

Lithological and structural characterization of Zani-Koddo in the Kibali supergroup: Implications for the control of gold mineralization

Serge Safari Madjabulu¹
Gabriel Makabu Kayembe²
Remy Kabona Kabagambe³
Desiré Katembo Kasekete⁴

^{1*} safariserline25@gmail.com

^{1,3}Université de Bunia, ²Université de Lubumbashi, ⁴Université Officielle de Rwenzori, ^{1,2,3,4}République Démocratique du Congo

<https://doi.org/10.51867/ajernet.7.2.98>

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation lithologique et structurale du gisement aurifère de Zani-Koddo, localisé dans le Supergroupe de Kibali, au nord-est de la République Démocratique du Congo. L'objectif principal est d'identifier les facteurs lithologiques et tectoniques contrôlant la mise en place de la minéralisation aurifère afin d'améliorer les stratégies d'exploration minière dans la région. La méthodologie adoptée repose sur des observations de terrain, l'échantillonnage représentatif de six axes principaux (Zani, Koddo, Gombili, Rwenzori, Luma et Gongoro); des analyses pétrographiques réalisées au microscope polarisant sur lames minces standardisées de 30 µm ainsi qu'une étude structurale basée sur les mesures de direction et de pendage traitées à l'aide des logiciels Dips et Win-Tensor. Les résultats révèlent une succession lithostratigraphique volcano-sédimentaire composée principalement de formations ferrifères rubanées (BIF), de schistes, d'amphibolites, d'argilites carbonatées et d'intrusions granitiques. Les structures dominantes présentent une orientation préférentielle NW-SE avec des pendages généralement compris entre 60° et 90°, traduisant un régime tectonique compressif favorable à la circulation des fluides hydrothermaux. Les observations microscopiques mettent en évidence une altération hydrothermale marquée par la séricitisation, la chloritisation et l'oxydation ferrugineuse. L'étude démontre que les BIF jouent à la fois un rôle mécanique et chimique dans la concentration de l'or, tandis que les zones de cisaillement constituent les principaux conduits de circulation des fluides minéralisateurs. Le modèle génétique proposé correspond à un gisement aurifère orogénique de type « BIF-hosted gold deposit », typique des terrains archéens du Kibalien. Cette étude apporte ainsi de nouvelles données litho-structurales utiles pour le ciblage des zones à fort potentiel aurifère dans la région de Zani-Koddo.

Mots clés : Ceinture de roches vertes, Formation de fer rubané (BIF), Kibali, Lithologie, Minéralisation aurifère, Structures tectoniques, Supergroupe, Zani-Koddo

ABSTRACT

This study focuses on the lithological and structural characterization of the Zani-Koddo gold deposit located within the Kibali Supergroup in northeastern Democratic Republic of Congo. The main objective is to identify the lithological and tectonic factors controlling gold mineralization in order to improve exploration strategies. The methodology combines field observations, representative sampling from six major zones, petrographic analyses under polarized light microscopy, and structural measurements processed using Dips and Win-Tensor software. Results reveal a volcano-sedimentary succession dominated by banded iron formations (BIF), schists, amphibolites, carbonate argillites and granitic intrusions. Structural data indicate a dominant NW-SE orientation associated with a compressional tectonic regime favorable to hydrothermal fluid circulation. Petrographic observations highlight intense hydrothermal alteration marked by sericitization, chloritization and ferruginous oxidation. The study demonstrates that BIF units act both as mechanical and chemical traps for gold precipitation, whereas shear zones constitute the main pathways for mineralizing fluids. The proposed genetic model corresponds to an orogenic "BIF-hosted gold deposit" typical of Archean Kibalian terrains. These results provide new litho-structural insights useful for gold exploration targeting in the Zani-Koddo area.

Keywords: BIF, Gold Mineralization, Greenstone Belt, Kibali, Lithology, Supergroup, Tectonic Structures, Zani-Koddo

I. INTRODUCTION

L'or occupe une place stratégique dans l'économie mondiale en raison de son importance dans les domaines financier, technologique et industriel. Depuis plusieurs décennies, la demande croissante en métaux précieux a conduit à une intensification des travaux de recherche géologique et minière dans les grands cratons archéens du monde, notamment ceux d'Afrique, d'Australie, du Canada et du Brésil. Les gisements aurifères associés aux ceintures de

roches vertes archéennes représentent une part importante de la production mondiale d'or, en raison de leur richesse et de leur potentiel économique considérable [10, 8]. Ces gisements sont généralement contrôlés par des facteurs lithologiques, structuraux et hydrothermaux qui favorisent la circulation des fluides minéralisateurs et la précipitation de l'or au sein des formations géologiques favorables.

En Afrique, plusieurs provinces géologiques archéennes sont reconnues pour leur potentiel aurifère exceptionnel, parmi lesquelles figurent le craton ouest-africain, le craton du Kaapvaal et le craton du Congo. Ce dernier abrite le Supergroupe de Kibali, considéré comme l'un des plus importants domaines aurifères d'Afrique centrale [6]. Les formations volcano-sédimentaires du Kibalien sont caractérisées par la présence de basaltes, schistes, quartzites, formations ferrifères rubanées (BIF) et intrusions granitoïdes, associés à une intense activité tectonique et hydrothermale favorable à la minéralisation aurifère [13, 15]. Les formations ferrifères rubanées jouent particulièrement un rôle majeur dans la concentration des métaux, car elles constituent des pièges chimiques capables de fixer l'or transporté par les fluides hydrothermaux [11].

En République Démocratique du Congo, la province aurifère du Nord-Est est largement dominée par les terrains du Kibalien, connus pour renfermer plusieurs gisements d'or économiquement exploitables, notamment dans les régions de Kilo-Moto, Durba, Gorumbwa et Kibali. Ces gisements sont généralement associés aux zones de cisaillement ductiles et fragiles qui contrôlent la mise en place des fluides hydrothermaux minéralisateurs [20, 19]. Les études géologiques réalisées dans cette région montrent que les minéralisations aurifères sont étroitement liées aux déformations tectoniques compressives ayant affecté les ceintures volcano-sédimentaires archéennes [5, 21]. Malgré l'importance économique de cette province métallogénique, plusieurs secteurs restent encore insuffisamment étudiés sur le plan lithologique, structural et pétrographique.

Le secteur de Zani-Koddo, situé dans le domaine du Supergroupe de Kibali, constitue l'une de ces zones présentant un intérêt géologique et minier considérable. Cette région est caractérisée par la présence de formations ferrifères rubanées, de roches volcano-sédimentaires et d'intrusions magmatiques affectées par plusieurs phases de déformation tectonique. Les observations de terrain montrent également le développement de nombreuses fractures, failles et zones de cisaillement, susceptibles d'avoir contrôlé la circulation des fluides hydrothermaux responsables de la minéralisation aurifère. Cependant, les relations entre les lithofaciès, les structures tectoniques et les altérations hydrothermales restent encore mal définies dans cette partie du Kibalien.

Dans cette perspective, la présente étude vise à réaliser une analyse intégrée des caractéristiques lithologiques, pétrographiques et structurales du secteur de Zani-Koddo afin de mieux comprendre les mécanismes de contrôle de la minéralisation aurifère. L'hypothèse principale de cette recherche repose sur le fait que les formations ferrifères rubanées constituent des horizons favorables à la concentration de l'or, tandis que les structures tectoniques, notamment les fractures et zones de cisaillement, assurent le contrôle structural de la circulation des fluides hydrothermaux minéralisateurs [10, 8]. Les résultats attendus contribueront à une meilleure compréhension géodynamique du gisement et permettront de proposer des critères fiables pouvant servir de guide pour les futurs travaux d'exploration minière dans le secteur de Zani-Koddo et dans l'ensemble du domaine kibalien.

1.1 Objectifs de la Recherche

- i. Caractériser les lithofaciès encaissant la minéralisation dans la zone d'étude ;
- ii. Identifier les structures contrôlant la minéralisation ;
- iii. Etablir le modèle génétique de ce gisement.

II. METHODOLOGIE

2.1 Description de la zone d'étude et cadre lithologique

La présente étude a été réalisée dans la zone de Zani-Koddo (Territoire de Mahagi, Province de l'Ituri, RDC) dans le Supergroupe de Kibali (Figure 1). Ce secteur est caractérisé par une association des roches volcano-sédimentaires typiques de roches de ceinture verte du Kibalien (Archéen supérieur). Cette lithologie comprend principalement des basaltes et andésites métamorphisées, des formations de BIF (Itabirite), des schistes ainsi que des argilites carbonatées [13]. L'accessibilité par l'axe Bunia-Djalasiga a permis l'observation et description directes des affleurements sur terrain et favorisé le prélèvement des échantillons et des mesures structurales.

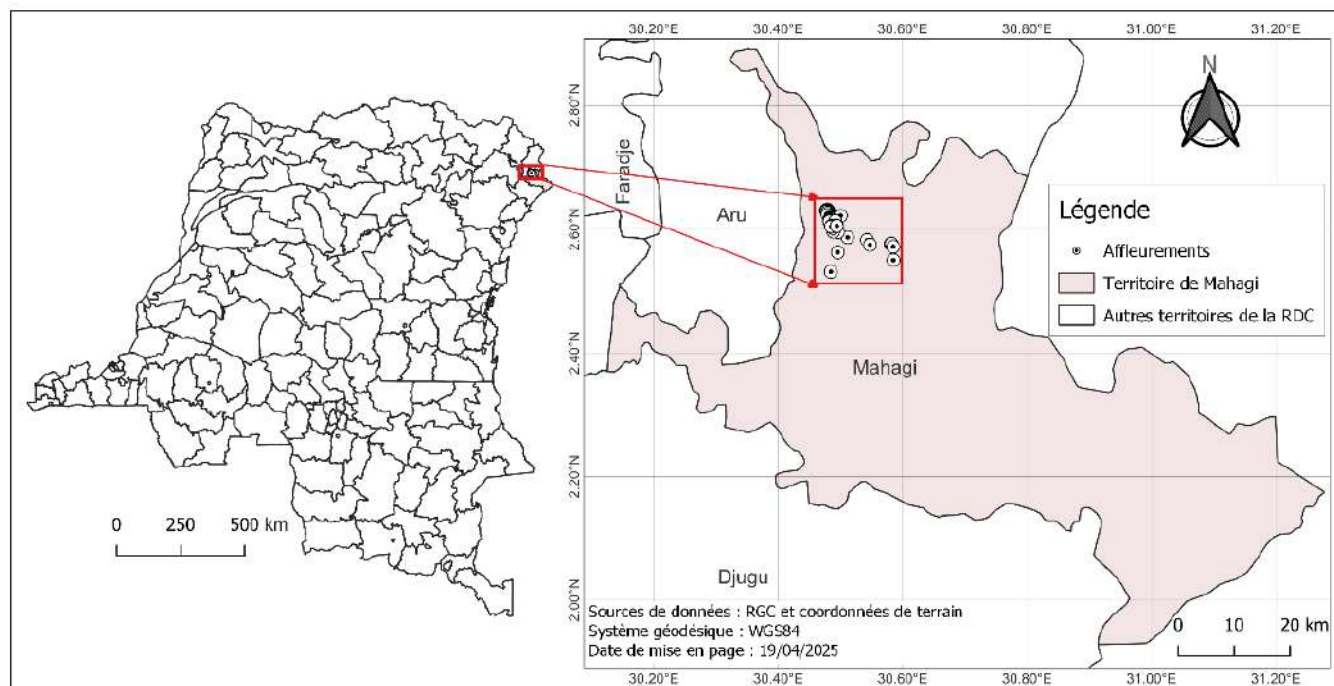


Figure 1
Milieu d'étude

2.2 Echantillonnage et travaux de terrain

Les travaux de terrain ont été réalisés suivant six axes principaux (Zani centre, Koddo, Gombili, Rwenzori, Luma et Gongoro) couvrant l'ensemble du secteur étudié afin d'assurer une bonne représentativité lithologique et structurale. Sur terrain, les techniques utilisées pour la récolte des données sont notamment l'observation et le levé géologique au marteau. La prospection géologique au marteau se fait par l'observation directe sur terrain à la faveur des affleurements accessibles en vue d'y repérer géométriquement des éléments structuraux planaires et linéaires, mais aussi prélever des échantillons, suivi de leur prétraitement sur terrain. Au total, douze échantillons représentatifs ont été collectés en fonction de la diversité des faciès, de l'état des affleurements et des contacts lithologiques observés. Chaque échantillon a fait l'objet d'une description macroscopique détaillée comprenant la texture, la minéralogie apparente, la couleur, la structure et le degré d'altération. Sur le terrain, la nature et la composition minéralogique de roches par observation en loupe (grossissement x10) ont été déterminées. La prise des mesures structurales (direction, pendage) à l'aide d'une boussole Brunton pour l'analyse structurale suivant la méthode de la main droite [7]. En effet, six de douze échantillons représentant un échantillon par axe de roches prélevés ont été numérotés au marqueur indélébiles avec comme étiquetage ZKS (Safari à Zani-Koddo) suivi d'un numéro, emballés chacun dans le sachet en plastique et mis tous dans le sac à raphia dans lequel ils ont été acheminés au laboratoire de l'Université de Lubumbashi pour les analyses pétrographiques.

2.3 Préparation et analyses pétrographiques

Pour mieux appréhender la nature lithologique, les échantillons représentatifs en l'occurrence ZKS 001, ZKS 002, ZKS 005, ZKS 007, ZKS 008 et ZKS 012 ont fait l'objet de la sélection pour confectionner des lames minces et polies standardisées. Les analyses pétrographiques ont été effectuées sur des lames minces standardisées de 30 μm observées au microscope polarisant en lumière naturelle et analysée (LPA). Les minéraux métalliques ont été étudiés en lumière réfléchie afin d'identifier les phases ferrifères et sulfurées associées à la minéralisation [12].

2.4 Analyses cartographiques et structurales

Les logiciels QGIS (version 2.8.7) et Excel 2013 ont été utilisés en tenant compte de types de données. Les données GPS du type Garmin 64s ont été chargées dans le projet QGIS pour l'élaboration des cartes de localisation du secteur d'étude par rapport au territoire de Mahagi et géologique de Zani-Koddo. Les données structurales (direction et pendage des fractures, schistosités et filons) ont été traitées à l'aide des logiciels Dips et Win-Tensor afin de déterminer les orientations préférentielles, les familles structurales dominantes ainsi que le régime tectonique responsable de la déformation. [22, 24]. Ces mesures ont été introduites dans les logiciels sous forme de tableaux numériques. Le logiciel Dips nous a permis de générer le stéréogramme et les rosaces afin d'identifier les orientations préférentielles des structures géologiques et les principales familles de fractures. Par contre le logiciel Win-tensor a

permis de calculer les tenseurs de contraintes et déterminer le régime de contrainte ainsi que l'orientation des contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 . L'intégration des données lithologiques et structurales a permis de proposer un modèle génétique cohérent du gisement.

2.5 Approche interprétative des données

L'interprétation des données microscopiques et structurales repose sur l'analyse conjointe des textures minéralogiques et des structures tectoniques dans le souci de comprendre le modèle de mise en place de la minéralisation. A l'échelle microscopique, l'identification des assemblages minéraux, des relations texturales (inclusions, recristallisation et altérations hydrothermales) et des phases de déformation permet de retracer l'évolution des fluides minéralisateurs et leurs interactions avec les roches encaissantes. A l'échelle structurale, l'étude des failles, fractures, plis et zones de cisaillements met en évidence les principaux conduits de circulation des fluides et les pièges favorables à la précipitation des minéraux métalliques. L'intégration de ces deux approches permet ainsi de mieux définir le contrôle structural et lithologique de la minéralisation en identifiant les zones à fort potentiel et en reconstituant le contexte géodynamique de formation du gisement [9, 10, 18].

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Présentation des Résultats

3.1.1 Lithostratigraphie et distribution lithologique

Les résultats montrent que la zone de Zani-Koddo est caractérisée par une succession volcano-sédimentaire archéenne dominée par des BIF, des schistes, des amphibolites et des intrusions granitiques. Les BIF et les schistes représentent les principaux encaissants de la minéralisation aurifère [13].

3.1.2 Descriptions lithologiques par axe

Les descriptions des faciès des échantillons ont permis de dégager les particularités suivantes : Axe de Zani : dominée par des roches finement foliées à schistosité bien développée, de teinte grisâtre à brunâtre, traduisant une forte déformation. On note la présence des lentilles plus compétentes de nature quartzitique ou ferrifère, intercalées dans une matrice schisteuse (Plaque 1). Cette structuration fait penser à un contrôle structural important favorable à la circulation des fluides et à la mise en place de la minéralisation.



Plaque 1

Faciès quartzitique ferrifère

Axe de Koddo : formation de teinte gris-clair à blanchâtre avec une texture fine à cryptocristalline. Sa compacité et sa résistance indiquent une roche bien consolidée (Plaque 2). Cette roche montre un type des unités encaissantes associées aux minéralisations aurifères dans les terrains de Super groupe de Kibali.



Plaque 2

Faciès cryptocristallin

Axe de Gombili : prédominance de formation à texture massive légèrement foliée de couleur brunâtre à ocre fortement altérée en surface présentant une zone enrichie en oxydes de fer montrant une altération ferrugineuse marquée (Plaque 3). La dite altération associée à des circulations hydrothermales peut indiquer un contexte favorable à la minéralisation aurifère.



Plaque 3

Faciès schisteux

Axe de Rwenzori : dominé par des formations à structure allongée et cylindrique de teinte brunâtre recoupées par de veines minéralisées (Plaque 4).



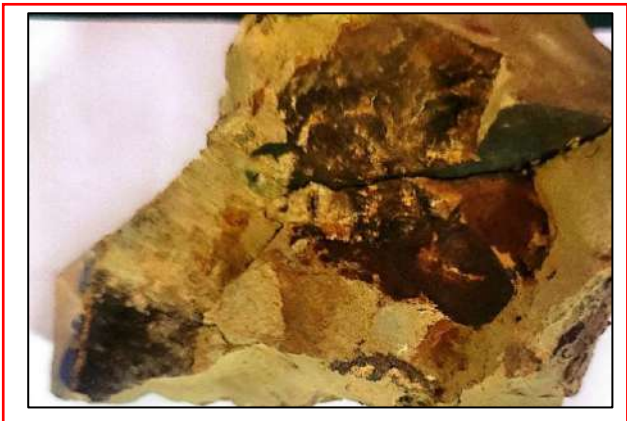
Plaque 4

Faciès allongé et brunâtre

Axe de Luma : prédominance de paroi rocheuse massive à grains grossiers avec une surface rugueuse présentant une patine d'altération grisâtre faisant référence à une roche plutonique (Plaque 5).

**Plaque 5***Faciès plutonique*

Axe de Gongoro : marqué par la présence de formations à texture terreuse à poudreuse par endroit avec une dominance de couleur jaune soufre à ocre (Plaque 6). Cette teinte indique la présence massive des minéraux d'altération.

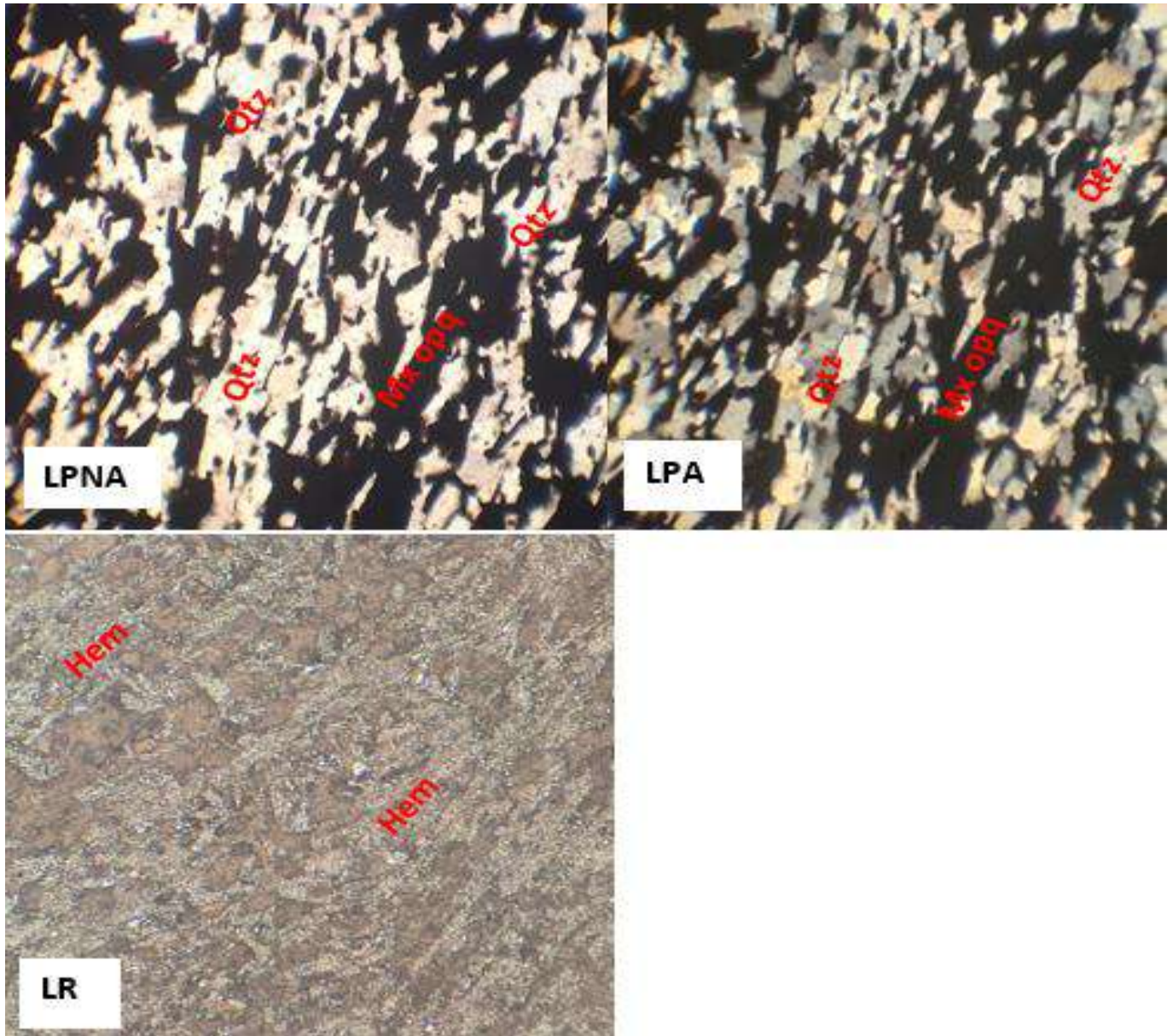
**Plaque 6***Faciès détritique à argile*

Les différentes plaques présentées dans l'étude mettent en évidence une grande diversité lithologique et structurale caractéristique des terrains volcano-sédimentaires archéens du Super groupe de Kibali. Les observations de terrain montrent principalement des faciès ferrifères quartziques, des formations schisteuses, des unités cryptocristallines, des roches plutoniques ainsi que des formations argilo-détritiques. Cette diversité témoigne d'une évolution géologique complexe marquée par des épisodes de volcanisme, de sédimentation et de déformation tectonique.

Les plaques des axes de Zani, Koddo et de Gombili révèlent des roches fortement foliées indiquant l'influence importante des phénomènes tectoniques et hydrothermaux. Les niveaux ferrifères quartzitiques observés constituent des horizons favorables à la concentration de l'or grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Les faciès schisteux et les structures foliées traduisent des conditions de déformation intense liées aux zones de cisaillement. Les observations faites sur les axes de Rwenzori et de Luma permettent de découvrir des structures allongées, des veines minéralisées et des roches plutoniques massives indiquant une interaction entre les intrusions magmatiques et les fluides hydrothermaux. Ces intrusions ont probablement joué un rôle thermique majeur dans la circulation des fluides minéralisateurs. Les formations argilo-carbonatées et les faciès fortement oxydés observés à Gongoro témoignent d'une altération hydrothermale importante marquée par la présence d'oxydes de fer. L'ensemble de ces plaques confirme ainsi que la minéralisation aurifère de Zani-Koddo est étroitement contrôlée par des interactions entre lithologie, fracturation et circulation des fluides hydrothermaux.

3.1.3 Analyses microscopiques des formations

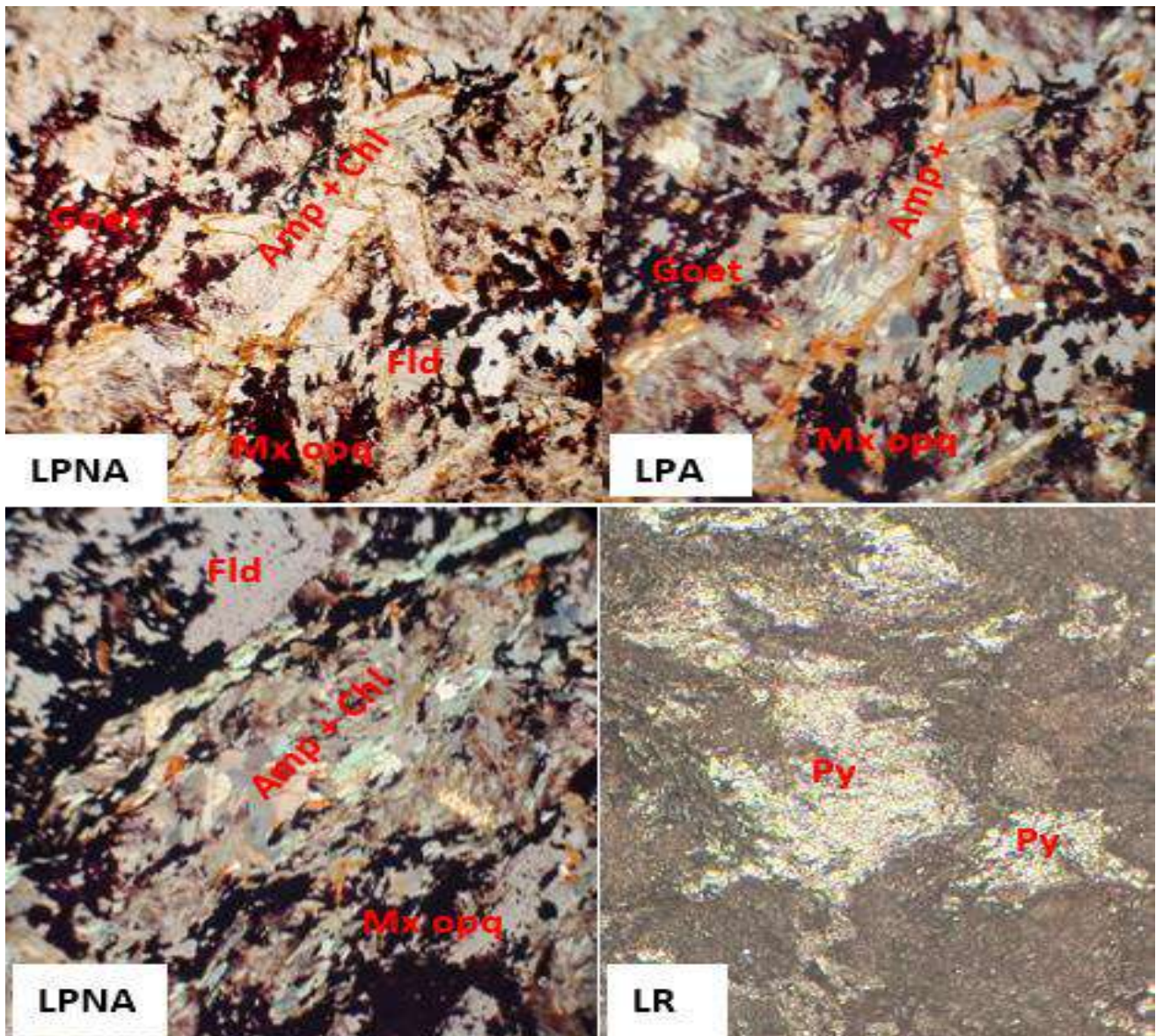
ZKS 001 : Roche principalement composée de cristaux de quartz incolore, orientés suivant une direction préférentielle. En LPA, ils polarisent dans les teintes gris clair. Signalons que ces cristaux de quartz sont cimentés par les oxydes de fer sombres dont la nature sera déterminée en lumière réfléchie (Plaque 7). Il s'agit d'un quartzite ferrugineux. En lumière réfléchie, cette roche présente l'hématite qui se développe en cristaux lamellaires de couleur gris blanc.



Plaque 7

Microphotographie d'une Itabirite

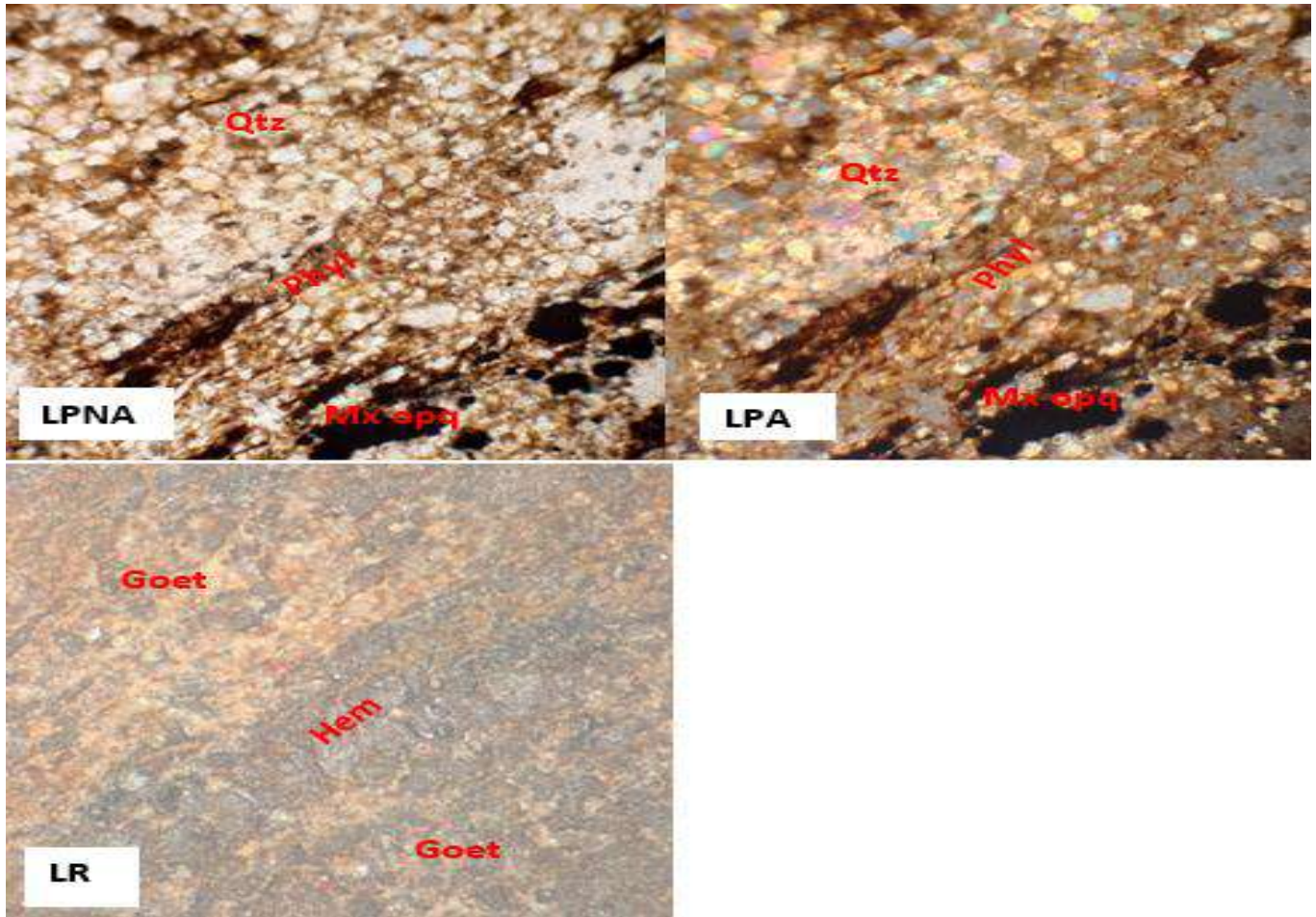
ZKS 002 : Cette roche est composée des amphiboles qui s'altèrent en chlorite incolore à verdâtre et en oxydes de fer brunâtres (goethite). Elle est composée également des feldspaths blanchâtres très altérés. On y observe aussi des minéraux sombres donc opaques, qui seront mieux identifiés au microscope métallographique opérant en lumière réfléchie. Il s'agit d'une amphibolite. En lumière réfléchie (LR), elle présente la pyrite caractérisée par la couleur jaune blanc et la goethite brunâtre (Plaque 8).



Plaques 8

Microphotographie d'une amphibolite

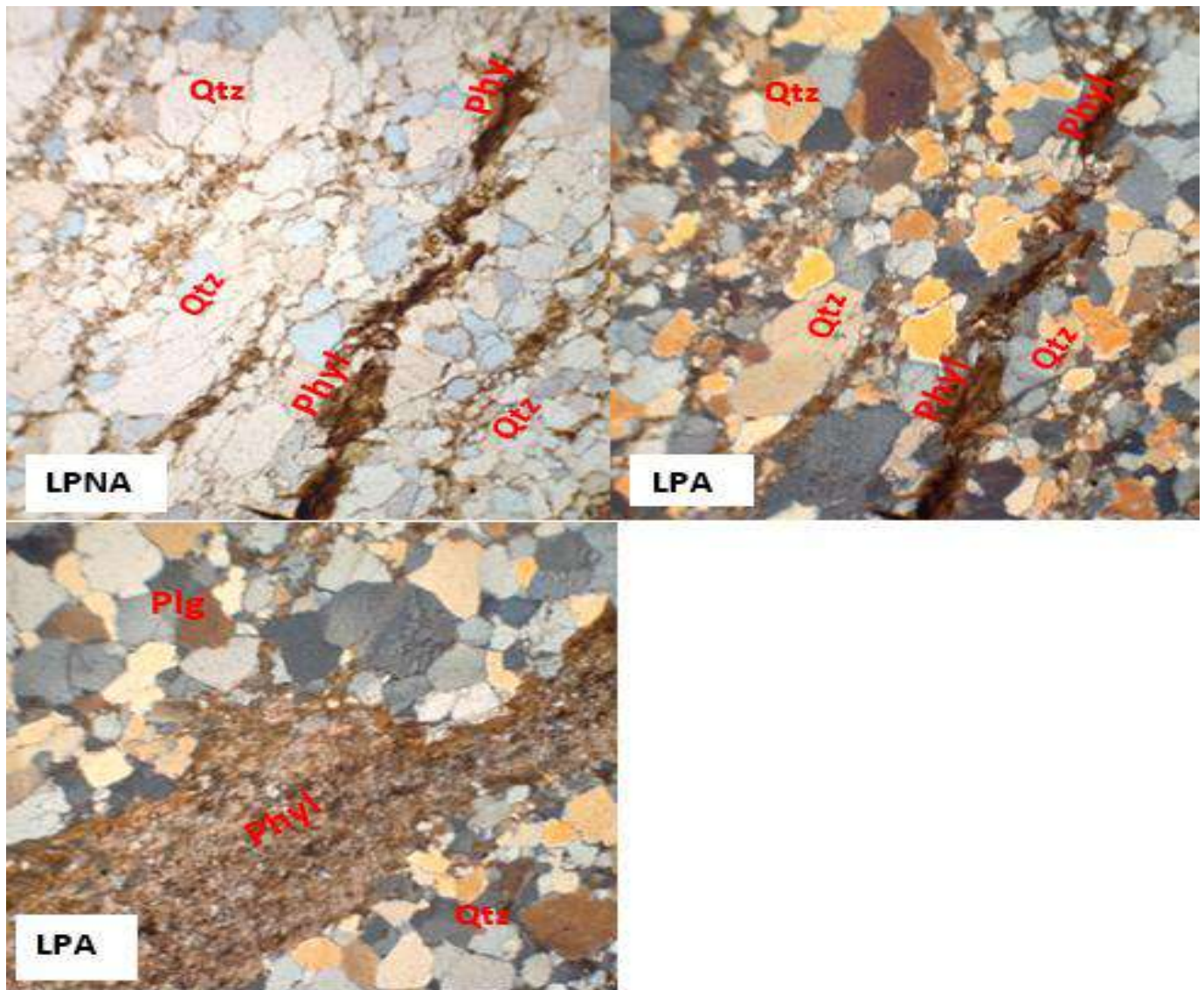
ZKS 003 : Cette roche est composée des minéraux phylliteux incolores à brunâtres de forme aciculaire très fine avec un relief moyen et sont orientés suivant une direction préférentielle. En LPA, ils polarisent dans les teintes vives. On y observe aussi des cristaux sub-arrondis de quartz incolore, disposés en mosaïque sous forme des lits orientés suivant la direction des minéraux phylliteux. Il s'agit d'un schiste (quartzophyllade). En lumière réfléchie, cette roche présente la goethite brune en abondance dans laquelle sont inclus les cristaux d'hématite gris blanc. Ce dernier minéral de fer est donc antérieur au précédent (Plaques 9).



Plaque 9

Microphotographie d'un quartzophyllade

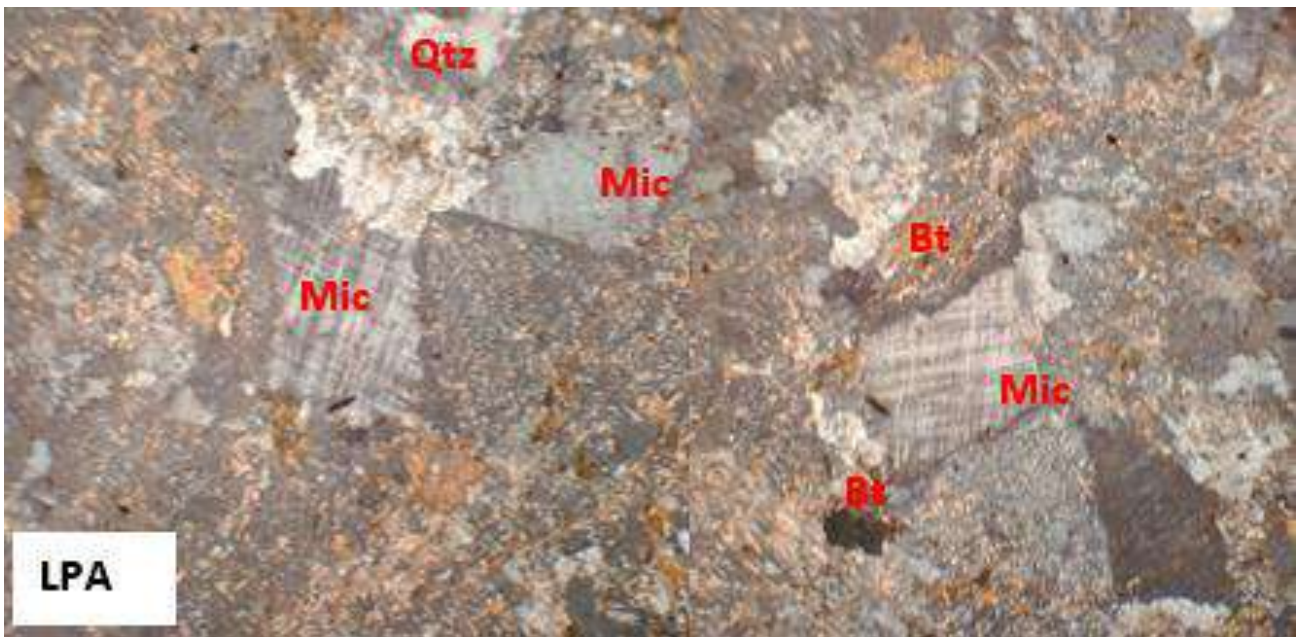
ZKS 004 : Cette roche est principalement composée des cristaux de quartz incolore de forme sub-arrondie et de plagioclases, disposés en mosaïque sous forme des lits orientés suivant la direction des minéraux phylliteux (séricite). Ces derniers sont incolores à brunâtres de forme lamellaire avec un relief moyen et sont orientés suivant une direction préférentielle. En LPA, ils polarisent dans les teintes vives (Plaque 10). Il s'agit d'un séricitoschiste.



Plaque 10

Microphotographie d'un séricitoschiste

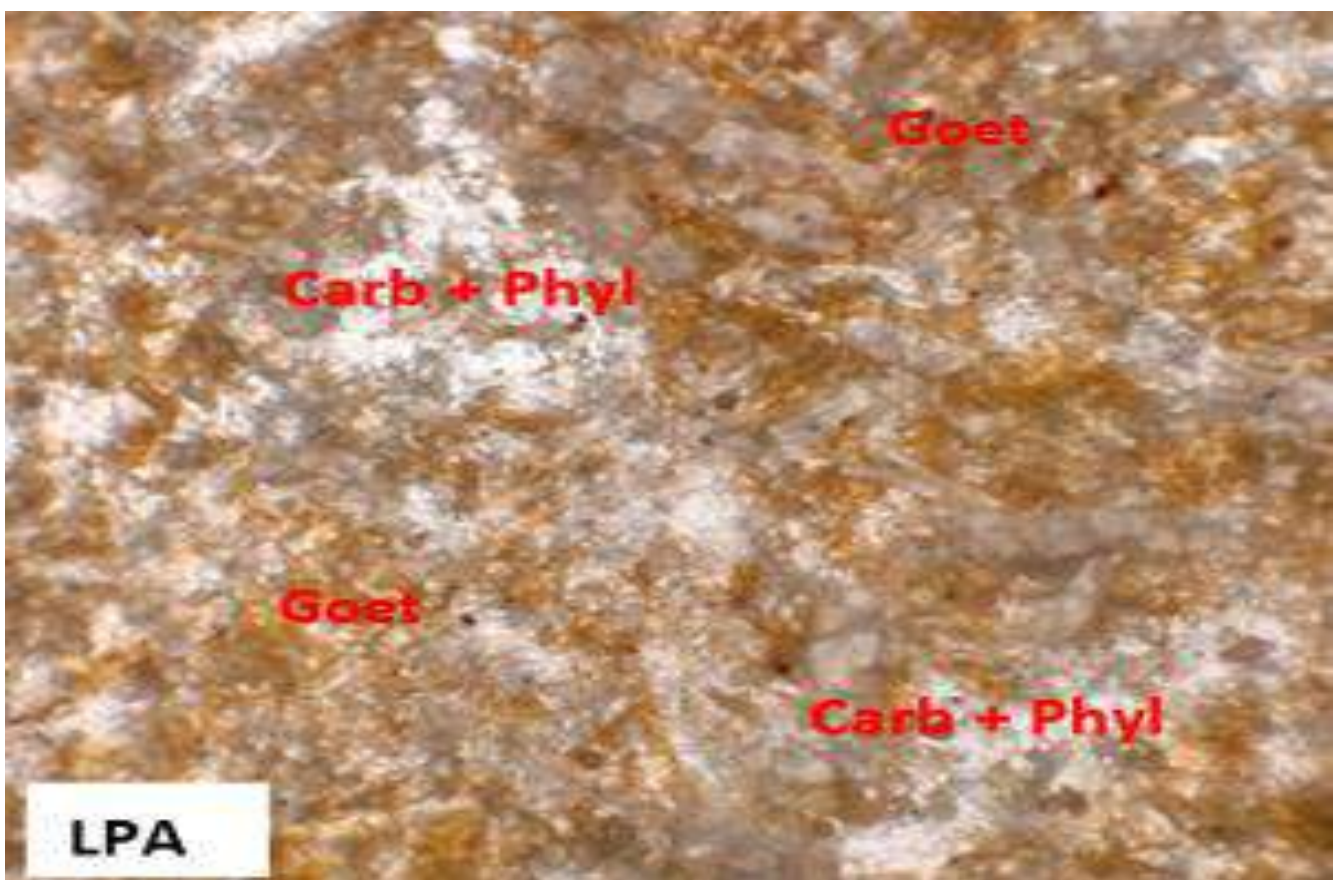
ZKS 005 : Roche composée de cristaux de quartz incolore, clair, de forme xénomorphe et de feldspaths (microcline) incolores avec aspect trouble, de forme prismatique aplatie, avec un relief faible. En LPA, les feldspaths polarisent dans les teintes gris clair et présentent des macles polysynthétiques avec moirage. On y observe aussi la biotite brune à vert pâle, de forme lamellaire, en voie de la chloritisation (Plaque 11). Il s'agit d'un granite.



Plaques 11

Microphotographie d'un granite

ZKS 006 : Roche très altérée composée d'une matrice argilo-carbonatée de coloration gris-blanchâtre imprégnée d'oxydes de fer brun orangé (goethite). Il s'agirait d'une roche argilo-carbonatée (argilite carbonatée) composée des carbonates et des phyllites (Plaques 12).



Plaques 12

Microphotographie d'une argilite carbonatée

Les observations microscopiques révèlent une altération hydrothermale importante caractérisée par la séricitisation, la chloritisation et l'oxydation ferrugineuse. La présence d'hématite, de goethite et de pyrite témoigne

d'une activité hydrothermale intense liée à la circulation des fluides minéralisateurs. Les quartzites ferrugineux présentent une abondance d'oxydes de fer confirmant le rôle des formations ferrifères rubanées (BIF) comme pièges chimiques favorables à la précipitation de l'or. Les amphibolites et séricito-schistes montrent des phénomènes de chloritisation et de séricitisation traduisant une circulation intense des fluides hydrothermaux minéralisateurs. La présence de la pyrite associée aux altérations ferrugineuses constitue aussi un indice important de minéralisation aurifère. Les orientations préférentielles des minéraux et les textures recristallisées observées au microscope indiquent que les fluides ont circulé le long des zones déformées et des structures tectoniques. Ainsi, les données microscopiques confirment que le contrôle de la minéralisation à Zani-Koddo est à la fois lithologique par la présence des Banded Iron Formations (BIF) et des roches favorables, et structural grâce aux fractures et zones de cisaillement qui ont servi des conduits aux fluides aurifères.

3.1.4 Analyse cartographique

La carte géologique de notre secteur d'étude (Figure 2) met en évidence un contexte géologique complexe indiquant un terrain précambrien ancien et identifiant les formations suivantes : une structure centrale importante de BIF (Banded Iron Formation) ; une intrusion magmatique en contact avec les formations de fer et des grès ou argilites ; une extension de formation sédimentaire en l'occurrence les grès ou argilites vers le sud qui pourraient représenter une couverture sédimentaire plus récente et enfin un socle granitique.

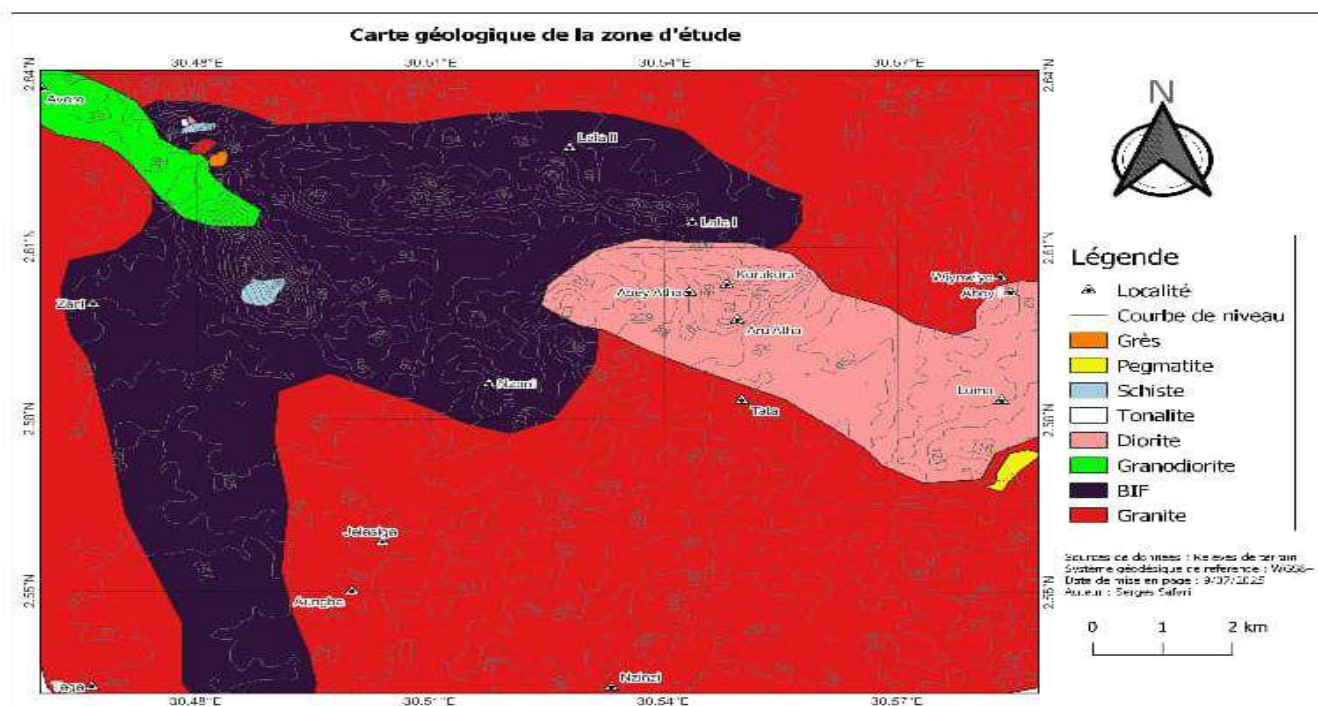


Figure 2

Carte géologique interprétative de Zani-Koddo illustrant les formations du Kibalien

3.1.5 Analyse structurale

La lithologie de gisement comprend la veine de quartz, les argilites carbonatées, les quartzites ferrugineux, les amphibolites et les schistes ou quartzo-phyllades et, par endroit, des intrusions magmatiques. Les filons de quartz aurifères exploités sont encaissés dans les roches de la ceinture verte. Leur orientation préférentielle est NW-SE, bien qu'à certains endroits, les filons et roches de ceinture verte soient orientés NE-SW et E-W (Figure 3).

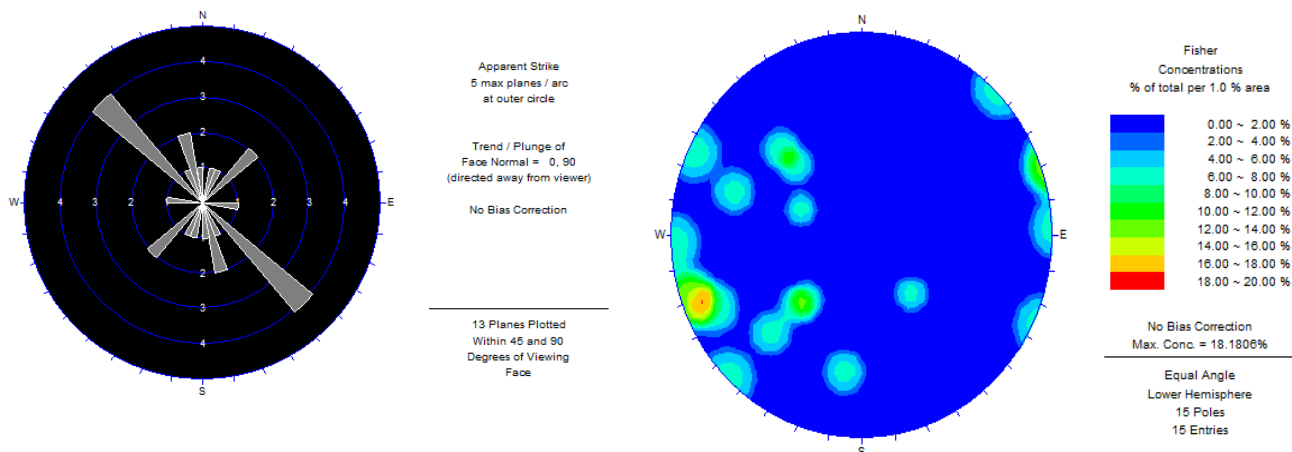


Figure 3

Orientation préférentielle de gisements exploités à Zani-Koddo (Rosace de fréquences à gauche) et pôles de plans du milieu d'étude (à droite)

À partir de la figure 3 ci-haut, nous constatons que la majorité des plans (5) ont une direction NW-SE (pôle à SW). D'autres orientations moins fréquentes mais distinctes sont également visibles notamment une famille des plans orientés presque verticalement N-S (pôle situé à l'est et l'ouest) avec une inclinaison proche de 80° à 90°, quelques plans orientés NE-SW (pôle à NW) et la dernière catégorie avec une proportion négligeable orientée E-W (pôle au Sud). Quant au régime de la déformation et orientation des contraintes au sein de gisement de Zani-Koddo, la figure 4 illustre bien que le régime générant toutes ces fractures est compressif.

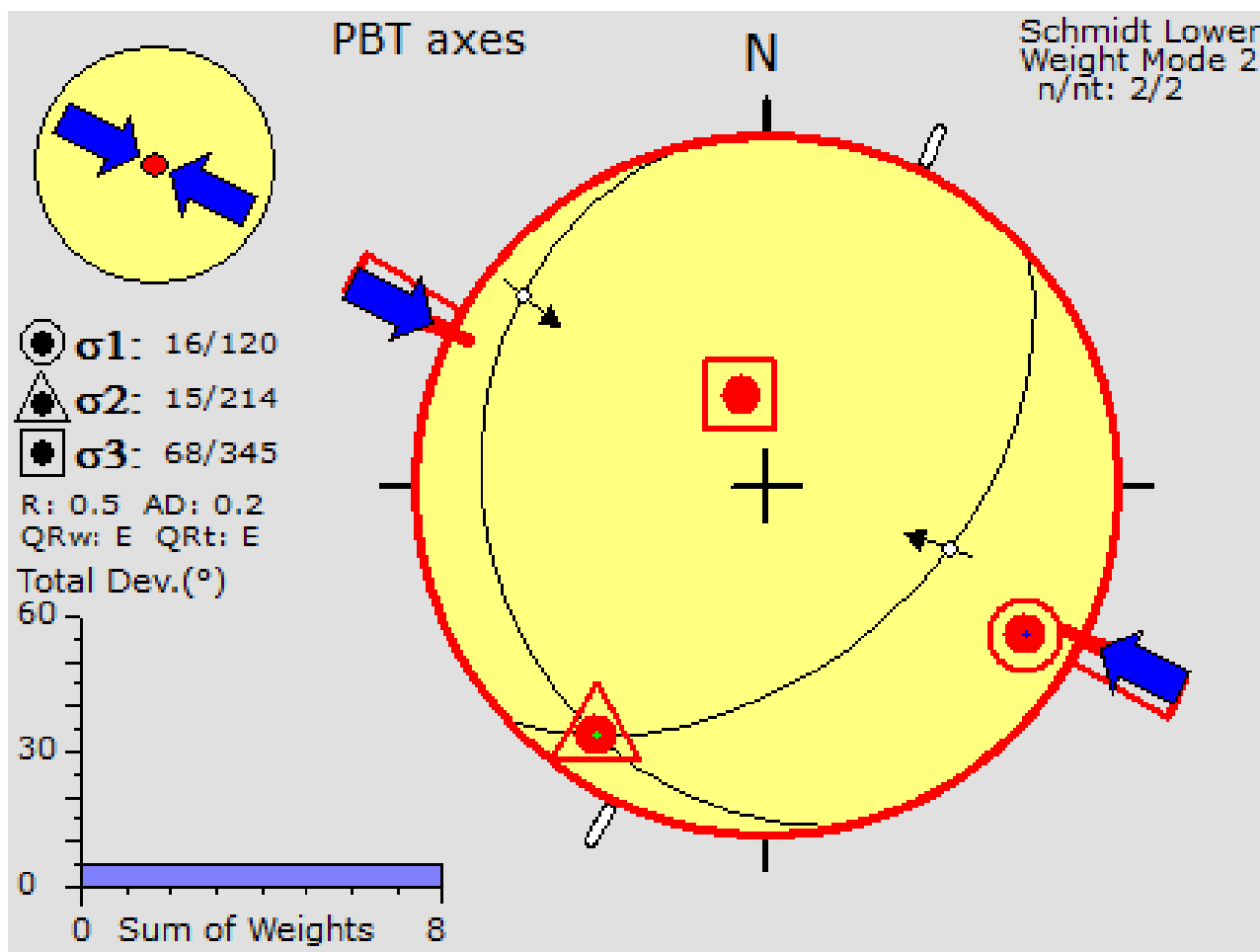


Figure 4

Tenseur de contrainte des plans de gisement de Zani-Koddo

Ce tenseur de contrainte définit l'orientation de trois contraintes principales qui s'exercent dans la zone d'étude. La contrainte principale σ_1 est compressive maximale. Elle est située à N120°E/16°SE. La contrainte intermédiaire σ_2 est située à N214°E/15°SSW alors que la contrainte minimale σ_3 indique un mouvement extensif et est située à N345°E/68°NNW ; son fort plongement indique que cette contrainte est presque verticale. La contrainte σ_2 intermédiaire se situe à mi-chemin entre la contrainte principale σ_1 et la contrainte minimale σ_3 . L'analyse structurale met en évidence une orientation dominante NW-SE des fractures et zones de cisaillement. Les intersections entre fractures NW-SE et NE-SW ainsi que les charnières de plis représentent des zones privilégiées pour la concentration de l'or à Zani-Koddo. Ces structures ont favorisé la mise en place des veines quartzifères aurifères encaissées dans les formations ferrifères rubanées (BIF) et les schistes. La minéralisation aurifère de Zani-Koddo est fortement contrôlée par les interactions entre fracturation, cisaillement et lithologie favorable. Le régime tectonique compressif identifié confirme le caractère orogénique du gisement étudié.

3.2 Discussion

3.2.1 Lithologie des encaissants et environnement de formation

La présence des roches de ceinture verte dans notre secteur d'étude montre une diversité métamorphique qui indique un faciès allant des schistes verts aux amphibolites [10] soulignent que la présence des séricito-schistes dans une zone signifie la présence d'une altération hydrothermale majeure liée à la mise en place de l'or. Donc la séricitisation dans notre milieu d'étude confirme le passage des fluides minéralisateurs. Les intrusions TTG (Tonalite-Trondhémite-Granodiorite) sont souvent les moteurs thermiques de la circulation des fluides aurifères [14]. La présence massive des BIF (Banded Iron Formations) à Zani-Koddo permet de définir leur double rôle : leur premier rôle est mécanique c'est-à-dire ces formations étant rigides, elles favorisent la fracturation ; leur second rôle est chimique autrement dit que les BIF agissent comme un piège à fer. La réaction entre le soufre des fluides et le fer des BIF fait précipiter la pyrite et l'or. La présence des carbonates dans les argilites de Zani-Koddo n'est pas inutile ; les carbonates sont souvent associés aux bordures de zones de cisaillement aurifères, il s'agit là de l'altération hydrothermale. Le gisement minier de Zani-Koddo se retrouve dans le contexte orogénique de ceinture de roches vertes archéennes [2].

3.2.2 Contrôle de la minéralisation aurifère

En lisant [14], [17] et [23] sur leurs travaux en rapport avec la structurale du Kibalien, nous notons que nos fractures identifiées à Zani-Koddo ne sont pas des cassures aléatoires mais bien au contraire elles sont importantes dans la compréhension du contexte géo structural de la minéralisation aurifère du gisement étudié. Notons les faits suivants en rapport avec le rôle des fractures comme chemins de circulation des fluides minéralisateurs : la perméabilité secondaire c'est-à-dire la roche encaissante est initialement imperméable ; les fractures qui affectent ces dernières créent la porosité nécessaire pour que les fluides hydrothermaux riches en or circulent. Le second fait est la zone de cisaillement (shear-zone) : ici, la minéralisation à Zani-Koddo est intrinsèquement liée à la zone de cisaillement de Zani. Les grandes fractures répertoriées sont souvent des traces de surface de ces couloirs de déformations ductile-cassante. Notons que la minéralisation aurifère ne se retrouve pas partout le long des fractures mais à des endroits spécifiques qui sont : premièrement les zones d'intersection des fractures : il s'agit des endroits où les fractures se croisent ; ces points sont des zones de haute pression de fluides où l'or se dépose massivement à Zani-Koddo. C'est le cas des zones à fractures NW-SE interceptées par des fractures NE-SW. En second lieu les charnières de plis : généralement, les fractures se concentrent souvent au sommet des plis (anticlinaux). A Zani-Koddo, les formations rubanées de fer sont plissées, et les fractures de tension retrouvées dans ces plis servent de réceptacles aux veines de quartz aurifère [1, 3]. La présence abondante de BIF couplée à la fracturation (cisaillement) fait du gisement minier de Zani-Koddo un site à fort contrôle litho-structural conformément au modèle de minéralisation de type Kibali [2, 4].

3.2.3 Modèle de mise en place de la minéralisation aurifère

La minéralisation aurifère dans la zone d'étude est mise en place suite à des fractures polyphasées. Il en résulte la définition d'un modèle structural robuste, avec une minéralisation liée à un système de failles de chevauchement qui a été perturbé par des failles verticales tardives [23]. Les travaux réalisés dans la province minière de Kilo-Moto par [2, 13, 16, 24] ont proposé trois modèles principaux de minéralisation aurifère : Modèle BIF-hosted orogénique ; Modèle filonien quartz-carbonate ; et Modèle hydrothermal tardif lié aux intrusions granitiques. A Zani-Koddo, observant nos données, le modèle de mise en place de la minéralisation aurifère est le premier c'est-à-dire le « Modèle BIF-hosted orogénique » pour les raisons suivantes : l'or est associé au fer des itabirites ; les éléments incompatibles ne sont pas corrélés avec l'or ; et enfin la minéralisation est fortement associée à la structurale.

La genèse du gisement aurifère de Zani-Koddo résulte d'une interaction étroite entre les facteurs lithologiques, structuraux et géochimiques au sein des terrains archéens du Super groupe de Kibali. Sur le plan lithologique, la présence dominante des formations ferrifères rubanées (BIF), des schistes, amphibolites et intrusions

granitiques constitue un environnement favorable à la concentration de l'or. Les BIF jouent un double rôle : mécanique en favorisant la fracturation et chimique en servant des pièges à fer capables de provoquer la précipitation de l'or lors des interactions avec les fluides hydrothermaux sulfurés [9, 10, 12].

Sur le plan structural, les zones de cisaillement, fractures et plis orientés principalement NW-SE ont constitué les principaux conduits de la circulation des fluides minéralisateurs. Les interactions de fractures et les charnières de plis représentent des zones de faiblesse où les fluides hydrothermaux se sont concentrés, favorisant le dépôt des minéraux aurifères dans les veines de quartz et les horizons ferrifères [1, 3, 18, 23, 24].

Les observations pétrographiques et métallographiques montrent une altération hydrothermale marquée par la séricitisation, la chloritisation, la carbonatation et l'oxydation ferrugineuse, témoignant d'une circulation intense des fluides minéralisateurs. La présence d'hématite, de goethite et de pyrite indique des réactions chimiques entre les fluides et les roches encaissantes ayant conduit à la précipitation de l'or [3, 23]. L'ensemble de ces observations ont permis de proposer un modèle de gisement aurifère orogénique de type « BIF-hosted gold deposit », dans lequel la déformation tectonique, les circulations hydrothermales et les propriétés chimiques des formations ferrifères ont agi conjointement pour contrôler la mise en place de la minéralisation aurifère à Zani-Koddo.

IV. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

4.1 Conclusion

La présente étude consacrée à la caractérisation lithologique et structurale du secteur de Zani-Koddo dans le Supergroupe de Kibali a permis de mettre en évidence le rôle déterminant des facteurs lithologiques et tectoniques dans le contrôle de la minéralisation aurifère. L'analyse lithostratigraphique révèle une succession volcano-sédimentaire typique des ceintures de roches vertes archéennes, dominée par des formations ferrifères rubanées (BIF), des schistes, des amphibolites, des argilites carbonatées ainsi que des intrusions granitiques. Ces unités lithologiques jouent un rôle contrasté mais complémentaire, les BIF et les schistes constituant des horizons particulièrement favorables à la concentration de l'or en raison de leurs propriétés mécaniques et chimiques. Les observations pétrographiques confirment l'existence d'une altération hydrothermale marquée notamment par la séricitisation, la chloritisation et l'oxydation ferrugineuse, les fluides minéralisateurs et les roches encaissantes. Ces transformations minéralogiques traduisent des conditions physico-chimiques propices à la précipitation de l'or. Sur le plan structural, l'étude met en évidence un réseau de fractures et de zones de cisaillement dominé par des directions préférentielles NW-SE, associées à un régime tectonique compressif.

Ces structures jouent un rôle essentiel en tant que conduits de circulation des fluides hydrothermaux et en tant que pièges structuraux, notamment aux intersections de fractures et dans les zones de charnières de plis. L'intégration de données lithologiques et structurales permet de proposer un modèle génétique cohérent de type gisement aurifère orogénique encaissé dans les BIF (BIF-hosted gold deposit). Dans ce modèle, la minéralisation est étroitement liée aux processus de déformation polyphasée, à la circulation de fluides hydrothermaux et à l'interaction chimique entre ces fluides et les formations ferrifères. Le gisement de Zani-Koddo apparaît donc comme un système fortement contrôlé par les interactions litho-structurales où la combinaison des BIF, des zones de cisaillement et des intrusions magmatiques constitue un cadre géologique particulièrement favorable à la minéralisation aurifère. Ces résultats apportent des éléments essentiels pour l'amélioration des stratégies d'exploration minière dans la région, en mettant en évidence l'importance du ciblage des zones de fracturation, des contacts lithologiques et des structures de déformation majeure. Cette étude a permis donc de démontrer que la minéralisation aurifère de Zani-Koddo est fortement contrôlée par les interactions litho-structurales. Les formations ferrifères rubanées, associées aux zones de cisaillement orientées NW-SE, constituent les principaux facteurs de contrôle de la circulation et du piégeage des fluides aurifères.

4.2 Recommandations

Au regard des résultats obtenus, il est recommandé d'approfondir les travaux de recherche dans le secteur de Zani-Koddo par la mise en œuvre d'analyses géochimiques détaillées notamment sur les éléments majeurs, en traces métalliques ainsi que celles des terres rares afin de mieux comprendre l'origine des fluides minéralisateurs et d'affiner le modèle génétique proposé. Par ailleurs, l'utilisation combinée des outils tels que la télédétection, les levés géophysiques (magnétisme, radiométrie) et les modèles numériques de terrain permettrait d'améliorer significativement la compréhension du contexte structural et de mieux localiser les zones à fort potentiel aurifère. Il serait aussi pertinent de développer des forages ciblés basés sur les résultats litho-structuraux obtenus en privilégiant les contacts entre les formations ferrifères rubanées et les roches métamorphiques ainsi que les zones de forte fracturation. Ces travaux permettront d'évaluer quantitativement le potentiel économique de ce gisement.

Les principales limites de cette étude résident dans l'absence d'analyses géochimiques quantitatives détaillées, le nombre limité d'échantillons pétrographiques ainsi que l'insuffisance de données géophysiques et de forages profonds. Ces contraintes peuvent limiter la précision de l'interprétation du modèle métallogénique et la délimitation exacte des zones à fort potentiel aurifère. Par ailleurs, la mise en œuvre des recommandations proposées nécessite des

moyens financiers, techniques et logistiques importants pour réaliser des analyses avancées et des campagnes approfondies de terrain. La mise en œuvre des stratégies recommandées pourrait contribuer à une meilleure valorisation économique du gisement de Zani-Koddo grâce à l'identification plus précise des zones minéralisées et l'optimisation des activités d'exploration. Cependant, l'intensification des travaux miniers peut engendrer des impacts environnementaux tels que la dégradation des sols, la pollution des eaux et la perturbation des écosystèmes locaux. Sur le plan social, ces activités minières peuvent favoriser la création d'emplois et le développement local, mais nécessitant également une gestion responsable afin de limiter les conflits liés à l'exploitation des ressources naturelles et de garantir le bien-être des communautés riveraines.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts financier ni aucune relation personnelle de nature à influencer, de quelque manière que ce soit, les travaux présentés dans cet article.

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*. Bruxelles : Librairie Falk, 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 non publiée, Kingston University, 307 p.
- [4] BLOY, R.E., 2012. *The Zani-Kodo Project: Geology and Resources Report*. Bloy Resource Evaluation, Rapport technique inédit.
- [5] CAHEN, L., 1954. *Géologie du Congo Belge*. Liège : Vaillant-Carmanne.
- [6] CAHEN, L., SNELLING, N.J., DELHAL, J. & VAIL, J.R., 1984. *The Geochronology and Evolution of Africa*. Oxford : Clarendon Press.
- [7] FOUCAULT, A., RAOULT, J.-F., CECCA, F. & PLATEVOET, B., 2014. *Dictionnaire de Géologie*. 8e éd., Paris : Dunod, pp. 212–296.
- [8] GOLDFARB, R.J., GROVES, D.I. & GARDOLL, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, pp. 1–75.
- [9] 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.
- [10] 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*, 13, pp. 7–27.
- [11] GROVES, D.I., GOLDFARB, R.J., ROBERT, F. & HART, C.J.R., 2003. Lode gold deposits and structural controls. *Economic Geology*, 98, pp. 1–29.
- [12] HAGEMANN, S.G. & CASSIDY, K.F., 2000. Archean Orogenic Lode Gold Deposits. *Society of Economic Geologists*, pp. 9–68.
- [13] LAVREAU, J., 1982. *Étude 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] LEDENT, D. & TACK, L., 1991. Évolution tectonique du Kibalien. *Journal of African Earth Sciences*, 12, pp. 321–340.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] PIRAJNO, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Berlin : Springer, 1250 p. DOI : <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- [19] ROBERT, F. & BROWN, A.C., 1986. Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine. *Economic Geology*, 81, pp. 578–592.
- [20] SILLITOE, R.H., 1993. Gold-rich porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 88, pp. 170–183.



- [21] TACK, L., WINGATE, M., LIÉGEOIS, J.P., FERNANDEZ-ALONSO, M. & DEBLOND, A., 2001. Early Neoproterozoic magmatism (1000–910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo Craton. *Precambrian Research*, 110, pp. 277–306. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00192-9)
- [22] VIALON, P., RUHLAND, M. & GROLIER, J., 1976. *Éléments de tectonique analytique*. Paris : Masson, pp. 42–94.
- [23] 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.
- [24] WOODTLI, R., 1957. *La structure de Kilo : contribution à l'étude des fossés africains*. Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, pp. 67–92.