



ETUDE GEOCHIMIQUE DES OCCURRENCES AURIFERES ET FERRIFERES ET DES MINERAUX ACCOMPAGNATEURS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE MAKUKU COMMUNE DE LUBERO (Territoire de Lubero, Province du Nord-Kivu)

KITSA KAHAMWITI Lissette¹, KABEMBA KALONJI Giresse¹, KATEMBO LULENDI Thésée², MUKONKOLE MUKONKOLE Patrick¹, BELESI NAKATALA Blaise¹, MUKAKA KIMWESA Olga¹, SAKA IKOLI Cathy¹, DAMA LOSANZA Julio¹, LELE MAMBWIYA Junior¹, LUTUMBA LENGJE Jean Michel¹, ONAPENDE PUNGUMBU Cardoso³, TSHIBWABWA TSHISWAKA Anne Marie¹.

¹Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM)¹, Kinshasa, RD Congo,

²Université Officielle de Ruwenzori (UOR), Butembo, RD Congo.

³Université de Kinshasa (UNIKIN) Faculté des Sciences

Résumé :

Cette étude adopte une approche méthodologique rigoureuse combinant la documentation, travaux de terrain et analyses lithogéochimiques en laboratoire pour caractériser les indices de minéralisation dans la région de Lubero. Les protocoles comprennent des levés géologiques de terrain, l'échantillonnage de roches et de sédiments fluviatiles, ainsi que des analyses quantitatives par fluorescence X (XRF) et spectrométrie d'absorption atomique (SAA). La présente étude est orientée vers la fouille des indices de minéralisation aurifères et ferrifères ainsi que leurs minéraux accompagnateurs sur le bassin de la rivière Makuku, dans la commune de Lubero. Durant les travaux de levé géologique au marteau, dix-sept échantillons ont été prélevés dont dix sédiments des rivières et sept roches ont été soumises à une description macroscopique. Tous ces échantillons ont été emballés puis envoyés au laboratoire BRUKER à Nairobi pour les différentes analyses géochimiques. Les résultats de laboratoire attestent que dans la commune rurale de Lubero, il y a présence des indices de minéralisation en or (Au), en platine (Pt) et en rhodium (Rh). Ces indices sont présents dans les sédiments de rivières (L09Y) et dans les autres formations géologiques sédimentaires (L13Y et L14Y).

Mots-clés : spectrométrie d'absorption atomique, indices de minéralisation, fluorescence X, or, clark, placer.

Digital Object Identifier (DOI) : <https://doi.org/10.5281/zenodo.23474134>

Abstract: This study adopts a rigorous methodological approach combining literature review, fieldwork, and laboratory lithogeochemical analyses to characterize mineralization occurrences in the Lubero region. Protocols include geological field mapping, rock and stream sediment sampling, as well as quantitative analyses using X-ray fluorescence (XRF) and atomic absorption spectrometry (AAS). The present study focuses on exploring gold and iron mineralization occurrences, as well as their associated minerals, within the Makuku River basin in the Lubero commune. During the geological hammer mapping phase, seventeen samples were collected—consisting of ten stream sediments and seven rocks—and subjected to macroscopic description. All samples were packaged and sent to the laboratory in Nairobi for various geochemical analyses using a BRUKER spectrometer.

Laboratory results confirm the presence of gold (Au), platinum (Pt), and rhodium (Rh) mineralization occurrences in the rural commune of Lubero. These occurrences are hosted within stream sediments (sample L09Y) as well as other sedimentary geological formations (samples L13Y and L14Y).

Keywords: atomic absorption spectrometry, mineralization occurrences, X-ray fluorescence, gold, Clarke, placer.

1 Introduction

La République Démocratique du Congo dispose des nombreuses ressources minérales qui sont notamment le diamant, le cuivre, le cobalt, l'étain, l'or, le niobium, l'uranium, etc. Elles sont essentiellement concentrées dans la partie Sud et Sud-Est du pays (cobalt, cuivre, zinc, argent, germanium et uranium) à l'Est et au Nord-Est (or, tantale, niobium, étain, pétrole, gaz naturel, etc.), au centre et au Sud-Ouest (diamant, fer et platine) et à l'Ouest (aluminium, phosphore, sel, diamant, or, plomb, zinc, vanadium, cuivre, manganèse, fer, marbre, calcaire à ciment, sables asphaltiques, pétrole, gaz naturel, minéraux industriels) (De Putter & Decrée, 2012 ; Fernandez-Alonso et al., 2017). Ces ressources se présentent sous forme d'indices minéraux et des gisements économiquement exploitables.

Le Territoire de Lubero étant une entité administrative de la Province du Nord-Kivu et faisant partie de l'Est de la RDC regorge d'énormes potentialités minières et géologiques sur lesquelles plusieurs travaux ont été menés dans le but d'avoir une connaissance élargie sur ces ressources minières (Gadhop, 2012).

En effet, l'étude de Mukandala (2017) analyse la pétrographie et la structure des formations précambriennes, notamment les micaschistes et quartzites de la série de Lubero à Luotu et Musienene. Ce travail, s'inscrivant dans la cartographie du Nord-Kivu, met en évidence des déformations tectoniques kibariennes et un potentiel minéralogique lié aux complexes métamorphiques.

L'étude approfondie faite par Atupa et Néema (2015) sur les formations géologiques des environs du secteur d'étude a permis de distinguer certaines roches constituant le soubassement. Il a été révélé que la plupart des roches du milieu sont métamorphiques, parmi lesquelles on retrouve les orthogneiss, les schistes de diverses natures et des roches magmatiques telles que les amphibolites.

L'étude faite par Japhet et Fayol (2017) sous l'aspect pétrographique, cartographique et structurale des formations géologiques de la localité de Vwandanze et environs dans le Territoire de Lubero, a permis de conclure que la localité de Vwandanze et environs est caractérisée par des formations sédimentaires (quartzites sédimentaires et grès), métamorphiques (schistes, schistes siliceux ferrugineux, chloritoschistes, gneiss ocellés, orthogneiss et micaschistes ferrugineux) ainsi que des formations magmatiques filoniennes dont la pegmatite. L'étude structurale montre que les formations de la localité de Vwandanze et environs sont en majorité orientées vers WNW-ESE et que ces formations ont été soumises, au cours des temps géologiques, aux contraintes tectoniques ayant conduit à l'apparition d'éléments structuraux variés, principalement la schistosité (orientée ENE-WSW et WNW-ESE à NNW-SSE), les cassures ouvertes (d'orientation NNW-SSE, E-W et NE-SW) et celles remplies (filons de quartz orientés parallèlement aux plans de stratification). La fracturation des roches dans la contrée a plus touché les quartzites et les schistes. Sur le plan minéralogique, l'examen des échantillons en lumière transmise et en lumière réfléchie a révélé la présence de chloritoschiste à goethite, hématite et pyrite ; quartz filonien à pyrite, hématite, goethite et chalcopryrite ; quartz filonien à goethite, hématite, chalcopryrite, et cassitérite ; gneiss ocellé à chalcopryrite, goethite et hématite ; schiste siliceux ferrugineux à chalcopryrite, pyrite, bornite, goethite et hématite ; micas ferrugineux à goethite et hématite ; quartzite (craquelée) à goethite, pyrite, chalcopryrite ; schiste à hématite, goethite et chalcopryrite.

Par la suite, l'étude géochimique des formations géologiques de Vwandanze et environs réalisés par Kawa et al (2022) révèle la présence de l'or associé à l'argent. Ces indices de minéralisation sont encaissés dans l'orthogneiss et la diorite (indices syngénétiques) mais piégés dans les filons de quartz et de pegmatite (indices épigénétiques).

Les investigations menées par Kasekete et al (2019) dans le bassin versant topographique de la rivière Makuku à Lubero, sous l'aspect géométrique, hypsométrique et morphométrique a abouti à des résultats tels que le bassin versant de la rivière Makuku est trapu et s'étend sur 28,278 km² pour un contour de 23,604 km. Cela a poussé l'auteur à dire que si ce bassin avait une forme régulière simple, il équivaldrait à un rectangle de 8,459 km de long et 3,343 km de large mais aussi l'allure de la courbe hypsométrique et la valeur de la dénivelée ont montré qu'il y a une variation rapide d'altitude sur ledit bassin et la commune de Lubero est susceptible au mouvement de masse.

La présente étude géochimique sur les occurrences aurifères, ferrières et minéraux accompagnateurs dans le bassin versant de Makuku localisé dans la commune rurale de Lubero constitue ainsi un complément des travaux faits par Amisi et Kikwaya (2017), Mukandala (2017), Kawa et al (2022) et Kasekete et al (2019). Il est question de connaître la nature du matériau encaissant de l'or et de fer dans le bassin versant de la rivière Makuku, l'origine autochtones ou allochtones des minerais de l'or rencontrés dans le bassin versant de la rivière Makuku ainsi que les types de la minéralisation retrouvée dans le bassin versant de la rivière Makuku.

Les objectifs poursuivis dans cette étude sont donc de produire un document de base pour élargir la connaissance scientifique sur la lithologie de Lubero, connaître l'origine de l'or dans le bassin versant de la rivière Makuku et caractériser la typologie de la minéralisation de la rivière Makuku.

2 MILIEUX D ETUDE

2.1 Géographie du Milieu

Le bassin versant de la rivière Makuku s'étend sur trois quartiers (Lubero, du 30 juin et Vukano) de la commune rurale de Lubero et se prolonge sur les périphéries Est, Sud et Sud-Ouest de ladite commune en chefferie de Baswagha et de Bashu. La commune de Lubero est située entre 29° 8' et 29°10' des longitudes Est et sur 0° 6' et 0°8' des latitudes Sud à environ 52 km au Sud de la ville de Butembo sur la route nationale n°2 qui relie Butembo et Goma. Elle a une superficie de 8,05 km² et son altitude moyenne est de 1800 m (PNUD, 2009, Saint-Moulin L. de, 2011, Thirion C. et Wyvken Ph., 2015, Kakule, 2016 ; Kakule, 2020).

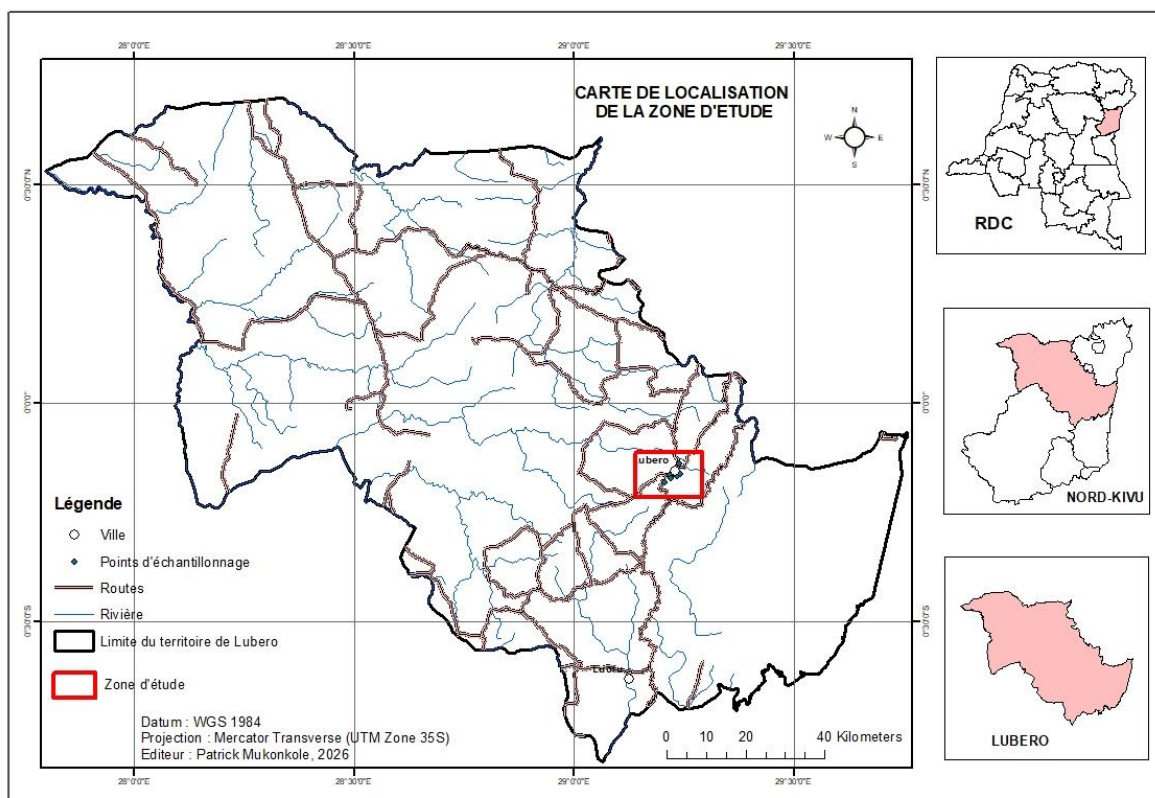


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude et ses environs en R.D. Congo, au Nord-Kivu et dans le territoire de Lubero

Généralement, le relief (figure 2) du territoire de Lubero est du type montagneux caractérisé souvent par des montagnes, collines et plateaux qui expliquent directement des vallées où ruissellent les cours d'eau (Sivirihauma, 1984 ; Kakura et al, 2005). Le climat varie avec l'altitude. Cette région appartient au domaine équatorial humide tempéré par l'altitude. Les pluies sont abondantes à l'exception relative des mois de décembre, janvier et février. La pluviosité varie suivant l'exposition (Kakura et al, 2005).

L'hydrographie de la commune Lubero est dominée par quatre grandes rivières essentielles : la rivière Munovo à l'Est, Lubero au centre, Munovo à l'Ouest et Makuku au Sud ; ainsi les petites rivières qui appartiennent au bassin versant de la rivière Makuku dans lesquelles nous avons prélevé des échantillons de sédiment (Kasekete et al., 2019).

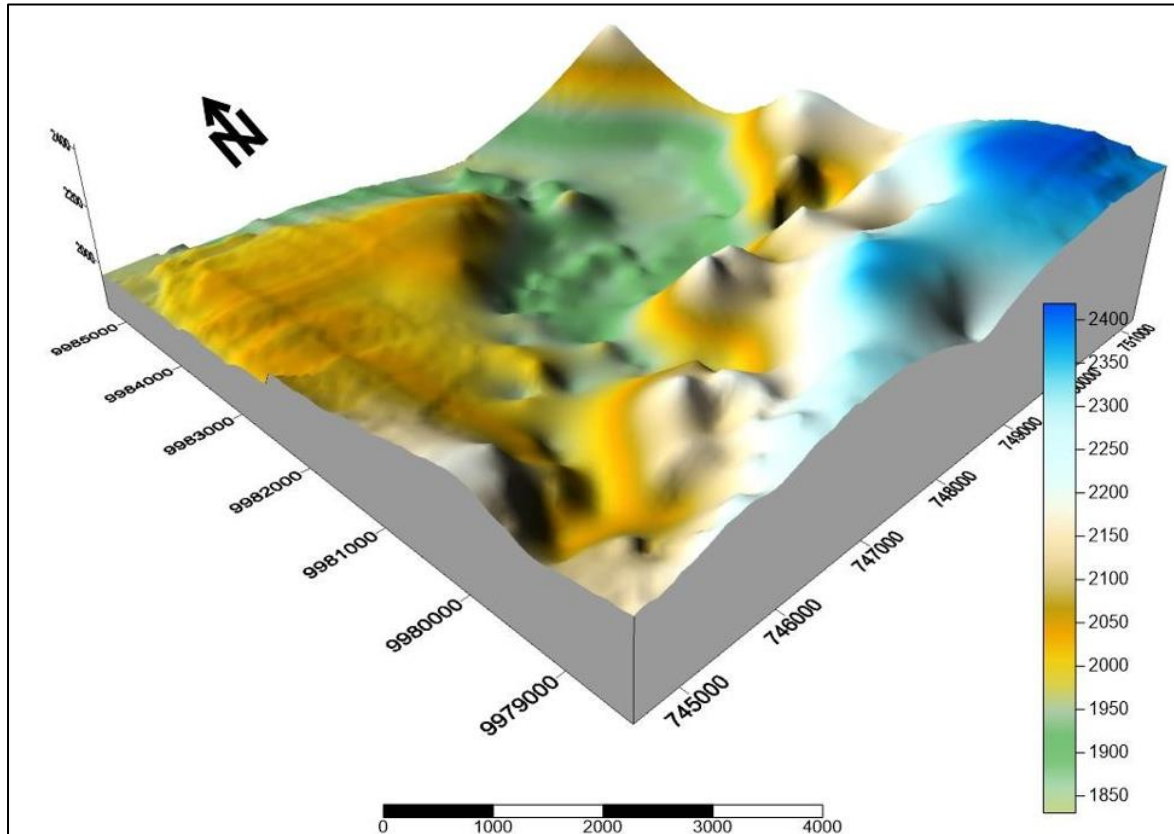


Figure 2 : Vue en trois dimensions du relief du bassin versant de la rivière Makuku (source : Kasekete et al., 2019)

2.2 Context Géologique

La région de Lubero correspond pour sa partie occidentale montagneuse, à une zone de socle complexe d'âge variant de l'Archéen au Mésoprotérozoïque et pour sa partie centrale à des séries de remplissage d'âge tertiaire à actuel. Le Précambrien est ici représenté par trois ensembles géologiques qui sont du plus récent au plus ancien :

- Les formations schisto-gréseuses peu métamorphiques (faciès épizonal) plissées et nettement discordantes sur les séries antérieures d'âge Mésoprotérozoïque (Supergroupe du Kivu ou Burundien) ;
- Les formations nettement métamorphiques (faciès mésozonal) d'origine sédimentaire ayant probablement subi plusieurs tectoniques plicatives plus ou moins intenses et que l'on peut considérer comme la couverture métamorphique d'un vieux substratum cristallin : le Kibalien inférieur d'âge archéen probable ;
- Le substratum cristallin indifférencié, constitué de granites laminés et rétro-morphosés passant à des orthogneiss dans le sens général ainsi que des intrusions granitiques d'âge Kibalien ou plus jeune.

Les formations d'âge tertiaire sont caractérisées par une sédimentation détritique et fluvio-lacustre représentées par une formation de base d'âge probable mi-tertiaire composée de sable, arkose et grès grossiers argileux qui repose directement sur le soubassement. Le remplissage quaternaire du fossé comprend les séries lacustres

suivantes, du plus ancienne au plus récentes : séries de Kaiso, de Semliki et série lacustre récente et les terrasses d'Ishango (Direction du Service géologique du Zaïre, 1981 ; Fernandez-Alonso et al., 2015).

Du point de vue de la géologie locale, la lithologie de la commune Lubero et environs est constituée des roches métamorphiques (les quartzites), magmatiques (les granites) et sédimentaires (les grès et les quartzites). Le bassin versant de la rivière Makuku se trouve sur la feuille de Lubero et contient une diversité de formations géologiques dont les plus dominants sont les schistes et les grès. Lors de la descente sur le terrain, il a été constaté une diversité lithologique à différents endroits :

- Les grès sur les collines et montagnes de Kyanguluvu ;
- Les grès rouges affleurant sur le talus de la route Butembo-Goma, dans les carrières de Kamalera et de Muluvo ;
- Les schistes dans la quasi-totalité de la commune rurale de Lubero ;
- Le conglomérat à ciment ferrugineux du type brèche affleure dans la cellule Majengo.
- Les schistes gréseux et grès schisteux dans la région de Kamihunga et Ivingu.
- Quartzites, cuirasses latéritiques, voire de granite dans la région.

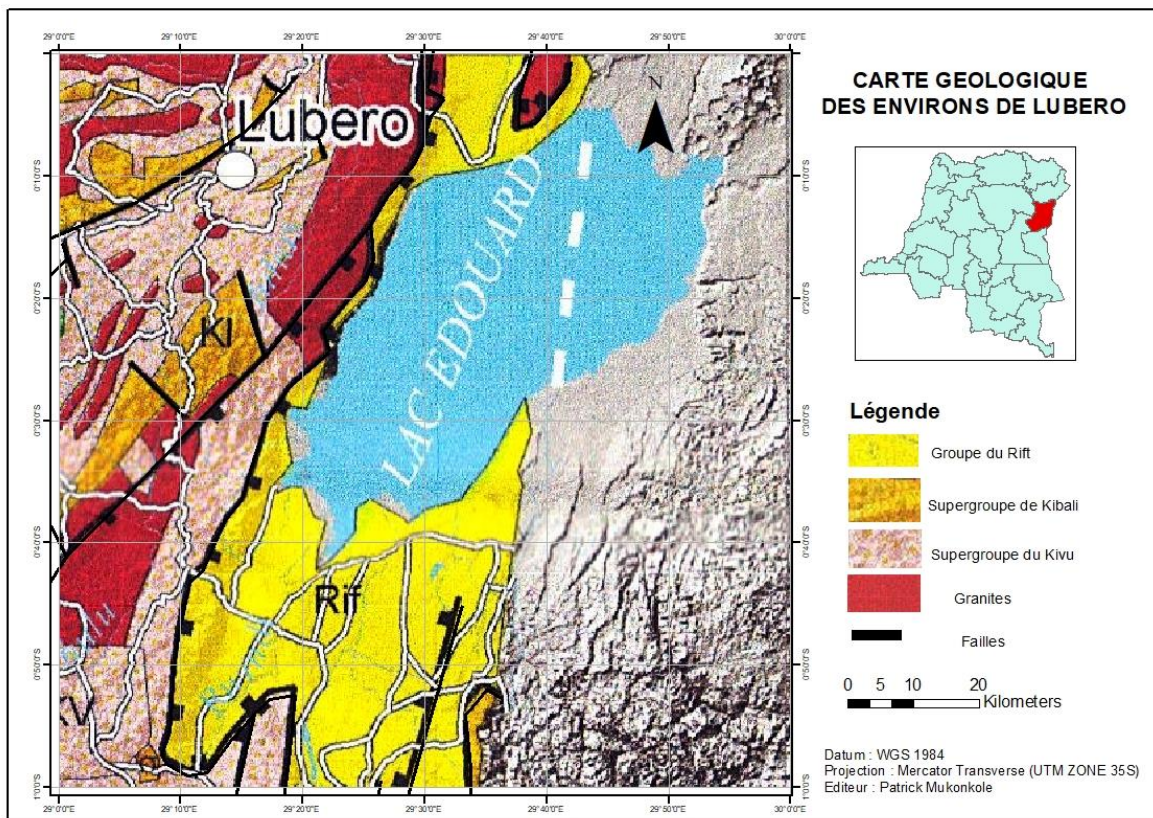


Figure 3 : Carte géologique des environs de Lubero (Tiré de Fernandez-Alonso et al., 2015)

3 MATERIELS ET METHODES

Ce paragraphe est dédié à la présentation détaillée du cadre expérimental et des choix méthodologiques mis en œuvre pour répondre à nos hypothèses de recherche. Afin de garantir la reproductibilité de nos travaux et la fiabilité des données collectées, une approche rigoureuse a été adoptée pour chaque étape de l'étude. Pour offrir une lecture claire et structurée, la présentation de chaque méthode est systématiquement couplée à la description du matériel spécifique qui a permis sa réalisation. Cette synergie entre protocoles et outils techniques est indispensable : le choix du matériel découle directement des exigences de la méthode, tandis que la précision des instruments conditionne la validité des résultats obtenus. Les sections suivantes détaillent ainsi, de manière séquentielle, les procédures opérationnelles, les critères de sélection des outils utilisés, ainsi que les techniques d'analyse des données qui en découlent.

3.1 Documentation

La méthode de récolte des données s'est focalisée sur la lecture des documents en rapport avec le secteur et/ou le sujet d'étude. Il s'agit des cartes géologiques, des articles, des mémoires, des rapports, des archives, des annales géologiques, des thèses de doctorat, des sites internet et des livres relatifs au sujet traité.

Les informations orales nous ont aussi servi pour la réalisation de ce travail ; cas des différentes réponses données par les paysans surtout en ce qui concerne la précision des noms des différents sites visités et affluents de la rivière Makuku.

3.2 Travaux de terrain

Les données de terrain ont été récoltées durant cinq jours ouvrables et ont consisté en général à un lever géologique régenté sur la description macroscopique des affleurements des roches, des sédiments des lits des cours d'eau, le repérage géométrique des éléments structuraux, l'orientation des cours d'eau, le prélèvement de coordonnées géographiques et la récolte des échantillons in situ.

En outre, notons que lors de la préparation des itinéraires, il a été retenu particulièrement les zones les plus propices aux affleurements qui sont les lits des cours d'eau et/ou vallées, les escarpements et les talus des routes. A l'occasion, un certain nombre d'échantillons représentatifs a été sélectionné sur base de facies et a été soumis ultérieurement aux analyses de laboratoire au ministère des Mines et du Pétrole à Nairobi au Kenya.

En effet, une boussole de marque Sylva a été utilisée pour le repérage géométrique des éléments structuraux suivant les principes ci-dessous :

➤ Pour la direction:

- Faire correspondre le Nord géographique avec la ligne de foi de la boussole ;
- Appliquer le talon de la boussole sur la structure à orienter ;
- Une fois la bille entre ses repères, faire correspondre le Nord géographique avec le Nord magnétique ;
- Puis lire la valeur sur la ligne de fois, cette dernière correspond à la direction de la structure.

➤ Pour le pendage :

- Faire correspondre axe E-W avec la ligne de foi ;
- Appliquer le talon de la boussole sur la structure à mesurer perpendiculairement à la direction ;
- Lire la valeur du pendage sur le clinomètre.

Mais aussi le sens d'écoulement à l'intercepte suivant le principe :

- Faire correspondre l'axe N-S avec la ligne de foi ;
- Se tenir parallèlement au sens d'écoulement de la rivière ;
- Tenir la boussole à la main horizontalement, une fois la bille entre ses repères, faire correspondre le Nord géographique avec le Nord magnétique et lire le sens d'écoulement du cours d'eau sur la ligne de foi.

L'échantillonnage a été effectué sur des roches en place à l'aide du marteau de géologue de marque Estwing USA pour casser celui-ci au massif rocheux.

Le GPS de marque ETREX-10 a facilité la géolocalisation des affleurements et des différents sites retrouvés in situ. Les différentes coordonnées géographiques ont été prélevées en UTM.

3.3 Description et analyses des échantillons des roches

La description macroscopique des échantillons a été faite en utilisant une loupe suivant la procédure ci-après :

- Mouillage de l'échantillon dans l'eau contenu dans un seau avant toute opération ;
- Masser les échantillons jusqu'à obtenir des fines particules ;
- Tamiser les échantillons dans un tamis d'environ 80 micromètre ;
- Placer les échantillons dans un sachet portant la nomination suivante : L numéro de l'échantillon Y. exemple : L03Y ;
- Tenir la loupe (agrandissement X 10) à la main droite ;
- Prendre la roche / l'échantillon à la main gauche ;
- Rapprocher la loupe et la roche de l'œil, puis discriminer les minéraux dans la roche.

3.4. Prélèvement et description des échantillons des sédiments des rivières

Les échantillons des sédiments ont été prélevés manuellement sur les lits vifs des rivières en visant les méandres soit l'endroit où l'écoulement est laminaire (partie convexe de la rivière). Durant ce temps, nous avons pu mesurer la profondeur et la pente de rivière avec une tape mesure. La boussole nous a permis d'avoir le sens l'écoulement de l'eau, la méthode de flottation a consisté à avoir la vitesse de chaque cours d'eau dans une distance d'environ 50 mètres de longueur à l'aide d'un décamètre. Les échantillons ont été lavés et tamisés jusqu'à ce qu'on puisse avoir une boue qui a été décantée et renversée dans un sac à échantillon. Après cela, la boue a été séchée au soleil, moulu et ramenée au laboratoire. La moitié et autre moitié réservé comme échantillon témoin.

17 échantillons choisis sur base des variations de caractéristiques lithologiques et minéralogiques ont été nécessaires pour les analyses géochimiques au laboratoire de Kenya du ministère des Mines et du Pétrole à Nairobi. Ces analyses ont permis d'avoir des résultats ayant servi à déterminer de la manière la plus précise les indices minéralisation de la commune rurale de Lubero et environs.

3.5. Analyses lithogéochimiques des échantillons

Les analyses de laboratoire ont été faites grâce aux méthodes de fluorescence X et de spectrométrie d'absorption atomique (SAA).

3.5.1. Fluorescence X (XRF)

3.5.1.1. Principe de fonctionnement

Cet objectif a été atteint par la fluorescence des rayons X du ministère kenyan des Mines et du Pétrole; l'intérêt était de déterminer la présence et la concentration des éléments en traces des échantillons pulvérisés. Ceci a été réalisé par le modèle BRUKER XRF, S1 TITAN. Des analyses ont été faites sur nos échantillons pulvérisés.

3.5.1.2. Procédure

Ce processus devait prendre une mesure de 100 g à partir des échantillons. Toute la valeur de la concentration des éléments a été enregistrée dans l'ordinateur et a été donnée en termes de pourcentages.

3.5.1.3. Contrôle de qualité

La précision concerne la reproductibilité des résultats obtenus à partir d'un échantillon analysé connu.

Les résultats XRF ont été testés en utilisant un échantillon aveugle qui a été ajouté aux 17 échantillons. Ensuite, les lectures ont été comparées en utilisant l'équation fournie par Maxwell (1968), qui prend en compte l'écart type (ET) sur la moyenne avec précision à 95% de confiance :

$$P = 2 \text{ ET} / X$$

Où : ET (ou SD) = l'écart type ; N = nombre de lectures ; P = est les lectures d'analyses des mêmes échantillons ; X = Moyenne des valeurs (lectures) pour chaque élément.

3.5.2. Spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

3.5.2.1. Principe de fonctionnement

Ceci a été réalisé par la spectrométrie d'absorption atomique au laboratoire du Département des sciences du sol (Université de Nairobi), l'intérêt était de déterminer la présence et la concentration de Na, K et Mg d'échantillon. Analyses effectuées sur la préparation d'échantillons digérés.

3.5.2.2. Procédure :

Les étalons ont été préparés puis analysés pour étalonner l'équipement. Les analyses standard ont produit une courbe d'émission de normalisation de la concentration d'émission en ppm. Les lectures ont été enregistrées en ppm. Le pourcentage de SAA donnait des concentrations élémentaires en ppm (que nous avons appelées lectures).

3.5.2.3. Contrôle de qualité

Les résultats SAA ont été testés en prélevant l'échantillon par photométrie de flamme et le Département des sciences du sol de l'Université de Nairobi. Le même échantillon a également été analysé à l'aide de l'SAA au ministère kenyan des mines et du pétrole. La précision a été déterminée avec une confiance de 95%.

La norme pour les SAA a été préparée à l'aide de la solution standard mère (1000 ppm). La préparation a été effectuée dans des fioles jaugées de 100 ml et les solutions de référence ont été préparées à 0 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm et 20 ppm. À la fin de ces analyses, le degré d'enrichissement et la concentration des éléments ont été déterminés dans les deux systèmes différents (roches fraîches et altérées et latérites), ce qui a permis de déterminer quel métal ou métaux peuvent être extraits des latérites d'une partie du Niobium.

3.6. Traitement et analyse des données

3.6.1. Traitement des données cartographiques

Les données de terrain et d'analyses géochimiques ont été saisies en Excel et transportées dans les différents logiciels pour des traitements spécifiques, conformément aux procédures reprises dans les tutoriels respectifs avec trois logiciels QGIS, Surfer 13 et Past ont été utilisés pour traiter les données de terrain.

Le fond topographique de la zone d'étude a été établi en projetant les coordonnées géographiques recueillies sur terrain dans le logiciel Surfer 13.

Pour délimiter le bassin versant et dresser son réseau hydrographique, nous avons projeté les coordonnées de cours d'eau (source, méandre, confluence, exutoire, bref : thalweg) et des lignes de crêtes (limites du bassin versant) dans le logiciel QGIS.

De là, nous avons créé les Shape-files délimitant le bassin versant et le Shape-file du réseau hydrographique. L'outil « calculateur de champ » a été utilisé pour évaluer la surface et le périmètre du bassin versant, calculer les longueurs des cours d'eau et des courbes de niveau, mesurer la distance du plus long parcours, etc. qui nous ont permis de calculer les paramètres caractérisant la géométrie (forme et dimensions), le relief (pentes) et le réseau hydrographique du bassin versant tel que détaillés ci-dessous (Dubreuil, 1974 ; Laborde, 2009).

Nous avons traité les données géochimiques grâce aux logiciels Excel et Past (Hammer, 2017). Ainsi, la matrice de corrélation inter-éléments, construit des courbes d'évolution de teneurs, des droites de régression, de cluster et de diagramme d'analyse en composantes principales (Scatter plot).

3.6.2. Traitement des données lithogéochimiques

Ces données ont été traitées grâce à la normalisation des teneurs des éléments en ppm sur base du Clarke en vue de déduire de l'enrichissement et/ou de l'appauvrissement des échantillons et environs.

L'interprétation de la corrélation inter-éléments a fait l'objet de nos études en se basant des tests statistiques de corrélation-régression. Pour y parvenir la table de Rollinson (1993) nous a servi de faire directement les corrélations significatives grâce à la matrice de corrélation au seuil de 95% de confiances (Annexe 3). Dans cet ordre d'idées, cette formule $Df = N - 2$, (où, Df qui est le degré de liberté ; N présente les nombres d'échantillon analysés dont $N=17$ pour nous) nous a permis d'atteindre notre but.

4. RESULTATS

➤ Distribution des teneurs brutes des éléments dans les échantillons (ppm)

La répartition des éléments dans les échantillons n'est pas régulière (Tableau 3). Le fer est plus abondant dans tous

nos échantillons et d'autres métaux tels que As, Au, Pt ... y sont concentrés à des proportions assez faibles mais non négligeables.

Table 1. Résultats bruts des éléments en traces (ppm).

Echantillon.	Au	Cu	Pt	Rh	Fe	Mn	Ni	As
L01Y	0,000	50,000	40,000	60,000	43650,000	460,000	20,000	10,000
L02Y	0,000	40,000	30,000	60,000	37740,000	610,000	10,000	0,000
L03Y	0,000	90,000	30,000	80,000	69570,000	840,000	40,000	0,000
L04Y	0,000	40,000	0,000	60,000	42850,000	1180,000	10,000	0,000
L05Y	0,000	50,000	0,000	70,000	47220,000	1370,000	10,000	0,000
L06Y	0,000	40,000	0,000	60,000	40860,000	860,000	0,000	0,000
L07Y	0,000	40,000	0,000	50,000	39010,000	1350,000	0,000	0,000
L08Y	0,000	40,000	0,000	60,000	46880,000	1080,000	30,000	0,000
L09Y	10,000	60,000	20,000	70,000	56420,000	710,000	10,000	0,000
L10Y	0,000	30,000	0,000	40,000	28470,000	420,000	10,000	0,000
L11Y	0,000	40,000	30,000	0,000	16520,000	300,000	0,000	0,000
L12Y	0,000	20,000	0,000	0,000	4400,000	0,000	0,000	0,000
L13Y	20,000	70,000	80,000	20,000	8760,000	450,000	10,000	0,000
L14Y	60,000	480,000	30,000	110,000	572960,000	3950,000	10,000	0,000
L15Y	0,000	60,000	0,000	0,000	5550,000	1540,000	600,000	0,000
L16Y	0,000	50,000	60,000	20,000	5220,000	130,000	0,000	0,000
L17Y	0,000	20,000	0,000	310,000	719480,000	1110,000	460,000	0,000

➤ Normalisation des teneurs

La normalisation permet de repérer l'élément précieux pouvant amener à découvrir un probable gisement dans la zone explorée. Ce paramètre permet d'appréhender le degré d'enrichissement/appauvrissement des sites en tels ou tels autres éléments. La normalisation des teneurs des éléments a été faite par rapport à leur Clarke.

Le tableau 4 met en évidence que le platine et le rhodium ont une teneur élevée dans presque tous les échantillons ; ils sont suivis de l'or (Au) dans les échantillons L09Y, L13Y, L14Y. Les autres éléments, le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le nickel (Ni) et l'arsenic (As) ont une concentration inférieure à 2 ppm sauf dans certains échantillons.

Echantillon	Au	Cu	Pt	Rh	Fe	Mn	Ni	As
L01Y	0,000	0,909	8000,000	85714,286	0,873	0,460	0,267	2,000
L02Y	0,000	0,727	6000,000	85714,286	0,755	0,610	0,133	0,000

L03Y	0,000	1,636	6000,000	114285,714	1,391	0,840	0,533	0,000
L04Y	0,000	0,727	0,000	85714,286	0,857	1,180	0,133	0,000
L05Y	0,000	0,909	0,000	100000,000	0,944	1,370	0,133	0,000
L06Y	0,000	0,727	0,000	85714,286	0,817	0,860	0,000	0,000
L07Y	0,000	0,727	0,000	71428,571	0,780	1,350	0,000	0,000
L08Y	0,000	0,727	0,000	85714,286	0,938	1,080	0,400	0,000
L09Y	200,000	1,091	4000,000	100000,000	1,128	0,710	0,133	0,000
L10Y	0,000	0,545	0,000	57142,857	0,569	0,420	0,133	0,000
L11Y	0,000	0,727	6000,000	0,000	0,330	0,300	0,000	0,000
L12Y	0,000	0,364	0,000	0,000	0,088	0,000	0,000	0,000
L13Y	400,000	1,273	16000,000	28571,429	0,175	0,450	0,133	0,000
L14Y	1200,000	8,727	6000,000	157142,857	11,459	3,950	0,133	0,000
L15Y	0,000	1,091	0,000	0,000	0,111	1,540	8,000	0,000
L16Y	0,000	0,909	12000,000	28571,429	0,104	0,130	0,000	0,000
L17Y	0,000	0,364	0,000	442857,143	14,390	1,110	6,133	0,000

Table 2 : Distribution des teneurs normalisées des éléments dans les échantillons.

➤ **Classification Clustering/Dendrogramme**

Le regroupement des échantillons (figure 4) sur base des analyses géochimiques révèle qu'il y a rapprochement des échantillons qui contiennent des proportions presque égales en métaux. Les échantillons sont rassemblés en trois sous-groupes. Le premier est formé des échantillons L13Y et L16Y. Cette classe est caractérisée des éléments rhodium et platine ; le second est composé des échantillons L04Y, L05Y, L12Y, L10Y, L15Y, L06Y, L07Y, L08Y et L17Y. Cette association est justifiée par la concentration non seulement en fer (Fe) et rhodium (Rh), mais aussi en manganèse (Mn). Le dernier sous-groupe regroupe les échantillons L02Y, L03Y, L11Y, L14Y, L09Y et L01Y. Ces échantillons sont riches en or (Au), platine (Pt) et rhodium (Rh).

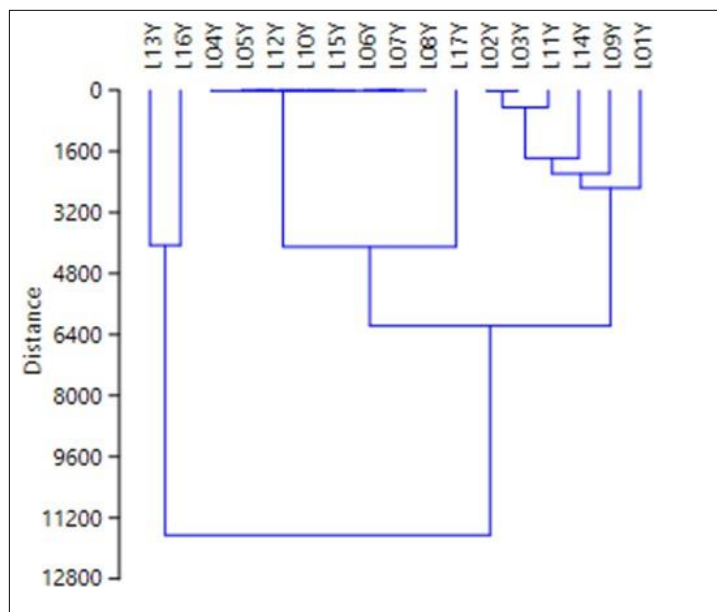


Figure 4 : Regroupement des échantillons selon leur nature et leur composition

➤ **Analyse en Composantes Principales (ACP)**

Cette analyse montre la distribution des éléments dans les échantillons suivant leur influence à la construction des axes. L'examen des plans factoriels permet de visualiser les corrélations entre éléments et d'identifier les groupes d'échantillons ayant des compositions chimiques presque identiques (figure 5).

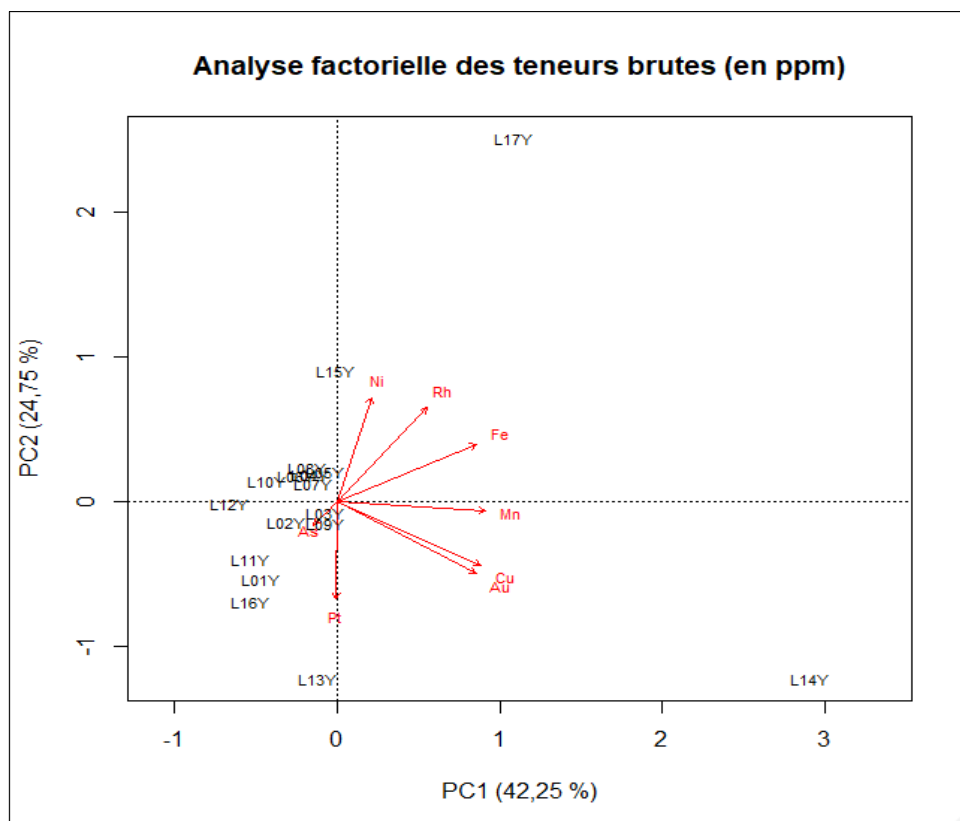


Figure 5 : Diagramme d'analyse en composantes principales

Cette analyse (figure 5) montre que les concentrations en manganèse (Mn), en cuivre (Cu), en or (Au), en fer (Fe) sont beaucoup plus liées à l'axe 1. Cet axe explique 42,25% de la répartition des éléments dans les différents échantillons.

Ainsi, le platine (Pt), l'arsenic (As), le nickel (Ni) et le rhodium (Rh) ont contribué à la construction de l'axe 2 et explique 24,7 % de cette répartition.

En effet, les deux axes expliquent 66,95 % de la présence de métaux analysés dans les différents échantillons (annexe 1). Le reste d'inertie est expliqué par les facteurs géologiques, géochimiques et structuraux du secteur étudié.

Pour mieux appréhender le degré de dépendance entre les éléments, nous recourons à la matrice de corrélation (tableau 5) qui nous a permis de calculer les coefficients de corrélations inter-éléments et testons leurs significativités en faisant les tests de régression linéaire.

Table 5: Matrice de corrélation

Au	1,000							
Cu	0,948	1,000						
Pt	0,324	0,200	1,000					
Rh	0,120	0,127	-0,218	1,000				
Fe	0,517	0,530	-0,109	0,869	1,000			
Mn	0,775	0,862	-0,173	0,306	0,601	1,000		
Ni	-0,132	-0,097	-0,283	0,386	0,380	0,170	1,000	
As	-0,091	-0,053	0,223	-0,011	-0,077	-0,145	-0,076	1,000
Au	Cu	Pt	Rh	Fe	Mn	Ni	As	

Tenant compte du degré de liberté ($df = N - 2$) dont $17-2=15$. Il est considéré corrélation significative toute corrélation dont la valeur est $\pm 0,482$ au seuil de confiance 95 % (voir table de Rollinson, 1993). De part cette analyse statistique, sept corrélations significatives positives sont identifiées. Il s'agit des corrélations Cu-Au, Fe-Au, Fe-Cu, Fe-Rh, Mn-Au, Mn- Cu et Mn-Fe. Leurs droites de régression linéaire sont illustrées à la figure 6.

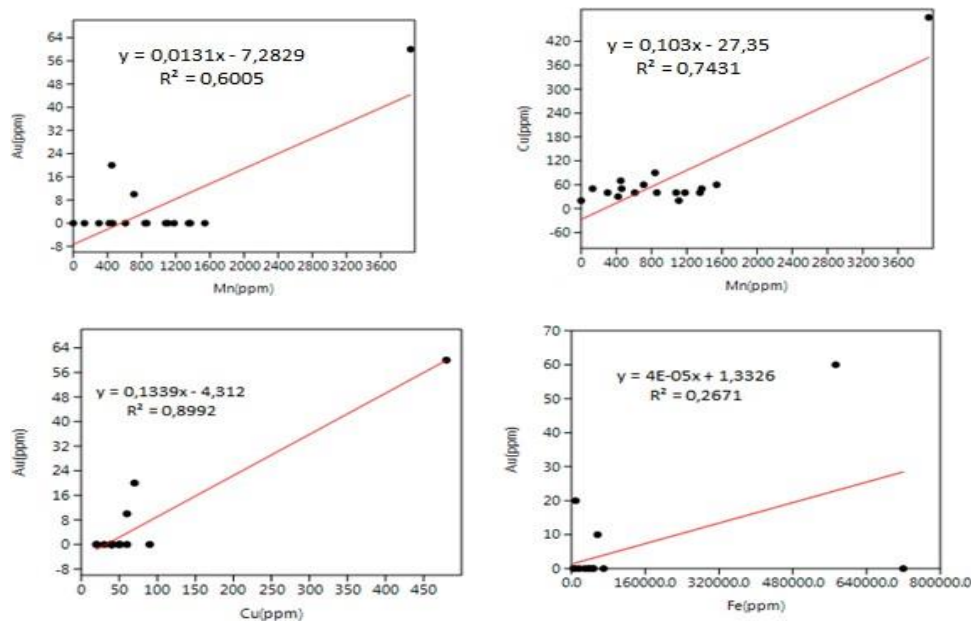
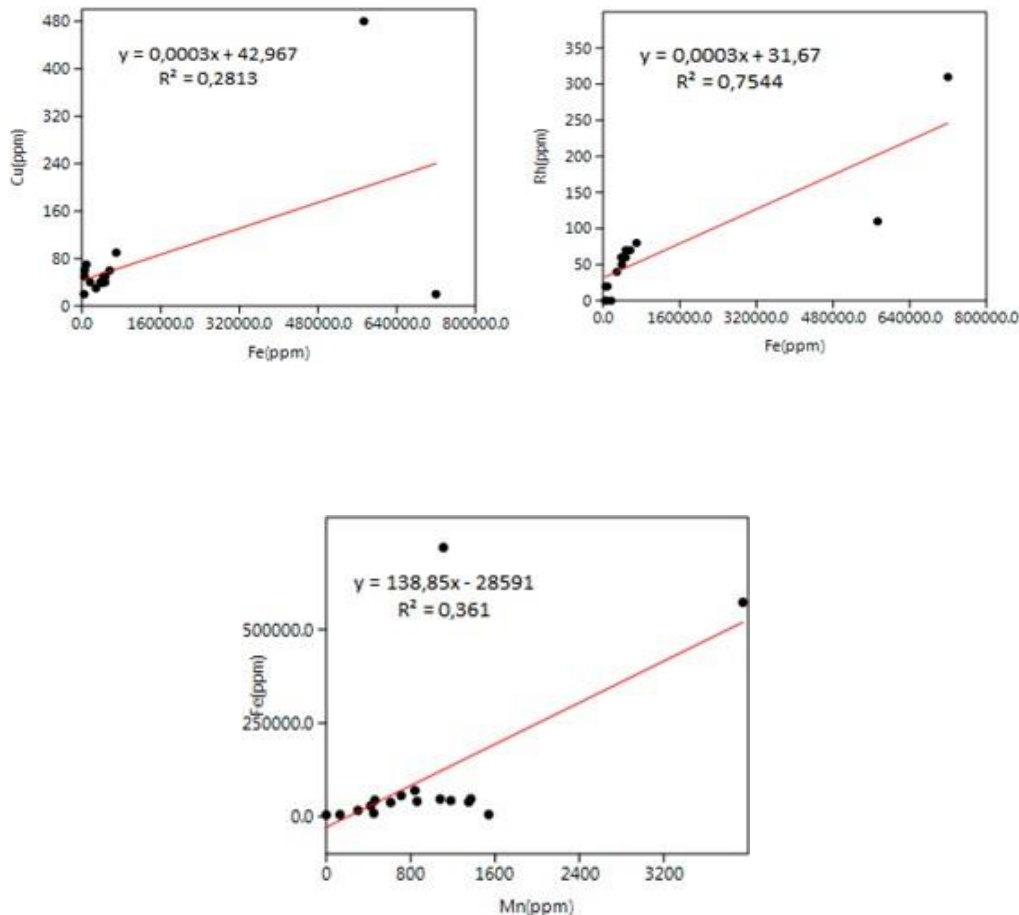


Figure 6 : Droites de régressions linéaires significatives entre les éléments

Les graphiques de corrélations significatives inter-éléments visualisés dans cette figure mettent en évidence que toutes les corrélations sont positives et nous en discuterons dans les lignes qui suivent.

Toutefois, l'analyse basée sur la valeur du coefficient de détermination prouve encore une fois qu'il existe une corrélation forte entre Cu-Au ($R^2 = 0,8992$), Fe-Rh ($R^2 = 0,7544$), Mn-Cu ($R^2 = 0,7431$) et Mn-Au ($R^2 = 0,6005$) qui est en 60% ; tandis que les autres éléments se lient à des degrés de corrélation inférieure à 50 % comme les corrélations entre Mn-Fe, Fe-Cu et Fe-Au.



4 Discussion

Ce travail nous a permis de cerner en partie les arguments géochimiques et pétrographiques de l'évolution temporelle des réservoirs magmatiques, l'origine des matériaux, la cristallisation et la fusion (Carole, 2006). Cette étude nous a aidé à faire une interprétation et une détermination des divers éléments retrouvés dans le bassin versant de la rivière Makuku en commune rurale de Lubero.

L'interprétation des résultats de laboratoire a montré les métaux platine (Pt) et rhodium (Rh) associés à l'or (Au) ; ils pourraient faire l'objet d'une recherche plus poussée.

Ces gaz se refroidissent et réagissent avec la roche encaissante, produisent des minéraux contenant des chlorures, des fluorures et des sulfates mais aussi des métaux précieux tels que l'or (Au), l'argent (Ag), le cuivre (Cu), le platine (Pt), etc. sous forme de sulfures. Lorsque le magma continue à se refroidir en dessous de 400°C, la formation de minéraux se produit à partir de la précipitation de substances et d'apports venant de la roche encaissante. C'est par exemple de cette façon que se sont formés les minéraux des fentes alpines (Schuman, 1985). Les gisements dans des placers sont des concentrations de particules érodées des minéraux de valeur dans des dépôts alluviaux ou éluviaux de sables ou graviers. Les minéraux dans ces gisements sont formés initialement dans la croûte, par la cristallisation de magmas, dans des roches métamorphiques ou par des fluides hydrothermaux. Ces minéraux sont libérés de leur roche hôte mise à l'affleurement par l'altération chimique et l'érosion mécanique. Ces derniers sont ensuite concentrés dans des corps minéralisés par les processus sédimentaires. Les gisements des placers aurifères se sont mis en place dans les graviers des rivières ou dans les sables éoliens et les gisements de minéraux lourds à Zr et Ti dans les plages de sable. Ces deux cas constituent des exemples typiques de cette catégorie de gisements. Les minéraux impliqués sont surtout les minéraux de densité supérieure à 3, ce qui inclut l'or, l'argent, le platine, la cassitérite, mais aussi des minéraux moins lourds comme la magnétite, l'ilménite, etc. En ce qui concerne l'or, les minéraux porteurs les plus typiques sont la pyrite, l'arsénopyrite, la pyrrhotine, la chalcopryrite, la galène et la sphalérite (Guilloux et Méloux, 1987).

Deux grands types de gisements peuvent être distingués dans les placers : les gisements alluviaux, dans lesquels l'or est transporté par les rivières ou les courants littoraux puis séparé des autres minéraux par l'action de ces courants ; et les gisements éluviaux, dans lesquels l'or et ses accompagnateurs restent plus ou moins en place sur le site d'affleurement du gisement primaire tandis que les autres minéraux sont lessivés (Guilloux et Méloux, 1987).

Dans la commune rurale de Lubero, les indices de minéralisation de l'or ont été confirmés dans l'échantillon de l'alluvion L09Y. Rappelons que dans le cas des placers alluviaux formés dans les lits des rivières, les processus hydrauliques concentrent l'or et ses accompagnateurs ; il s'accumule ainsi des métaux denses là où la vitesse du courant diminue notablement dans les bancs de sables et de graviers, à l'intérieur des méandres, sous les chutes d'eau et les rapides descendant de grands rocheux, dans les lits des rivières, sous les couverts végétaux, le long des lignes de rivages sur les plages, devant les seuils rocheux, dans les marmites d'érosion et au niveau d'autres sites de piégeage.

Ces indices de minéralisation de l'or ont été observés dans l'échantillon L13Y, L14Y et L09Y de lithologie respective brèches tectonique et brèche ainsi dans le sédiment de la confluence Kighende ; ce qui nous réfère au gisement de type éluvial qui se forme sur la pente des reliefs immédiatement en dessous des veines en or à l'affleurement. Ce minéral peut migrer par l'effet de glissement par gravité de l'action du vent ou de l'eau. Ces agents libèrent les composants les plus légers et ne laissent sur place que les denses particules d'or et d'autres plus denses. Cas des conglomérats à galets de quartz et les paléo-placers-pyrétiqes, dont le gisement de Witwatersrand Basin en Afrique du Sud.

Les résultats de laboratoire attestent la présence des indices de minéralisation du platine (Pt) et du rhodium (Rh) dans la commune rurale de Lubero. Ces métaux natifs (Pt et Rh) avec la Os, Pd, Ir et Ru constituent la famille des platinoïdes. Dans la nature, les six éléments du groupe de platine sont peu abondants. Ces métaux sont rares, lourds, de prix élevés et très recherchés par l'industrie en raison de leurs propriétés particulières telles que le point de fusion et d'ébullition élevé, l'inaltérabilité aux acides, la bonne conductivité thermique, électrique et le pouvoir catalytique élevé même à très haute température.

Ces platinoïdes ont un comportement géochimique analogue à celui des éléments métalliques avec lesquels ils présentent le plus d'affinité (Fe, Co, Ni, Cr, Cu) pour former les sulfures et sulfosels complexes (Goldschmidt, 1970). Ils se présentent aussi à l'état natif ou sous forme d'alliage (Schuman, 1985).

Ces platinoïdes associés aux roches mafiques-ultramafiques ne cristallisent pas tous en même temps à partir du magma. Leur répartition s'échelonne sur un intervalle de température assez long. Les sulfures d'osmium et d'iridium sont les premiers à se former vers 1050-1100°C, ceux du platine et du palladium n'apparaissent que vers 700-800°C. Les paragenèses sont nombreuses ; elles conduisent à distinguer deux types de minéralisation. La première minéralisation apparaît au sommet de la zone ultramafique dans les dunites. Elle est associée à l'un des derniers niveaux de chromite. Elle comprend les sulfures d'Os, Ir, et Ru qui se forment avant la chromite ; les autres éléments Pt, Pd et Rh sont englobés en solution solide ou en fines inclusions dans les autres minéraux

(chromites, sulfures et/ou silicates). L'origine de la minéralisation est liée aux phénomènes de ségrégation magmatique tandis que la seconde minéralisation à platinoïdes plus tardive se place dans les premiers horizons de gabbro-norites. Elle est associée à une paragenèse sulfurée à métaux de base Ni-Cu (pyrrhotite pentlandite, chalcopryrite). Sa composition où prédominent les sulfures, sulfosels et alliages de Pt et Pd avec Os, Ir et Rh en moindre abondance que dans le cas est très complexe. De même origine que la précédente minéralisation, elle montre les évidences de remobilisations hydrothermales (Augé, 2005). L'exemple typique à travers le monde est le complexe de Bushveld en Afrique du Sud, Stillwater aux États-Unis et Great Dyke au Zimbabwe,

Du point de vue géochimique, l'or et les platinoïdes ont un comportement identique et ont une grande affinité avec le fer métallique (Goldschmidt, 1970). C'est pourquoi la pyrite, la chalcopryrite et leurs produits d'altération sont toujours présents dans les gisements aurifères et de platinoïdes (Kasekete, 2016).

Les corrélations entre Mn-Fe; Mn-Au ; Mn-Cu ; Fe-Cu ; Fe-Rh ; Fe-Au et Cu-Au ont la même charge ionique de deux. Dans la nature le fer, le platine, le nickel et le rhodium se retrouvent associés dans la nature à l'exemple de pentlandite (Ni, Fe)₉S₈, sperrylite (PtAs₂), cooperite (PtS) (Cabri et Laflamme, 1974).

La corrélation Au-Cu avec un rayon élevé de 89,9% mais l'or s'associe rarement au fer raison pour laquelle nous avons un pourcentage faible de son rayon ionique de 26,7 %. Selon la classification de Goldschmidt (1970) en annexe l'or est sidérophile tandis que le cuivre est chalcophile (Annexe 2).



5 Conclusion

Ce travail de recherche a permis de caractériser l'évolution pétrographique et géochimique des réservoirs magmatiques ainsi que les processus sédimentaires qui régissent la dynamique des métaux précieux dans le bassin versant de la rivière Makuku, situé dans la commune rurale de Lubero.

L'intégration des données de terrain et des analyses de laboratoire met en évidence trois conclusions majeures :

- Mise en évidence d'un potentiel polymétallique : Les analyses de laboratoire confirment la présence d'indices clairs de minéralisation en or (Au), mais révèlent surtout son association étroite avec des métaux hautement stratégiques de la famille des platinoïdes, spécifiquement le platine (Pt) et le rhodium (Rh).
- Dualité des contextes métallogéniques (Placers) : La distribution de l'or au sein du bassin versant répond à deux dynamiques distinctes. D'une part, un contrôle alluvial (échantillon L09Y), où les processus hydrauliques ont concentré les particules denses dans les zones de baisse de courant de la rivière. D'autre part, un contrôle éluvial (échantillons L13Y, L14Y et confluence Kighende), lié à des brèches tectoniques sur les pentes de reliefs, indiquant la proximité immédiate de veines aurifères primaires affleurantes.
- Affinités géochimiques et guides de prospection : Du point de vue métallogénique, l'or et les platinoïdes de Lubero suivent un comportement de type sidérophile à chalcophile selon la classification de Goldschmidt. La forte corrélation positive observée entre l'or et le cuivre (Au-Cu, 89,9 %), ainsi que l'association des platinoïdes aux sulfures de métaux de base (Fe, Ni, Cu), désignent la pyrite et la chalcopryrite comme d'excellents minéraux traceurs pour les futures campagnes de prospection.

En somme, le secteur de Lubero présente des caractéristiques géologiques comparables, à échelle réduite, aux grands systèmes de classe mondiale tels que le Witwatersrand Basin ou le Complexe de Bushveld en Afrique du Sud. L'identification conjointe de l'or, du platine et du rhodium ouvre des perspectives économiques majeures pour la région et justifie pleinement la mise en œuvre de travaux d'exploration minière plus approfondis afin d'évaluer le volume et la faisabilité économique de ces gisements.

REFERENCES

- [1] Amisi S et Kikwaya M., 2017. Etude cartographique, structurale et pétrographique du bassin versant de la rivière Makuku en commune Lubero/ Nord-Kivu. TFE, UOR, inédit,
- [2] Atupa O. M. et Neema N. K. (2015) : Étude géologique des formations de Luntukulu, secteur de Ndiba (Sud-Kivu) : approche pétrographique et gîtologique. Mémoire de fin d'étude, Université Officielle de Ruwenzori (UOR).
- [3] Augé, T. (2005). Les gisements de platinoïdes : une situation mondiale exceptionnelle. *Géologues*, n° 145, p. 77-81.
- [4] Cabri, L. J., & Laflamme, J. H. G. (1974). Rhodium, platinum, and gold alloys from the Stillwater Complex. *The Canadian Mineralogist*, 12(6), 399-403.
- [5] Carole C. (2006) : Approches pétrogéochimique et géomathématique de la cyclicité magmatique en contexte d'accrétion océanique : de la fusion partielle aux séquences de réalimentation/vidange des réservoirs crustaux. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- [6] De Putter, T., & Decrée, S. (2012). Le potentiel minier de la République démocratique du Congo (RDC), mythes et composantes d'une « dynamique minière ». Dans S. Marysse & J. Omasambo (dir.), *Conjonctures congolaises 2012 : Politique, secteur minier et gestion des ressources naturelles en RD Congo* (p. 47-62). L'Harmattan / Musée royal de l'Afrique centrale.
- [7] Direction du Service géologique du Zaïre (1981) : Notice explicative de la Carte géologique de reconnaissance au 1/200.000 de Lubero (S1/29), 48 p.
- [8] Dubreuil, P. (1974) : Initiation à l'analyse hydrologique. Eds. Masson et Cie et l'ORSTOM, 216 p.
- [9] Fernandez-Alonso M., Dewaele S., Baudet D., Laghmouch M., Lahogue P., Kampata D., Mupanda J.-F., Badosa T., Kalenga H., Onya F., Mawaya P., Mashagiro H., Kanda-Nkula V., Luamba M., Mpoyi J., Decree S., Lambert A. (2015) : Notice explicative de la carte géologique de la République Démocratique du Congo au 1/2.500.000.
- [10] Fernandez-Alonso M., Kampata D., Mupande J.-F., Dewaele S., Laghmouch M., Baudet D., Lahogue P., Badosa T., Kalenga H., Onya F., Mawaya P., Mwanza B., Mashagiro H., Kanda-Nkula V., Luamba M., Mpoyi J., Decrée S., Lambert A. (2017) : notice explicative de la Carte des occurrences minérales de la RDC au 1/2.500.000, Ministère des Mines (RDC) - Musée royal de l'Afrique centrale (Promines).
- [11] GADHOP, 2012. Etude socioéconomique sur l'exploitation artisanale dans le territoire de Lubero, régions de Kasugho, Katanga /buyinga et Manguredjipa, 161p.
- [12] Goldschmidt, V. M. (1970) : *Geochemistry*. Oxford University Press, Oxford.
- [13] Guilloux, L. et Méloux, J., (1987). Le platine : données économiques, description et approche typologique des principaux gisements, guides de recherche. BRGM, Direction des activités minières, département exploration.
- [14] Hammer, O., 2017. Reference manuel of PAleontological STatistics. Ed. NHMUO, 253 p.
- [15] Kakule M. J.-B. (2016) : Tiers secteur et développement participatif à Beni Lubero, RD Congo. Éditions universitaires européennes, 692 p.
- [16] Kakule V. J.- E. (2020) : Profil de la pauvreté dans les Territoires de Beni et de Lubero en République Démocratique du Congo et dynamiques locales de développement pour sa réduction. Centr. Interdisc. Grab.- Presse Univ. Graben.
- [17] Kakura, B., Bomboko, F. et Disu-Lemba, P., 2005. Monographie de la province du Nord-Kivu, Unité de Pilotage du Processus DSR, Kinshasa/Gombe, 155 p.
- [18] Kasekete D., Mukandala S.P. et Lulendi K., (2019), Caractérisation géométrique, hypsométrique et morphométrique du bassin versant topographique de la rivière Makuku (Lubero, RD Congo). *Revue des Carrefours Scientifiques*, N° 003, pp 265–285.
- [19] Kawa.G.N, Kabyemere.K.D, Kasekete.K.D, Kayembe.M.G & Odhipio A.D (2022) : *Geochimie Du Secteur De Vwanzanze Et Ses Environs (Nord-Kivu, R.D.Congo)*, Global Scientific Journals (GSJ), Volume 10, Issue 9, 1169-1179.
- [20] Laborde J.P. (2009). Éléments d'hydrologie de surface. Cours dispensés au Cycle ingénieur et Master Hydroprotech. École Polytechnique, Université de Nice - Sophia Antipolis, 192 p.
- [21] Maxwell, J. A. (1968). *Rock and Mineral Analysis*. Interscience Publishers, New York.
- [22] Mukandala S.P., (2017), Etude pétrographique et structurale des formations du territoire de Lubero : Luotu et Musienene, « Conservation et Société », UCNDK, Vol.1, N°009, MARS 2017, pages 66-87.

- [23] PNUD, 2009 - Province du Nord-Kivu : profil résumé pauvreté et conditions de vie des ménages, 20 p.
- [24] Rollinson H. R. (1993) : Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation éd. Longman Scientific & Technical.
- [25] Saint-Moulin L. de, 2011 - Atlas de l'organisation administrative de la République démocratique du Congo (2e édition revue et amplifiée). Kinshasa, CEPAS, 256 p.
- [26] Schuman, W. (1985) : Guides des pierres et minéraux (roches, gemmes et météorites) Delachaux et Niestle Neuchatel-Paris, 382 p.
- [27] Sivirihauma, V. (1984) : Problèmes de diffusion des innovations agricoles en milieu rural Nande (Zones de Beni et Lubero), in Zaïre-Afrique n°184, Avril 84.
- [28] Thirion C.,Wyvken Ph. (2015). Congo République démocratique. Bruxelles, Le petit futé, coll. Country guide, Éd. Neocity, 296 p.