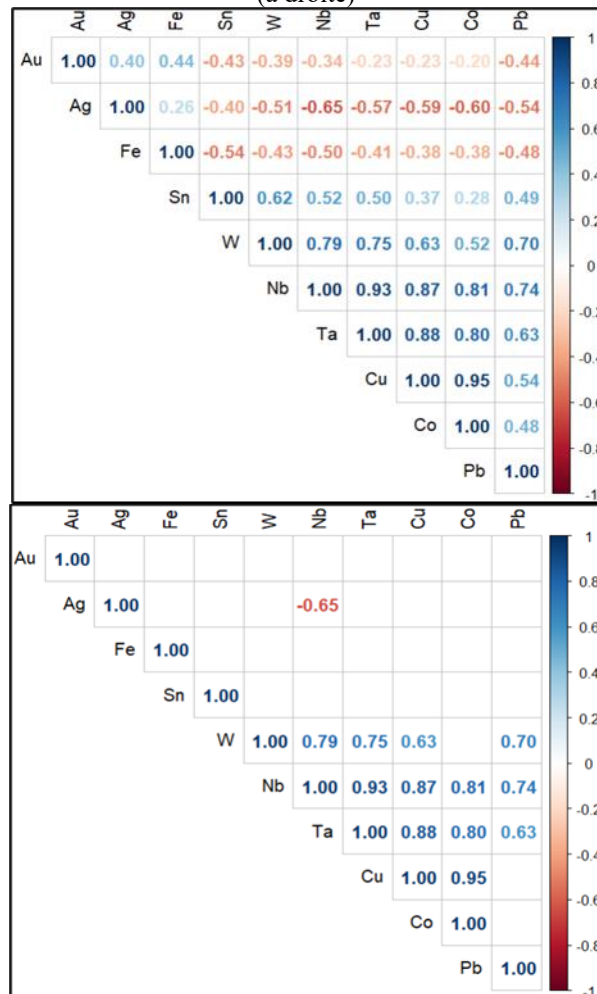


Figure 3: Biplot de l'analyse en composantes principales

### III.1.4. Corrélations inter-éléments

Pour mieux appréhender le degré de dépendance entre les éléments, calculons les coefficients de corrélations inter-éléments et testons leurs significativités en faisant les tests de régression linéaire. Le tableau 4 ci-dessous donne sous forme de matrice les valeurs de coefficients de corrélations ( $r$ ) calculés entre les dix éléments pris deux à deux.

**Tableau 4 :** Matrice de corrélations inter-éléments (à gauche) et corrélations significatives (à droite)



Cette matrice de corrélation indique qu'il existe treize corrélations significatives entre les éléments analysés, dont une négative (Ag – Nb) et douze positives (W – Nb ; W – Ta ; W – Cu ; W – Pb ; Nb – Ta ; Nb – Cu ; Nb – Co ; Nb – Pb ; Ta – Cu ; Ta – Co ; Ta – Pb et Cu – Co). La corrélation négative entre l'argent et le niobium indique une relation partielle entre ces deux éléments sans contrôle géologique strict commun. Leur association

pourrait être liée à une influence partagée de certains processus mais avec des comportements géochimiques différents, le niobium étant lithophile et l'argent chalcophile. Par contre, les corrélations positives entre W – Nb ; W – Ta ; W – Cu ; W – Pb ; Nb – Ta ; Nb – Cu ; Nb – Co ; Nb – Pb ; Ta – Cu ; Ta – Co ; Ta – Pb et Cu – Co s'expliquent par le mécanisme d'une source magmatique (cas de W, Nb, Ta, Cu, Pb et Co) ; les éléments tels que Nb, Ta et W sont des éléments magmatophiles qui se concentrent ensemble dans le magma résiduel lors de la fusion partielle de la croûte ou du manteau. Donc, chaque fois que le magma se différencie, la concentration de tous ces éléments augmente. Un autre mécanisme expliquant la positivité entre ces corrélations est le contrôle par les fluides hydrothermaux. C'est le cas typique à Zani-Koddo où le transport des métaux se fait via des fluides hydrothermaux. Ce transport est simultané et il y a précipitations co-génétiques. Ces corrélations positives indiquent que ces éléments ont été mobilisés par les mêmes événements tectono-hydrothermaux et qu'ils partagent probablement les mêmes pièges structuraux (fractures et zones de cisaillement) bien qu'ils appartiennent à des groupes différents à l'instar de W, Nb et Ta (lithophiles), Cu et Pb (chalcophiles) et Co (Sidérophile).

### III.1.5. Diagramme de corrélation Au/Fe

La droite de corrélation entre l'or et le fer montre une relation positive et traduit une association faible entre les deux éléments (Figure 4). Cela témoigne qu'à Zani-Koddo, le fer contenu principalement dans les itabirites peut jouer un rôle d'encaissant ou d'indicateur secondaire de la minéralisation aurifère. La dispersion importante des points montre une forte hétérogénéité du gisement, caractéristique fréquente des gisements aurifères hydrothermaux de la région de Kilo-Moto.

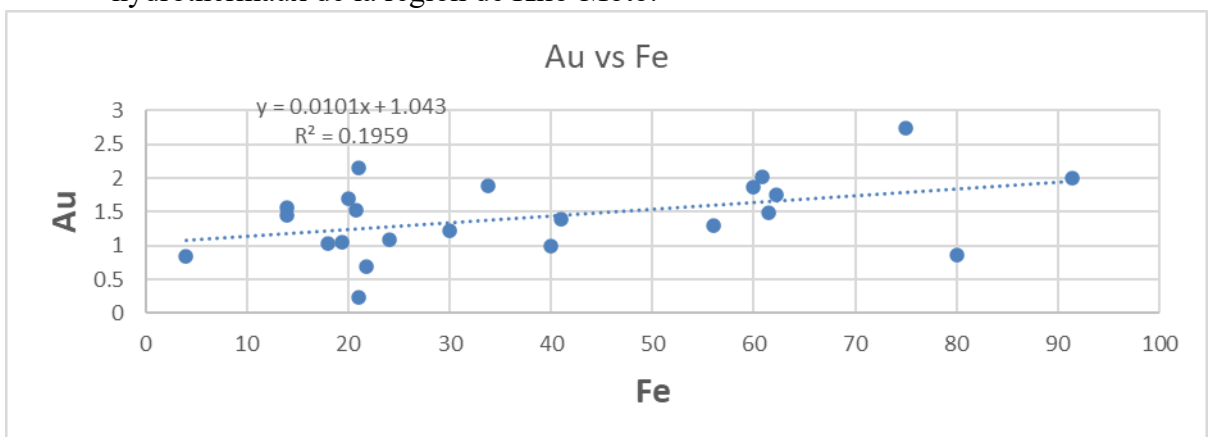
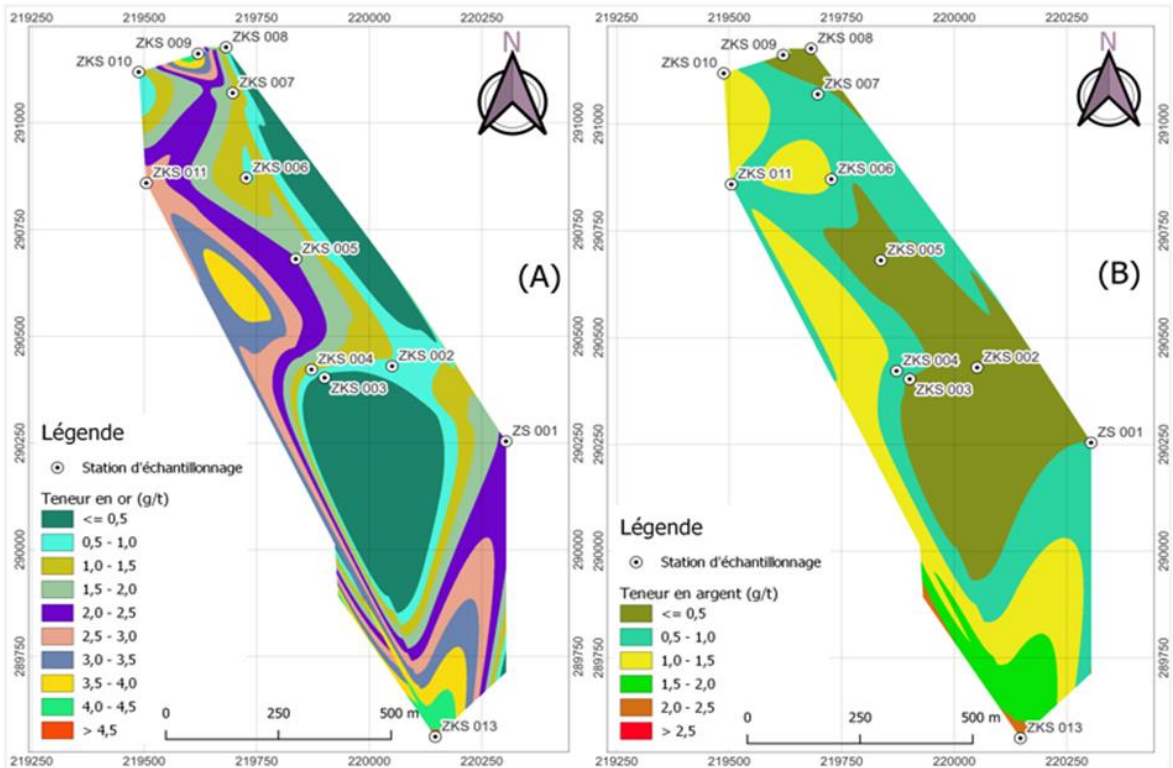


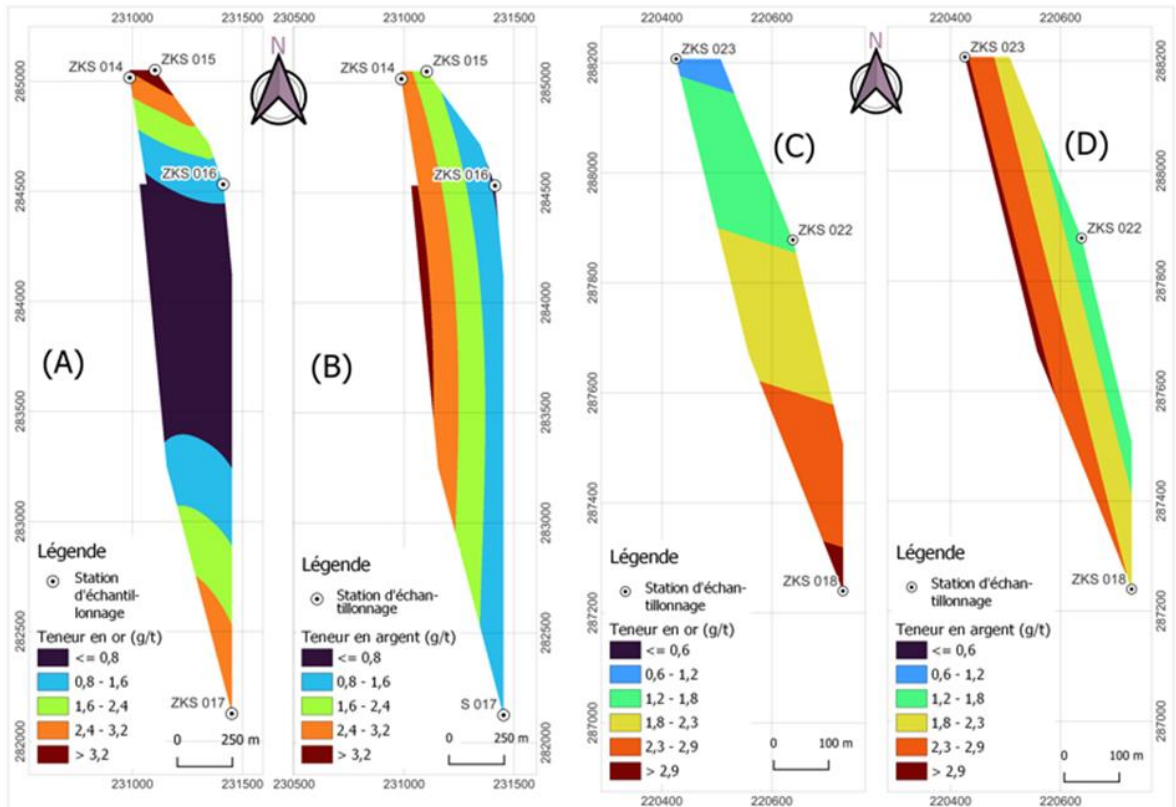
Figure 4 : Droite de corrélation Au-Fe

### III.1.6. Distribution spatiale des teneurs en or et en argent

L'analyse spatiale effectuée par krigeage sur les teneurs en or (figure 5A) et en argent (figure 5B) révèle une distribution similaire de ces deux éléments dans la partie nord du gisement minier de Zani-Koddo. Dans la partie sud par contre, l'or montre une distribution latitudinale (figure 6A et 6C) alors que l'argent présente une distribution longitudinale (figure 6B et 6D).



**Figures 5 :** Distributions spatiales des teneurs en or (A) et en argent (B) au nord de Zani-Koddo



**Figures 6 :** Distributions spatiales des teneurs en or et en argent au sud de Zani-Koddo

L'analyse de ces cartes de krigeage pour le gisement de Zani-Koddo révèle une structure géologique typique des minéralisations hydrothermales logées dans des formations ferrifères rubanées. La carte 5 qui concerne le nord du gisement de Zani-Koddo montre une continuité préférentielle orientée NW-SE. Cette direction correspond au contrôle structural majeur du gisement (cisaillement). Le gisement ne se propage pas de manière circulaire mais sous forme de lentilles allongées. Le passage de zones rouges (fortes concentrations) en zones bleues (faibles concentrations) signifie qu'il y a des zones de failles drainantes. La présence de teneurs isolées fait penser aux répétitions tectoniques des BIF. La carte 6 quant à elle, qui aborde la partie sud du gisement de Zani-Koddo indique que la minéralisation aurifère est fortement anisotrope, étirée selon l'axe principal NW-SE comme au nord du même gisement. Nous observons de fortes teneurs au centre de la carte, bien structurée ; cela montre que l'or est contrôlé par une structure géologique linéaire (soit le cisaillement, soit l'unité de BIF redressée).

## Discussion

Les résultats lithogéochimiques de nos vingt-trois échantillons prélevés à Zani-Koddo montrent que les gisements primaires d'or exploités contiennent outre l'or, l'argent également bien que ce dernier ne fait pas l'objet d'une quelconque exploitation à ce jour. L'analyse des teneurs normalisées met en évidence une anomalie positive marquée en or (Au) et en argent (Ag) alors que la plupart d'autres éléments montrent un appauvrissement relatif. Cette réalité corrobore avec les caractéristiques des gisements aurifères encaissés dans les formations ferrifères rubanées de Zani-Koddo où la minéralisation est dominée par des systèmes hydrothermaux aurifères à faible contenu en métaux de base (Lavreau, 1982). Des études antérieures sur la région de Kilo-Moto (Antoine, 1933 ; Legraye, 1940, Moureau, 1939, Lavreau, 1982) ont montré que les gisements de Moto sont caractérisés par :

- Un enrichissement en or et plus ou moins en argent ;
- Une faible proportion en éléments lithophiles incompatibles ; et
- Une dispersion limitée des éléments de type de Cu-Pb-Zn.

En analysant ces données chimiques, nous disons que la minéralisation de Zani-Koddo appartient au modèle orogénique aurifère plutôt qu'à un système polymétallique ou porphyrique. La très forte corrélation observée entre Cu et Co fait penser à une source hydrothermale commune probablement liée à des sulfures disséminés. Ce type d'association a été déjà décrit dans les gisements aurifères de la ceinture archéenne du Craton du Congo, où les fluides aurifères tardifs remobilisent localement des métaux de base (Lavreau, 1982). Il se constate également une forte corrélation entre Nb et Ta et leur association avec le tungstène (W) indiquant un contrôle lithologique lié à la présence des roches magmatiques évoluées ou des filons de pegmatites dans l'encaissant. Duhaux (1950) et Cahen (1954) travaillant sur le district minier de Kilo-Moto ont également rapporté que le niobium (Nb) et le tantale (Ta) sont hérités des granitoïdes archéens et ne participent pas directement à la minéralisation aurifère. Nous pouvons donc dire qu'à partir de nos résultats, une double signature géochimique se dégage : celle aurifère hydrothermale et la seconde lithophile héritée du socle granitique. La présence simultanée d'anomalies en or (Au) et en argent (Ag) montre un système hydrothermal à température intermédiaire. Dans les gisements orogéniques de l'Est de la République Démocratique du Congo (Routhier, 1980), l'argent est généralement présent sous forme soit d'électrum, soit inclus dans la galène et la tétraédrite. Des études menées sur les gisements de Durba toujours en district minier de Moto par Kibali Gold Mining publié par Randgold Ressources Limited (2016) montrent que le rapport Au/Ag varie fortement selon :

1. La température du fluide ;
2. La profondeur de mise en place ; et
3. La chimie des fluides (S, As, Sb).

Partant de nos résultats, nous pensons que la minéralisation de Zani-Koddo pourrait s'être formée dans un système hydrothermal relativement profond, compatible avec un contexte orogénique mésothermal.

Le diagramme de corrélation entre l'or et le fer montre une faible association entre ces deux éléments. Dans le contexte géologique de Zani-Koddo (Bloy, 2012), cela indique que :

1. Le fer n'est pas le principal contrôle de la minéralisation aurifère ;
2. L'or est probablement lié à plusieurs facteurs structuraux et lithologiques (fractures, cisaillements, altérations hydrothermales) plutôt qu'à la seule présence des formations ferrifères ;
3. Certaines zones riches en fer ne sont pas forcément enrichies en or.

Les cartes de distribution spatiale montrent une variabilité importante des teneurs en or et des éléments associés au nord de Zani-Koddo ; les fortes anomalies observées dans certaines zones traduisent l'existence de couloirs préférentiels de circulation des fluides minéralisateurs, probablement contrôlés par des fractures tectoniques orientées préférentiellement NW-SE. Cette disposition concorde avec les caractéristiques structurales reconnues dans le district aurifère de Kilo-Moto, où la minéralisation aurifère est fortement contrôlée par des structures régionales (Bird, 2016 ; Allibone et al., 2020). Ces cartes indiquent également que les zones enrichies en or coïncident partiellement avec des horizons ferrifères et des formations de type BIF (Banded Iron Formation). Cette association traduit que les lithologies riches en fer ont joué un rôle favorable dans la précipitation de l'or par interaction avec les fluides hydrothermaux. Ce phénomène est fréquemment décrit dans les gisements du Moto Greenstone Belt et particulièrement dans le gisement de Zani-Koddo (Bloy, 2012).

Par ailleurs, la distribution irrégulière des anomalies géochimiques traduit une minéralisation hétérogène, caractéristique des gisements aurifères orogéniques. Les enrichissements localisés observés sur les cartes pourraient correspondre à des zones de pièges structuraux où les fluides minéralisateurs ont circulé et déposé l'or sous l'effet des variations physico-chimiques du milieu (Montgomery, 2012). Cette réalité géologique confirme le caractère « structurally controlled » de la minéralisation de Zani-Koddo décrit dans plusieurs travaux antérieurs (Woodtli, 1954, Legraye, 1940, Antoine, 1933, Lavreau, 1982).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) distingue deux groupes d'échantillons :

1. Le premier groupe constitué de Au-Ag-Fe correspond aux échantillons prélevés dans les BIF ou les zones silicifiées où la

minéralisation aurifère est structurale et contrôlée par des zones de cisaillement. Cette association Au-Fe est typique des gisements décrits par Graves et *al.* (1996) dans les ceintures de roches vertes archéennes ;

2. Le second groupe constitué de Cu-Co-Nb-Ta-W-Pb-Sn reflète un environnement lithologique distinct notamment : zones des intrusions granitiques ou zones métasomatisées.

Cette séparation en deux groupes confirme que la minéralisation aurifère à Zani-Koddo n'est pas directement associée aux éléments lithophiles mais qu'elle est structurée par des circulations fluides indépendantes de la différenciation magmatique. C'est ainsi que le granite présent dans la zone jouerait plutôt un rôle indirect (remobilisateur) dans la mise en place des gisements aurifères. Les travaux réalisés dans la province minière de Kilo-Moto par Lavreau (1982), Legraye (1940), Woodtli (1957) et Antoine (1933) ont proposé trois modèles principaux de minéralisation aurifère :

1. Modèle BIF-hosted orogénique ;
2. Modèle filonien quartz-carbonate ;
3. Modèle hydrothermal tardif lié aux intrusions granitiques.

Observant et analysant nos résultats de Zani-Koddo, ils soutiennent le premier modèle présenté ci-haut (BIF-hosted orogénique) pour trois raisons :

1. L'or est associé au fer (BIF) ;
2. Les éléments incompatibles ne sont pas corrélés avec l'or ;
3. La minéralisation est fortement associée à la structurale.

Les Banded Iron Formation (BIF) jouent un rôle prépondérant dans la mise en place de la minéralisation aurifère à Zani-Koddo. Ce rôle (Groves et al., 1998) est double notamment :

1. Les BIF étant rigides par rapport aux roches de ceinture verte comme le schiste vert, sous la contrainte tectonique, ils se fracturent (comportement cassant) alors que ces schistes se déforment (comportement ductile) ; il s'agit du rôle mécanique des BIF ;
2. Les fluides minéralisateurs circulant dans les fractures (zone de cisaillement, fractures de tension) réagissent avec le fer de BIF et provoquent la précipitation de l'or, c'est la sulfuration ; il s'agit du rôle chimique des BIF.

La signature géochimique indique un système hydrothermal orogénique avec une double signature (hydrothermale et lithologique).

## Conclusion

Cette étude sur la signature géochimique des formations ferrifères rubanées (BIF) de Zani-Koddo a permis de mettre en évidence leur importance dans le contrôle de la minéralisation aurifère du secteur étudié.

Les résultats géochimiques montrent une association partielle entre l'or et le fer traduisant l'influence des horizons ferrifères dans les processus de circulation et de piégeage des fluides hydrothermaux minéralisateurs. Les distributions spatiales des teneurs révèlent une minéralisation hétérogène et sous contrôle structural (structurally controlled), liée principalement aux zones de fractures, de cisaillement et aux contacts lithologiques favorables. Bien que la corrélation entre l'or et le fer demeure faible, les BIF apparaissent comme des encaissants privilégiés ayant favorisé la précipitation de l'or dans certaines zones enrichies. Ainsi, les BIF de Zani-Koddo constituent des marqueurs géologiques importants pour la compréhension de la métallogénie aurifère locale et représentent des cibles favorables pour les futurs travaux d'exploration minière dans le district aurifère de Kilo-Moto. Le gisement de Zani-Koddo présente donc une signature géochimique typique des gisements aurifères encaissés dans les BIF. Les formations ferrifères rubanées jouent un rôle mécanique et chimique dans la concentration de l'or, indiquant un modèle de type « BIF-hosted orogenic gold deposit ».

### **Recommandations**

Au regard des résultats obtenus et partant de l'absence d'analyses isotopiques, minéralogiques détaillées et de données géophysiques approfondies qui limitent la compréhension complète des processus de mise en place de la minéralisation aurifère dans les formations ferrifères rubanées, il est recommandé d'approfondir les travaux de recherche dans le secteur de Zani-Koddo dans ces domaines cités ci-haut pour mieux comprendre les mécanismes de concentration de l'or dans les formations ferrifères rubanées. Il est aussi important d'accorder une attention particulière aux zones de cisaillements et aux contacts lithologiques favorables, qui constituent des cibles prioritaires pour les futurs travaux d'exploration aurifère.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

### **References:**

1. Allibone, A., Bird, P., Fanning, M., Holliday, J., Jongens, R., Komarnisky, N., Kwibisa, J., MacKenzie, D., Mwandale, E., Quick, S., Turnbull, R. & Vargas, C., (2020), Orogenic gold deposits of the

- kibali District, Neoproterozoic Moto Belt, Northeastern Democratic Republic of Congo, Special Publication 23, pp. 185-201;
2. Antoine, R., (1933), *La mise en valeur des champs aurifères de Kilo-Moto*, lib. Falk, Bruxelles, pp 75-80;
  3. Bird, P.J., (2016), *Evolution of the Kibali Granite-Greenstone Belt, North East Democratic Republic of the Congo, and controls on Gold Mineralisation at the Kibali Gold Deposit*, Thèse de doctorat (PhD), Kingston University, Royaume-Uni, pp 92-130;
  4. Bloy, R.E., (2012), *The Zani-Kodo Project: Geology and Ressources Report*, Bloy Resource Evaluation, Rapport technique, inédit;
  5. Cahen, L., (1954), *Géologie du Congo-Belge*, Liège, H. Vaillant-Carmanne, 577p.;
  6. Duhoux, P., (1950), *Pétrogénèse et Métallogénèse du domaine minier de Kilo-Moto*, A.S.G.B., 73, M 171-244 ;
  7. Foucault, A., Raoult, J-F, Cecca, F. & Platevoet, B., (2014), *Dictionnaire de Géologie*, 8<sup>e</sup> édition, Paris, Dunod, pp 212-296 ;
  8. Goldfarb, R.J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D.I., Hart, C.J.R. & Gosselin, P., (2005), *Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes*, Society of Economic Geologists, pp 407-450;
  9. Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. & Robert, F., (1998), *Orogenic gold deposits : A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types*, Ore Geology Reviews, vol. 13, pp 7-27;
  10. Govett, G.J.S., (1983), *Rock Geochemistry in Mineral Exploration*, Handbook of Exploration Geochemistry, vol.3;
  11. Govindaraju, K., (1994), *Compilation of working values and sample description for 383 Geostandards*, The Journal of Geostandards and Geoanalysis, 18, 1-158. CNRS;
  12. Hageman, S.G., & Cassidy, K.F., (2000), *Archean Orogenic Lode Gold Deposits*, Society of Economic Geologists, pp 9-68;
  13. Lavreau, J., (1982), *Etude géologique du Haut-Zaïre : genèse et évolution d'un segment lithosphérique archéen*, Musée royal de l'Afrique Centrale, Série in-8°, pp 12-87 ;
  14. Lavreau, J., (1984), *Carte géologique du Haut-Zaïre et du Nord-Kivu*, Service géologique du Zaïre, 1 carte en 3 feuilles ;
  15. Legraye, M., (1940), *Grands traits de la géologie et de la minéralisation aurifère des régions de Kilo et de Moto (Congo Belge)*, Institut royal colonial belge, pp 11-92 ;

16. Lepersonne, J., (1957), *Observations géologiques dans le nord-est du Congo belge et grands traits de la géologie de l'Afrique centrale*, Musée royal de l'Afrique Centrale, pp 88-144 ;
17. Montgomery, C.W., (2012), *Environmental Geology*, 10<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Higher Education;
18. Moureau, A., (1939), *Sur l'origine des venues aurifères de la division ouest des Mines De Kilo*. Id., 62, B 396-421 ;
19. Potts, P.J., (1987), *A Handbook of silicate rock analysis*, Glasgow and New York : Blackie & Son Ltd., 622p.;
20. Randgold Ressources Limited, (2016), *Annual Report and Operational Review*, Kibali Gold Mine Joint Venture, Democratic Republic of Congo, pp. 1-236p. ;
21. Rollinson, H.R., (1993), *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation*. Longman Scientific & Technical, 352p. ;
22. Routhier, P., (1980), *Les gisements métallifères des formations cristallines*. Paris: Masson;
23. Taiyun, W., & Viliam, S., (2024). *R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.94)*. Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>;
24. William, R., (2026), *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. Northwestern University, Evanston, Illinois. R package version 2.6.1. Available from <https://CRAN.R-project.org/package=psych>;
25. Woodtli, R., (1954), *Contribution à l'étude géologique et pétrographique de la région orientale des mines de Kilo (Congo belge)*, Université de Louvain, pp 56-107 ;
26. Woodtli, R., (1957), *La structure de Kilo : contribution à l'étude des fossés africains*, Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, pp 67-92.

## Appendix

**Tableau 2:** Teneurs normalisées des éléments en traces analysés

Ech	g/t									
	Au	Ag	Fe	Sn	W	Nb	Ta	Cu	Co	Pb
E1	41	5	1.4	5	1.33	0.95	0.8	1.04	1.09	0.19
E2	18	0.9	1.04	7.5	1.27	1.55	1	0.69	0.74	0.44
E3	4	5	0.84	9.5	3.33	1.1	0.65	0.36	0.39	1.25
E4	21.8	8	0.7	10.5	1.33	0.95	0.5	0.4	0.48	0.69
E5	40	0.7	1	2.5	0.8	1.2	0.49	0.45	0.91	0.63
E6	19.4	10	1.06	6	0.67	0.9	0.65	0.27	0.39	1.56
E7	30	6	1.22	6	0.53	0.85	0.31	0.6	0.78	0.69
E8	14	0.4	1.46	1.25	1.33	1	0.43	0.64	0.80	1.44
E9	80	1.5	0.86	2	1.27	1.05	0.65	0.45	0.52	0.81
E10	20	12	1.7	0.9	2	1.6	0.8	0.67	0.65	0.88
E11	56	10	1.3	1	1.13	1.25	1	1	1.17	0.56
E12	24	9.8	1.1	2.5	0.59	0.85	0.44	0.64	0.65	0.75
E13	91.4	20.7	2	0.82	0.05	0.00	0.01	0.00	0.03	0.06
E14	60.8	29.4	2.03	1.57	0.23	0.00	0.03	0.00	0.08	0.01
E15	75	19.4	2.75	0.9	0.07	0.00	0.25	0.00	0.17	0.01
E16	21	6.7	2.15	1.19	0.02	0.01	0.02	0.01	0.22	0.01
E17	60	10.4	1.87	1.19	0.01	0.01	0.01	0.01	0.24	0.00
E18	61.4	23	1.49	1.02	0.03	0.01	0.03	0.00	0.22	0.01
E19	62.2	20.1	1.76	1.07	0.02	0.01	0.04	0.00	0.30	0.00
E20	20.8	10.1	1.53	0.96	0.03	0.01	0.05	0.00	0.11	0.00
E21	14	7.5	1.56	0.64	0.03	0.00	0.02	0.00	0.14	0.05
E22	33.8	13.5	1.89	0.9	0.03	0.00	0.01	0.00	0.26	0.08
E23	21	30	0.23	1.44	0.03	0.02	0.04	0.00	0.21	0.07

**Tableau 3:** Clarkes des éléments chimiques analysés (Source : Foucault et al., 2014)

Eléments	Au	Ag	Fe	Sn	W	Nb	Ta	Cu	Co	Pb
Teneurs	0.05	0.1	50000	2	1.5	20	2	55	23	16