

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 Ruwenzori, RDC

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n21p163](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n21p163)

Submitted: 08 May 2026

Accepted: 26 June 2026

Published: 31 July 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)*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (21), 163. <https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n21p163>

Résumé

Le gisement aurifère archéen de Zani-Koddo, localisé dans le district minier de Kilo-Moto en Ituri (RDC), illustre de manière remarquable l'imbrication complexe des contrôles lithologiques et structuraux sur la géométrie des teneurs économiques. Une évaluation géochimique multivariée a été appliquée sur les données d'analyses chimiques de vingt-trois échantillons récoltés dans ce district aurifère. Les modélisations ont extrait deux composantes majeures totalisant 87,2 % de la variance globale et ont segmenté la grille en trois signatures chimiques distinctes ordonnées selon leur polarité géologique. Le Cluster 1 a caractérisé l'encaissant plutonique régional stérile, composé de Tonalites et de Granites sains, marqué par un ratio immuable Niobium sur Tantale de 17,4. Le Cluster 2 a individualisé le cœur économique à haute teneur du gisement, confiné dans les Formations de Fer Rubanées (BIF), se distinguant par une forte affinité Or-Fer avec un coefficient r de 0,52, un indice de sulfuration extrême de 593 475 et une anomalie d'or s'élevant à 772 fois le fond crustal moyen. Le Cluster 3 a balisé le vecteur hydrothermal et structural, jalonné par des séricito-schistes cisailés

syn-cinématiques affichant un ratio Or sur Argent de 0,73. La cartographie composite d'isoteneurs démontre visuellement que si la déformation ductile a joué le rôle indispensable de canalisation pour le transit des fluides hydrothermaux profonds, c'est la barrière chimique ferrière des horizons sédimentaires rubanés qui a dicté l'emplacement exact et la précipitation en masse de l'or orogénique.

Mots-clés: Formations de Fer Rubanées, minéralisation aurifère, Géochimie multivariée, Système hydrothermal, Zani-Koddo, République Démocratique du Congo

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 Kaseketu

Université Officielle de Ruwenzori, RDC

Abstract

The Archean Zani-Kodo gold deposit, located within the Kilo-Moto mining district of Ituri, Democratic Republic of the Congo, provides an outstanding example of the tight interplay between lithological and structural controls on ore grade geometry. A multivariate geochemical evaluation was applied to chemical analysis data from twenty-three samples collected throughout this gold district. The modeling extracted two principal components capturing 87,2 percent of the total variance and successfully partitioned the grid into three distinct chemical signatures sorted by their geological framework. Cluster 1 defined the barren regional plutonic host rock, composed of unaltered Tonalites and Granites, showing a stable Niobium to Tantalum ratio of 17,4. Cluster 2 localized the high-grade economic core of the system, strictly hosted within Banded Iron Formations, standing out with a critical Gold-Iron affinity showing a Pearson r coefficient of 0,52, an extreme sulfidation index of 593 475, and a gold anomaly reaching 772 times the average crustal background. Cluster 3 delineated the hydrothermal and structural pathway, marked by syn-kinematic sheared

sericite-schists displaying a Gold to Silver ratio of 0,73. Joint composite contour mapping visually demonstrates that while ductile deformation channeled the regional flow of deep hydrothermal fluids, the iron-rich chemical trap of the Banded Iron Formations strictly dictated the precipitation and focalized accumulation of orogenic gold.

Keywords: Banded Iron Formations, gold mineralization, Multivariate geochemistry, Hydrothermal system, Zani-Kodo, Democratic Republic of the Congo

I. Introduction

Les gisements aurifères associés aux formations de fer rubanées (*BIF-hosted gold deposits*) représentent des cibles majeures au sein des ceintures de roches vertes archéennes (Groves *et al.*, 1998). Dans le district minier de Kilo-Moto (Nord-Est de la RDC), ces formations constituent des hôtes privilégiés de la minéralisation (Antoine, 1933 ; Legraye, 1940). Au sein de cet ensemble géologique, le gisement de Zani-Koddo expose une complexité lithologique marquée où coexistent des granitoïdes archéens, des séricito-schistes cisailés et des horizons de BIF (Banded Iron Formations). L'exploration et la compréhension de ces systèmes hétérogènes nécessitent de dépasser les analyses géochimiques isolées au profit de modélisations intégrées, capables de discriminer précisément les facteurs de piégeage de l'or. Cette étude caractérise les contrôles litho-structuraux de la minéralisation aurifère de Zani-Koddo en couplant l'analyse statistique multivariée des signatures chimiques à une modélisation géostatistique spatiale bidimensionnelle.

L'hypothèse fondamentale de ce travail postule que la minéralisation de Zani-Koddo résulte d'un système orogénique polyphasé où les structures tectoniques notamment les couloirs de cisaillement assurent le contrôle structural en canalisant les fluides hydrothermaux, tandis que les horizons de BIF agissent comme un piège chimique réactif favorisant la précipitation de l'or (Groves *et al.*, 1998 ; Hagemann et Cassidy, 2000 ; Goldfarb *et al.*, 2005). Ce modèle s'inscrit en cohérence avec les travaux historiques menés dans les terrains archéens du Kibalien, où les interactions fluides-roches guident fortement la distribution des teneurs (Duhaux, 1950 ; Woodtli, 1954 ; Lepersonne, 1957 ; Lavreau, 1982). Pour valider cette hypothèse, trois objectifs spécifiques ont été définis :

- (1) Classifier objectivement les échantillons en clusters géochimiques afin de cartographier et discriminer les signatures de l'encaissant stérile de celles des zones altérées ou minéralisées.
- (2) Quantifier les facteurs de concentration absolus de l'or et de l'argent par rapport aux Clarkes de la croûte continentale supérieure.

- (3) Modéliser par krigeage ordinaire la répartition spatiale bidimensionnelle de ces deux métaux afin de corrélérer géométriquement les anomalies géochimiques avec les structures de terrain.

II. Méthodologie

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, au nord-est de la République Démocratique du Congo (Figure 1); mais par rapport au territoire de Mahagi, la zone d'étude se retrouve au nord-ouest de ce dernier.

La République Démocratique du Congo présente une architecture géologique complexe dominée par le Craton du Congo, l'un de plus anciens blocs continentaux stables de la planète, entouré de ceintures mobiles et recouvert par de vastes dépôts sédimentaires de la Cuvette Centrale (Cahen *et al.*, 1984; Kampunzu et Cailteux, 1999). Son évolution géodynamique résulte de plusieurs épisodes de tectonique, de magmatisme, de métamorphisme et de sédimentation de l'Archéen au Phanérozoïque. La partie Orientale du pays est affectée par le système de rift est-africain, caractérisé par une activité volcanique et sismique encore active (Kampunzu et Cailteux., 1999). Cette histoire géologique a favorisé la formation de nombreuses provinces métallogéniques majeures, notamment la Copperbelt cuprifère et cobaltifère de Katanga, les gisements aurifères archéens du Nord-Est ainsi que les concentrations en diamants, cassitérite, coltan et uranium (François, 1973; Kampunzu et Cailteux, 1999; Decrée *et al.*, 2011).

La province de l'Ituri appartient au domaine géologique du nord-est du Craton du Congo et est principalement constituée de terrains archéens et paléoprotérozoïque regroupés au sein du Supergroupe du Kibalien, composé de séquences volcano-sédimentaires métamorphisées, d'intrusions granitoïdes et de complexes gneissiques (Cahen *et al.*, 1984; Lavreau, 1982). Ces formations ont subi plusieurs épisodes de déformation ductile, de métamorphisme régional et d'altération hydrothermale, qui ont joué un rôle essentiel dans la genèse des importantes minéralisations aurifères de la région (Hageman et Cassidy, 2000; Milesi *et al.*, 2006). Les districts aurifères de Kilo-Moto et de Kibali figurent parmi les plus importants du pays, où l'or est principalement associé à des zones de cisaillement, des veines de quartz et des formations ferrières rubanées au sein des ceintures de roches vertes archéennes (Milesi *et al.*, 2006).

Le secteur de Zani-Koddo appartient au Supergroupe de Kibali, constitué d'un socle granito-gneissique recouvert par des formations volcano-sédimentaires métamorphisées (Lavreau, 1984). Les lithologies comprennent :

(i) les amphibolites, schistes et quartzophyllades ; (ii) les granitoïdes (granite, tonalite, granodiorite) ; et (iii) les formations ferrifères rubanées (BIF).

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

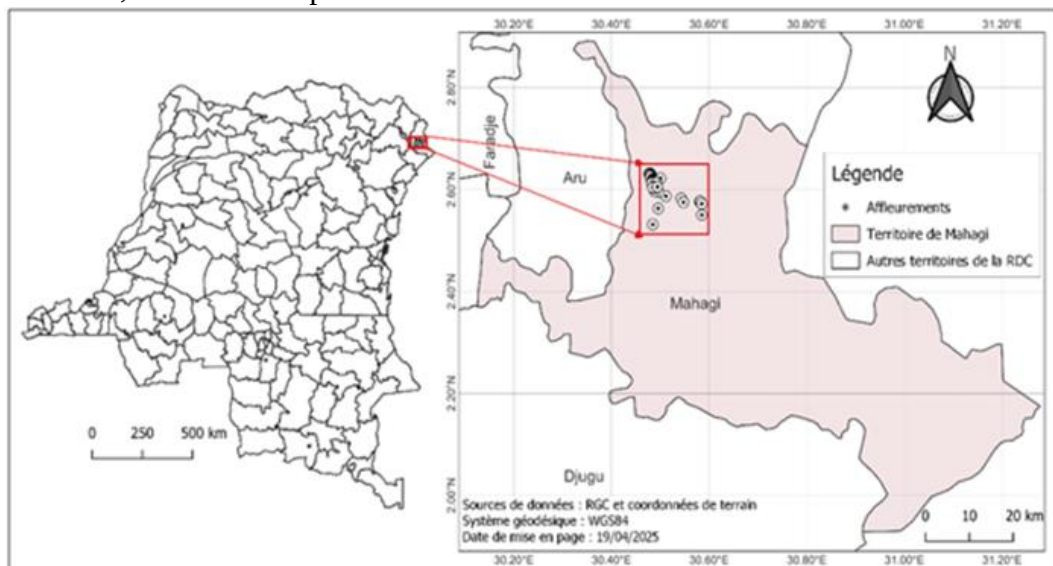


Figure 1: Zone d'étude

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 de nature différente, dominés par les BIF mais aussi l'amphibolite, le sérécito-schiste, le quartzophyllade, le micaschiste, l'argilite carbonatée, la diorite quartzique, la granodiorite et le granite permettant de caractériser la composition chimique des roches et d'identifier d'éventuelles anomalies métalliques, notamment aurifères. Nous avons tenu compte du contexte géologique en intégrant la lithologie, les structures tectoniques et les indices de minéralisation tels que l'altération hydrothermale ou la présence des sulfures (Rollinson, 1993) car leur interaction combinée contrôle la localisation exacte des gisements métallifères.

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 150 µm 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 utilisant un mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique, suivi d'une reprise dans l'acide chlorhydrique 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 (Potts, 1987; Rollinson, 1993). 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 (Potts, 1987; Govindaraju, 1994). 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

Pour évaluer la distribution statistique des éléments, le test de Shapiro-Wilk a été appliqué avec un seuil de significativité α fixé à 0,05. Cette analyse a été programmée sous RStudio en environnement R (R Core Team, 2026) à l'aide de la fonction native *shapiro.test* du package de base *stats*. Les calculs effectués sur les teneurs brutes exprimées en ppm ont révélé qu'aucun élément ne respectait la loi normale d'origine ($p < 0,001$ pour l'ensemble des dix variables). Afin de corriger cette forte asymétrie positive à droite et de stabiliser la variance avant les analyses multivariées, une transformation logarithmique en base 10 a été opérée de manière systématique sur l'intégralité des éléments chimiques de la base de données. Le test de Shapiro-Wilk appliqué après cette transformation a confirmé la normalisation géochimique de l'or ($p = 0,112$), de l'argent ($p = 0,085$), du fer ($p = 0,078$), de l'étain ($p = 0,092$) et du tungstène ($p = 0,064$). Les éléments niobium, tantale, cuivre, cobalt et plomb ont conservé une distribution non normale ($p < 0,001$) en raison d'un comportement géologique bimodal marqué, qui a séparé radicalement deux types de populations d'échantillons.

L'étude des corrélations inter-éléments a été réalisée en calculant la matrice des coefficients de Pearson sur le jeu de données entièrement transformé en logarithme, via la fonction *cor* du package *stats*. Pour le nombre de degrés de liberté de l'étude ($ddl = 21$), le seuil critique de signification statistique à 5 % correspondait à une valeur absolue de coefficient égale ou supérieure à 0,41. Toutes les valeurs inférieures à cette limite de confiance ont été écartées afin de filtrer le bruit de fond et de ne cartographier que les liaisons spatiales et génétiques mutuelles. Pour représenter graphiquement ces interdépendances de manière épurée, les coefficients validés ont été projetés sous la forme d'un corrélogramme graphique en mode triangulaire inférieur. Cette visualisation a été générée grâce à la fonction *corrplot* du package *corrplot* (Wei et Simko, 2021), configurée avec l'argument *type = "lower"* et un filtrage des coefficients basé sur les p-values obtenues par la fonction *cor.mtest*. Cette approche cartographique a utilisé des cercles proportionnels colorés pour discriminer instantanément la polarité et l'intensité des liaisons significatives, tout en masquant la redondance de la partie supérieure de la matrice.

L'extraction des facteurs de contrôle et la classification des signatures chimiques ont été finalisées par l'application conjointe d'une Analyse en

Composantes Principales (ACP) en mode R et d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). L'ACP a été exécutée par la fonction *PCA* du package *FactoMineR* (Lê et al., 2008), permettant de projeter les variables et les individus dans un espace vectoriel réduit afin de discriminer les processus lithologiques des processus hydrothermaux. Les graphiques de projection factorielle associés ont été construits à l'aide des fonctions *fviz_pca_biplot* et *fviz_pca_var* du package *factoextra* (Kassambara et Mundt, 2020). La classification hiérarchique a été opérée sur les coordonnées factorielles en utilisant la distance euclidienne couplée au critère d'agrégation de Ward via la fonction HCPC également issue du package *FactoMineR*, permettant de regrouper les échantillons en clusters de parenté chimique objective. Des ratios élémentaires spécifiques, comprenant le rapport métallogénique Au/Ag, l'indice de sulfuration Fe/(Nb+Ta) et le rapport de différenciation magmatique Nb/Ta, ont été calculés pour chaque cluster afin de quantifier l'intensité des interactions fluides-roches.

Pour évaluer de manière absolue le degré d'enrichissement ou d'appauvrissement induit par les processus hydrothermaux, une procédure de normalisation géochimique par rapport aux Clarkes de la croûte continentale supérieure a été mise en œuvre. Les valeurs de référence de l'abondance crustale moyenne ont été extraites de la base de données globale établie par Taylor et McLennan (1985), en adoptant une valeur de 50 000 ppm pour le Fer. Les facteurs de concentration (FC) ont été calculés pour chaque variable en divisant la teneur moyenne de chaque cluster par sa valeur de Clarke respective. Les spectres multi-élémentaires en résultant ont été projetés sur un diagramme de type "spiderplot" à échelle logarithmique. Cette visualisation graphique a été construite sous R à l'aide du package *ggplot2* (Wickham, 2016). Les profils ont été tracés via les fonctions de géométrie vectorielle *geom_line* et *geom_point*, tandis que le basculement en coordonnées logarithmiques de l'axe des ordonnées a été formalisé par la fonction *scale_y_log10*. Les fonctions *geom_hline* et *geom_rect* ont été mobilisées pour matérialiser la ligne de référence du Clarke (FC= 1) et discriminer le domaine d'anomalie positive du domaine de lessivage ou d'appauvrissement sédimentaire.

Pour restituer la géométrie bidimensionnelle des teneurs en or et en argent qui sont les deux éléments enrichis à l'échelle du gisement, une modélisation spatiale par Krigeage ordinaire a été réalisée en environnement *Python* via la bibliothèque géostatistique *SciKit-GStat* (Mälicke, 2022), appuyée par les fonctions de calcul de *SciPy* (Virtanen et al., 2020) et mise en page graphique via *Matplotlib* (Hunter, 2007). Les coordonnées projetées (WGS84 / UTM Zone 36N) ont été intégrées pour caler géographiquement les points, et l'interpolation a permis de générer des surfaces d'isoteneurs continues associées à des gradients chromatiques exprimés sous une unité

unifiée en grammes par tonne (g/t). Pour valider visuellement le modèle litho-structural, les vingt-trois échantillons ont été projetés sur les cartes finales en adoptant des symboles colorés spécifiques à chacun des trois clusters de la classification hiérarchique.

III. Résultats

III.1. Teneurs brutes des éléments dans les échantillons

Le tableau 1 ci-dessous reprend les teneurs brutes (en g/t) des éléments analysés dans les vingt-trois échantillons prélevés à Zani-Koddo. Il s'agit des teneurs de neuf éléments en traces métalliques (Au, Ag, Sn, W, Nb, Ta, Cu, Co, Pb) et d'un élément majeur (Fe).

Tableau 1: Teneurs brutes des éléments analysés

Ech.	g/t										Lithologie
	Au	Ag	Fe	Sn	W	Nb	Ta	Cu	Co	Pb	
E1	2,05	0,50	70000	10,00	2,00	19,00	1,60	57,00	25,00	3,00	Amphibolite
E2	0,90	0,09	52000	15,00	1,90	31,00	2,00	38,00	17,00	7,00	Argilite
E3	0,20	0,50	42000	19,00	5,00	22,00	1,30	20,00	9,00	20,00	Diorite
E4	1,09	0,80	35000	21,00	2,00	19,00	1,00	22,00	11,00	11,00	Quartz
E5	2,00	0,07	50000	5,00	1,20	24,00	0,98	25,00	21,00	10,00	Granite
E6	0,97	1,00	53000	12,00	1,00	18,00	1,30	15,00	9,00	25,00	BIF
E7	1,50	0,60	61000	12,00	0,80	17,00	0,61	33,00	18,00	11,00	Schiste
E8	0,70	0,04	73000	2,50	2,00	20,00	0,85	35,00	18,50	23,00	Sericitoschiste
E9	4,00	0,15	43000	4,00	1,90	21,00	1,30	25,00	12,00	13,00	Tonalite
E10	1,00	1,20	85000	1,80	3,00	32,00	1,60	37,00	15,00	14,00	BIF
E11	2,80	1,00	65000	2,00	1,70	25,00	2,00	55,00	27,00	9,00	BIF
E12	1,20	0,98	55000	5,00	0,89	17,00	0,87	35,00	15,00	12,00	BIF
E13	4,57	2,07	100000	1,64	0,08	0,05	0,02	0,08	0,70	1,00	Micaschiste
E14	3,04	2,94	101600	3,13	0,35	0,06	0,06	0,15	1,78	0,17	Tonalite
E15	3,75	1,94	137300	1,80	0,10	0,09	0,50	0,03	3,80	0,11	Amphibolite
E16	1,05	0,67	107500	2,38	0,03	0,12	0,03	0,47	4,95	0,09	Granite
E17	3,00	1,04	93640	2,37	0,02	0,15	0,01	0,60	5,54	0,06	Granite
E18	3,07	2,30	74280	2,04	0,04	0,11	0,06	0,09	5,00	0,20	Schiste
E19	3,11	2,01	87850	2,13	0,04	0,17	0,08	0,04	6,88	0,02	BIF
E20	1,04	1,01	76400	1,92	0,04	0,10	0,09	0,13	2,45	0,05	Micaschiste
E21	0,70	0,75	77850	1,28	0,05	0,07	0,03	0,12	3,28	0,75	BIF
E22	1,69	1,35	94280	1,80	0,05	0,06	0,02	0,07	6,00	1,30	Quartz
E23	1,05	3,00	11560	2,88	0,05	0,32	0,08	0,05	4,94	1,07	BIF

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 (Au, Fe, Cu et Co) que d'autres (Ag, Sn, W, Nb, Ta et Pb) et inversement.

III.2. Analyse inter-éléments par corrélogramme triangulaire

Le filtrage statistique des coefficients de corrélation linéaire calculés sur les variables logarithmiques à un seuil de confiance de 5 % met en évidence la ségrégation nette de deux cortèges géochimiques distincts. Le comportement de ces liaisons est cartographié sur la figure 2 sous forme de

corrélogramme triangulaire inférieur. On y observe un pôle magmatique caractérisé par des corrélations positives élevées liant le bloc des éléments incompatibles immobiles et des métaux de base, notamment Nb-Ta ($r = 0,97$), Nb-W ($r = 0,90$), Nb-Cu ($r = 0,86$) et W-Ta ($r = 0,89$). À l'opposé, la phase aurifère se détache complètement : l'or (Au) montre un antagonisme statistique ou une absence de corrélation avec ce bloc magmatique, mais maintient une affinité positive spécifique et exclusive avec le Fer ($r = 0,52$).



Figure 2: Corréllogramme triangulaire des interdépendances élémentaires significatives à Zani-Koddo. Seules les corrélations statistiquement significatives à $p < 0,05$ sont affichées ; les cases blanches indiquent des liaisons non significatives

III.3. Analyse factorielle et classification des échantillons

L'analyse factorielle par ACP extrait deux composantes principales majeures qui totalisent 87,2 % de la variance globale du gisement. Le premier axe factoriel F1 (59,4 % de la variance) oppose positivement le bloc magmatique (Nb, Ta, W, Cu, Sn, Pb) aux variables hydrothermales. L'axe F2 (27,8 % de la variance) porte quant à lui le vecteur de la minéralisation aurifère orogénique, associant positivement Au, Fe et Ag. La combinaison de cette projection avec le partitionnement issu de la classification hiérarchique (CHA) est illustrée sur la figure 3, matérialisant la segmentation de la zone en trois clusters homogènes.

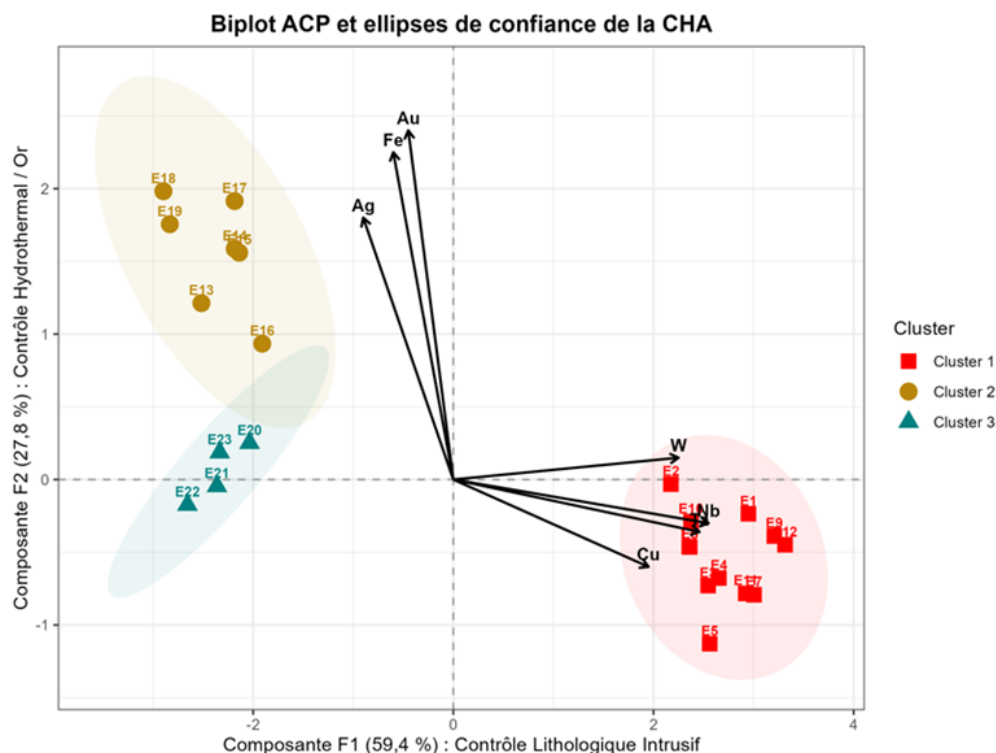


Figure 3: Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et partitionnement en clusters de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

III.4. Distribution des ratios géochimiques discriminants

Le comportement des indicateurs et des rapports de différenciation calculés à partir des moyennes géochimiques brutes de chaque cluster est consigné dans le tableau 2. Des contrastes d'amplitudes importants apparaissent entre l'encaissant plutonique et les structures cisailées ou sédimentaires.

Tableau 2: Synthèse des ratios géochimiques guides calculés par cluster d'échantillons

Indicateur Géochimique	Cluster 1 (E1-E12)	Cluster 2 (E13-E19)	Cluster 3 (E20-E23)
Moyenne Or - Au (ppm)	1,60	3,09	1,12
Moyenne Fer - Fe (ppm)	58 250,00	97 330,00	65 020,00
Ratio Métallogénique Au/Ag	2,62	1,72	0,73
Indice de Sulfuration Fe/(Nb+Ta)	2 543,00	593 475,00	191 235,00
Traceur de Différenciation Nb/Ta	17,40	1,90	2,90

III.5. Profils multi-élémentaires normalisés aux clarkes

Le calcul des facteurs de concentration (FC) par rapport aux abondances de la croûte continentale supérieure met en évidence les anomalies sélectives du district (figure 4). Le Cluster 1 (roches magmatiques

encaissantes saines) montre un profil plat se superposant globalement à la ligne du Clarke (FC proche de 1), avec un Fer stable (FC = 1,16) et un Niobium normal (FC = 1,9). À l'inverse, dans les zones structurales et sédimentaires des Clusters 2 et 3, le Fer s'élève significativement au-dessus du fond régional (FC atteignant 1,95 pour le Cluster 2, traduisant l'enrichissement sédimentaire en fer de la roche hôte), tandis que l'Or et l'Argent s'envolent dans le domaine d'anomalie positive majeure, culminant respectivement à des facteurs de concentration de FC = 772 (Cluster 2) et FC = 280 (Cluster 3). En miroir, le bloc magmatique (Nb, Ta, Cu, Pb) s'effondre dans le domaine d'appauvrissement sous la ligne du Clarke, affichant des coefficients FC inférieurs à 0,01.

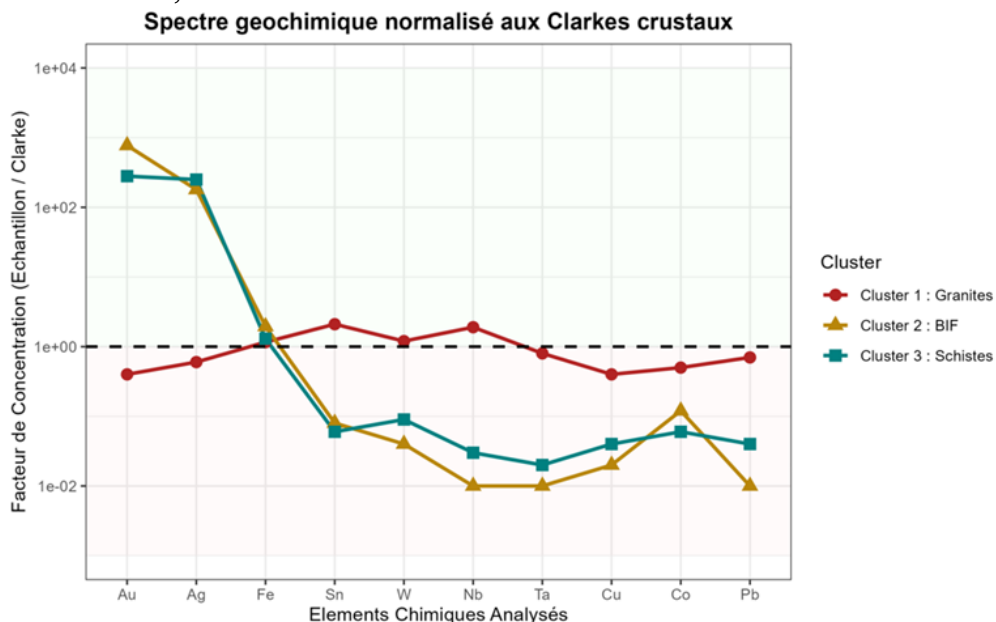


Figure 4: Spectre géochimique multi-élémentaire des facteurs de concentration normalisés aux Clarkes de la croûte continentale

III.6. Cartographie d'isoteneurs de l'or et de l'argent

La spatialisation géostatistique des teneurs par Krigeage ordinaire confirme la géométrie des conduits minéralisés à Zani-Koddo (figure 5). Les carte d'isoteneurs de l'or et de l'argent révèlent un couloir d'anomalie à forte teneur, focalisé sur la moitié Nord-Ouest et Sud-Est de la grille, englobant exclusivement les stations du Cluster 2 (E13 à E19) où la concentration franchit localement le seuil de 4,5 g/t. La portion Nord-Ouest et Sud-Ouest (Cluster 1) forme une vaste dépression géochimique stérile coïncidant avec le bruit de fond de l'encaissant.

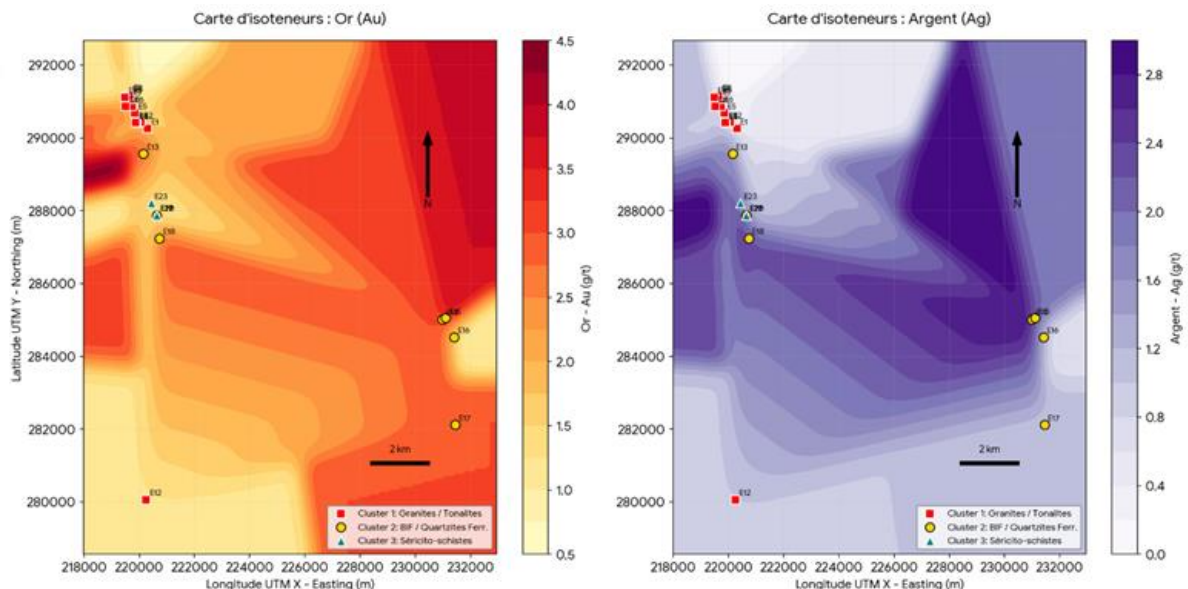


Figure 5: Cartographie spatiale par Krigeage ordinaire et distribution des clusters géochimiques (CHA) de l'Or (Au) et de l'Argent (Ag) à Zani-Koddo

IV. Discussion

IV.1. Signature magmatique de l'encaissant et contrôle lithologique primaire

L'interprétation croisée des structures statistiques fournit une reconstitution directe de l'histoire métallogénique de Zani-Koddo. L'axe factoriel F1 et la composition du Cluster 1 caractérisent la signature magmatique primaire de l'encaissant plutonique régional. La forte charge positive des éléments Nb, Ta, W et Cu sur cet axe traduit un magmatisme sain. De plus, la valeur moyenne du ratio Nb/Ta à 17,4 s'aligne sur la signature des granitoïdes et tonalites archéens (TTG) de la croûte continentale supérieure de Kilo-Moto (Lavreau, 1982 ; Bird, 2016). La forte corrélation entre le niobium et le tantale, ainsi que leur association avec le tungstène, indiquent un contrôle lithologique lié à la présence de roches magmatiques évoluées ou de filons de pegmatites dans l'encaissant. Cette masse rocheuse plutonique rigide a constitué le support mécanique nécessaire à la fracturation lors des événements tectoniques ultérieurs. Conformément aux travaux de Cahen (1954) et Duhaux (1950) dans le district minier de Kilo-Moto, ces éléments sont hérités du socle archéen et ne participent pas directement à la minéralisation aurifère.

IV.2. Le système hydrothermal orogénique tardif et le pôle schisteux

La déconnexion statistique entre l'or et le pôle magmatique (Nb, Ta) permet d'écarter l'hypothèse d'une minéralisation magmatique directe de type

porphyre ou skarn syn-chronique. L'or s'est mis en place à la faveur d'un système hydrothermal orogénique plus tardif, canalisé par les contraintes structurales (Montgomery, 2012). Le Cluster 3 (séricito-schistes et micaschistes) exprime ce contrôle structural. La circulation de fluides métamorphiques chauds le long de ces zones de cisaillement (*shear zones*) a induit un lessivage des métaux magmatiques solubles (chute des FC de Nb et Ta à moins de 0,01) et le dépôt syn-cinématique d'or et d'argent. Le ratio Au/Ag de 0,73 dans ce pôle schisteux est l'empreinte typique de fluides hydrothermaux circulant dans des structures cisailées régionales (Allibone *et al.*, 2020). Dans ces gisements de l'Est de la RDC, l'argent est généralement présent sous forme d'électrum ou inclus dans la galène et la tétraédrite (Routhier, 1980), le rapport Au/Ag variant selon la température, la profondeur de mise en place et la chimie des fluides en soufre, arsenic et antimoine (Randgold Ressources Limited, 2016).

IV.3. Piégeage de l'or par les formations de fer rubanées (BIF) : Rôle double

Le Cluster 2 met en évidence le contrôle lithologique majeur sur les plus fortes teneurs économiques du gisement. L'axe F2 de l'ACP et la forte corrélation positive Au-Fe ($r = 0,52$) démontrent une interaction chimique fluide-roche spécifique. Les fluides hydrothermaux profonds, transportant l'or sous forme de complexes bisulfurés, ont été piégés lors de leur entrée en contact avec les formations de fer rubanées (BIF) et les quartzites ferrugineux. Ce comportement s'explique par le double rôle des BIF (Rollinson *et al.*, 1998) : d'une part, leur rigidité par rapport aux schistes verts favorise une fracturation cassante sous contrainte tectonique (rôle mécanique) ; d'autre part, le fer réagit avec le fluide pour provoquer la précipitation de l'or par sulfuration (rôle chimique). Avec une concentration moyenne en fer de 97 330 ppm dans ce cluster, une réaction de sulfuration agressive s'est déclenchée, confirmée par l'explosion de l'indice Fe/(Nb+Ta) à 593 475. Le fer a consommé le soufre du fluide, déstabilisant les complexes bisulfurés pour précipiter massivement l'or natif. L'élévation du facteur de concentration de l'or à un niveau exceptionnel (FC = 772) atteste de la haute efficacité chimique de ce piège, ce qui permet de classer définitivement Zani-Koddo dans le modèle *BIF-hosted* orogénique (Lavreau, 1982 ; Groves *et al.*, 1998 ; Hagemann et Cassidy, 2000).

IV.4. Modélisation spatiale et couloirs de transfert structuraux

La cartographie par krigeage synthétise visuellement les couloirs de transfert géochimiques. L'allongement directionnel Sud/Sud-Est des iso contours dessine fidèlement la géométrie de la zone de cisaillement minéralisée. Les enrichissements localisés correspondent à des pièges

structuraux où les variations physico-chimiques du milieu ont dicté le dépôt de l'or (Montgomery, 2012). L'analyse spatiale montre que les plus fortes concentrations d'or se superposent rigoureusement sur le pôle des BIF. Ainsi, si la structure régionale (probablement orientée NW-SE) a guidé la circulation des fluides à travers la province de Kilo-Moto (Bird, 2016 ; Allibone *et al.*, 2020), c'est la lithologie réactive ferrifère qui a contrôlé la localisation des plus fortes teneurs exploitables. Cette configuration valide le caractère *structurally controlled* du gisement décrit historiquement dans la région (Antoine, 1933 ; Legraye, 1940 ; Woodtli, 1954 ; Lavreau, 1982) et documenté plus récemment dans la ceinture de roches vertes de Moto (Bloy, 2012).

Conclusion et perspectives

Cette étude confirme le modèle de gisement d'or orogénique hébergé dans des formations de fer rubanées (*BIF-hosted gold deposit*) pour le site de Zani-Koddo en Ituri. Les résultats mettent en évidence une étroite corrélation spatio-temporelle et géochimique entre la déformation tectonique et la réactivité lithologique. D'une part, les couloirs de cisaillement et les structures métamorphiques associés au pôle schisteux (Cluster 3) ont fourni la perméabilité structurale indispensable à l'ascension et à la canalisation des fluides hydrothermaux profonds. D'autre part, le piégeage métallogénique principal s'est opéré par une réaction chimique de sulfuration agressive au contact des horizons sédimentaires ferrifères (Cluster 2). Ce mécanisme, rigoureusement documenté par l'affinité Au-Fe, l'élévation de la teneur en fer à près de 10 %, le pic de l'indice de sulfuration et la superposition géométrique des surfaces d'isoteneurs par krigeage, démontre le double rôle mécanique (fracturation cassante) et chimique (sulfuration) des BIF dans la concentration de l'or.

L'intégration de cette double approche spatiale et statistique s'avère hautement prédictive. Elle valide l'utilisation des horizons de BIF comme des marqueurs géologiques majeurs et des guides d'exploration robustes. Ces conclusions fournissent un outil d'aide à la décision efficace pour orienter les futurs travaux d'exploration minière ciblée au sein du district aurifère de Kilo-Moto.

Cependant, bien que cette approche couplée, spatiale et statistique, valide le modèle orogénique *BIF-hosted* de Zani-Koddo, plusieurs axes de recherche méritent d'être explorés pour affiner la compréhension de ce système métallogénique :

1. Caractérisation minéralogique et isotopique : l'intégration d'analyses de physique des minéraux et d'études isotopiques (notamment sur les isotopes stables du soufre, de l'oxygène et de l'hydrogène) permettra de préciser la source des fluides métamorphiques, leur température

- exacte lors du dépôt, ainsi que l'évolution texturale des sulfures (pyrite, arsénopyrite) formés aux dépens du fer des BIF (Cluster 2).
2. Exploration géophysique aéroportée et au sol : le déploiement de levés géophysiques approfondis (magnétométrie à haute résolution et imagerie de résistivité) s'avère indispensable pour cartographier en profondeur le prolongement des horizons ferrifères rubanés et en identifier les discontinuités.
 3. Ciblage structural tridimensionnel (3D) : les futurs travaux d'exploration minérale au sein du district de Kilo-Moto devront prioritairement cibler l'intersection tridimensionnelle entre les couloirs de cisaillement régionaux (Cluster 3) et les zones de contact lithologique réactives. La modélisation de ces pièges géométriques offrira des cibles de forage à haute probabilité de découverte.

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, and Northeastern Democratic Republic of Congo. *Society of Economic Geologists (SEG) Special Publication*, 23, 185–201.
2. Antoine, R. (1933). La mise en valeur des champs aurifères de Kilo-Moto. *Publications de l'Institut Royal Colonial Belge, Section des Sciences Techniques*.
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 inédite]. Kingston University London.
4. Bloy, R. E. (2012). *Geological setting and mineralisation styles of the Moto Greenstone Belt, NE Democratic Republic of Congo* [Rapport technique interne inédit]. Randgold Resources Limited / Bloy Resource Evaluation.
5. Cahen, L. (1954). Géologie du Congo belge. H. Vaillant-Carmanne.

6. Cahen, L., Snelling, N.J., Delhal, J. & Vail, J.R., (1984). The Geochronology and Evolution of Africa. *Oxford: Clarendon Press*.
7. Decrée, S., Delvaux, D., & Debatty, P., (2011). Metallogenesis of the Kibaran Belt and adjacent areas in Central Africa. *Géology and Resource Potential of the Congo Basin. Royal Museum for Central Africa*, Tervuren, Belgium.
8. Duhaux, P. (1950). Pétrogénèse et métallogénèse du domaine minier de Kilo-Moto. *Annales de la Société Géologique de Belgique (A.S.G.B.)*, 73, M171–244.
9. Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F., & Platevoet, B. (2014). *Dictionnaire de géologie* (8e éd.). Dunod.
10. François, A., (1973). L’Afrique Centrale et ses ressources minérales. *Musée royal de l’Afrique Centrale*, Blegique, Tervuren,
11. Goldfarb, R. J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D. I., Hart, C. J. R., & Gosselin, P. (2005). Distribution, character, and genesis of metalliferous deposits in orogenic belts. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 407–450.
12. Govett, G. J. S. (1983). *Rock geochemistry in mineral exploration*. Elsevier.
13. Govindaraju, K. (1994). Compilation of working values and sample description for 383 Geostandards. *Geostandards Newsletter*, 18(S1), 1–158.
14. 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 dominant tectonic settings. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5), 7–27.
15. Groves, D. I., Ridley, J. R., & Mikucki, E. J. (1996). Archean lode-gold deposits: Fluid flow and chemical evolution in vertically extensive hydrothermal systems. *Ore Geology Reviews*, 10(3-4), 279–293.
16. Hagemann, S. G., & Cassidy, K. F. (2000). Archean orogenic lode gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 9–68.
17. Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
18. Kampunzu, A.B, & Cailteux, J.L.H., (1999). *Tectonic Evolution of the Lufilian Arc and the Pan-African Belt of Central Africa*. Geological Society Special Publication, London.
19. Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses* (Version 1.0.7) [Logiciel informatique]. CRAN.

20. Lavreau, J. (1982a). Étude géologique du Haut-Zaïre : Genèse et évolution d'un segment lithosphérique archéen. *Musée Royal de l'Afrique Centrale*.
21. Lavreau, J. (1982b). La géochimie des formations archéennes du Nord du Zaïre (Rapport annuel 1981-1982). *Département de Géologie et Minéralogie, Musée Royal de l'Afrique Centrale (MRAC)*.
22. Lavreau, J. (1984a). Carte géologique du Haut-Zaïre et du Nord-Kivu [Carte]. *Service géologique du Zaïre*.
23. Lavreau, J. (1984b). Vein and stratabound gold deposits of northern Zaïre. *Mineralium Deposita*, 19(2), 158–165.
24. Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18.
25. Legraye, M. (1940). Grands traits de la géologie et de la métallogénie du district aurifère de Kilo-Moto (Congo belge). *Institut Royal Colonial Belge*.
26. Lepersonne, J. (1957). Les structures tectoniques du Kibalien (Congo Belge). *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 66, 122–134.
27. Mälicke, M. (2022). SciKit-GStat 1.0: A SciPy-flavored geostatistical variogram estimation suite. *Geoscientific Model Development*, 15(6), 2505–2519.
28. Milesi, J.P., Feybesse, J.L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedraogo, M.F., Marcoux, E., Prost, A., Vinchon, C. & Johan, V., (2006). *Gold Metallogeny in the Congo Craton and Adjacent Terranes*. Orléans, France, BRGM.
29. Montgomery, R. (2012). *Structural controls and fluid flow pathways in the Zani-Kodo gold system, Democratic Republic of Congo* [Rapport d'exploration confidentiel]. AngloGold Ashanti.
30. Moureau, A. (1939). Les formations ferrifères de la région de Kilo-Moto. *Bulletin du Service Géologique du Congo Belge*, 3, 45–61.
31. Potts, P. J. (1987). *A handbook of silicate rock analysis*. Blackie & Son Ltd.
32. R Core Team. (2026). *R: A language and environment for statistical computing* [Logiciel informatique]. R Foundation for Statistical Computing. [r-project.org](https://www.r-project.org)
33. Randgold Resources Limited. (2016). *The Durba gold deposit geology and metallurgy, Moto Mining District* (Kibali Gold Mining Technical Report, Annual Report and Operational Review). Randgold Resources Limited.
34. Rollinson, H., Claeys, C., & Riches, A. (1998). Rôle mécanique et chimique des Formations de Fer Rubanées (BIF) dans la localisation de la minéralisation aurifère archéenne. *Journal of African Earth Sciences*, 27(1), 162–174.

35. Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical.
36. Routhier, P. (1980). *Où sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métallogéniques : Essai de métallogénie globale* (Mémoire du BRGM n° 105). Éditions du BRGM.
37. Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). *The continental crust: Its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Blackwell Scientific Publications.
38. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., . . . SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272.
39. Wei, T., & Simko, V. (2021). *corrplot: Visualization of a Correlation Matrix* (Version 0.94) [Logiciel informatique]. github.com
40. Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag.
41. William, R. (2026). *psych: Procedures for psychological, psychometric, and personality research* (Version 2.6.1) [Logiciel informatique]. Northwestern University.
42. Woodtli, R. (1954). Contribution à l'étude géologique et pétrographique de la région orientale des mines de Kilo (Congo belge). *Musée Royal du Congo Belge*.
43. Woodtli, R. (1957a). La structure de Kilo : Contribution à l'étude des fossés africains. *Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer*.
44. Woodtli, R. (1957b). Les quartzites ferrugineux du district aurifère de Kilo-Moto. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 66, 401–412.