

Apport des minéraux d'altération dans la caractérisation du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien de Fettekro, Côte d'Ivoire

Zié OUATTARA^{1*}, Yacouba COULIBALY² et Marie-Christine BOIRON³

¹ *Université de Man, UFR des Sciences Géologique et Minière, Département de Géologie et Matériaux, BP V20 Man, Côte d'Ivoire*

² *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Laboratoire de Géologie du Socle et de Métallogénie, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

³ *Université de Lorraine, Laboratoire de GéoRessources, CNRS, Boulevard des aiguillettes, BP 236, 54506, Vandœuvre - lès-nancy cedex, France*

* Correspondance, courriel : ziegbana@hotmail.fr

Résumé

Cette étude porte sur la caractérisation de l'altération hydrothermale du gisement d'or de Bonikro. Elle s'est basée sur les carottes de sondage soumises à des investigations macroscopique et microscopique (Microscope polarisant, MEB et Microsonde) qui ont permis de récolter des données et de les interpréter afin de contraindre les comportements cristallichimiques des états d'altération. Les résultats ont ainsi montré que les principales lithologies du gisement de Bonikro à savoir la granodiorite et les dykes aplo-pegmatitiques apparaissent avoir subis une altération hydrothermale faible à forte. L'activité hydrothermale se manifestant sous deux modalités : les altérations pervasives et les altérations filoniennes. L'altération pervasive est marquée à Bonikro par la séricitisation, la silicification, la chloritisation, l'hématisation, la carbonatation et l'albitisation. L'altération filonienne est représentée par trois principales veines : (i) les veines en feuillets (ii) les veines transversales et (iii) les veines planaires. Le géothermomètre chlorite indique que la température de mise en place des veines et donc du dépôt de l'or se situe autour de 350°C. L'étude des altérations, tout en rendant compte des interactions entre fluides et roches, a révélé les minéraux et les paramètres du dépôt de l'or.

Mots-clés : *altération hydrothermale, cristallichimie, birimien, or, Bonikro, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Contribution of the alteration minerals in the characterization of the Bonikro gold deposit, Fettekro birimian furrow, Côte d'Ivoire

This study is about the characterization of the hydrothermal alteration in the Bonikro gold deposit. It is based on the macroscopic and microscopic (Polarizing microprobe, SEM and Micropobe) investigations of the deposits cores which help to collect data for further interpretations in order to constrain the crystallochemical behavior of the alterations. The results showed that the Bonikro deposit main lithologies i.e the granodiorite and the aplo-pegmatitic dykes have undergone a weak to strong hydrothermal alteration which activity is expressed by two modalities: the pervasive and fissural alterations. The

pervasive alteration is marked in Bonikro by the sericitization, the silicification, the chloritization, the haematization, the carbonatation and the albitization. The fissural alteration is made of three main veins generations : (i) sheeted veins, (ii) transversals veins and (iii) planar veins. The geothermometer chlorite indicates that the setting temperature of these veins therefore the temperature of the gold deposition is around 350°C. The study of the alterations while relating the interactions between the fluids and rocks also reveals the alteration minerals and the parameters of the gold deposition.

Keywords : *hydrothermal alteration, crystallochemistry, birimian, gold, Bonikro, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

En Afrique de l'Ouest, différents types de minéralisations aurifères sont reconnus au sein des formations birimiennes datant du Paléoprotérozoïque [1]. C'est en partie pour cette raison que les terrains birimiens sont la cible prioritaire de projets miniers de recherche d'or. En Côte d'Ivoire, par exemple, l'intensification de l'exploration minérale dans les terrains birimiens a eu pour conséquence la découverte de nouveaux gisements d'or notamment les gisements de Tongon, de Bonikro, d'Agbahou, d'Angovia, d'Hiré, d'Aféma, de Sissingué, etc. [2 - 6]. Le gisement aurifère de Bonikro, exploité depuis octobre 2008, est situé à 210 km au nord-ouest d'Abidjan, permet par son étude de répondre à une problématique liée aux ressources aurifères des sillons birimiens. L'état d'altération des formations impliquées dans les différents gisements aurifères a en effet, attiré l'attention des chercheurs. Une meilleure connaissance de l'altération hydrothermale aiderait comme guides de prospection à la découverte de nouveaux gisements dans les formations birimiennes. Ainsi, dans leur quête de compréhension de ces gisements, [2] de par l'étude des chlorites, a montré que le dépôt de l'or d'Aféma a été fait entre 184 et 382°C. [7] ont indiqué que la minéralisation aurifère d'Angovia était liée à une intense altération hydrothermale dont les chlorites avaient cristallisé entre 300 et 415°C. [8] ont montré que dans la minéralisation aurifère de Dougbafla, deux générations de chlorites occupaient les veines hydrothermales avec des températures de cristallisation faibles (298 et 304°C) dans les granophyres et fortes (315 et 328°C) dans les schistes noirs et andésites. En ce qui concerne le gisement d'or de Bonikro, l'altération hydrothermale apparaît avoir joué un rôle important dans la mise en place de la minéralisation. En effet, les différentes lithologies du gisement (granodiorite, aplo-pegmatite et basalte) sont affectées par de l'altération pervasive. En outre, ces lithologies sont recoupées par différents types de veines. L'objectif de cet article est de comprendre le rôle de l'altération hydrothermale dans la formation du gisement aurifère de Bonikro. Pour ce faire, trois objectifs spécifiques s'avèrent nécessaires : (i) identifier les principales altérations hydrothermales de ce gisement; (ii) ressortir les caractéristiques cristallochimiques des minéraux d'altération ; et (3) établir le lien entre ces minéraux d'altération et le dépôt de l'or.

2. Contexte géologique

Située dans la zone méridionale du craton ouest africain en l'occurrence la dorsale de Man [9], la Côte d'Ivoire est géologiquement caractérisée par deux entités inégalement réparties ; un socle cristallophyllien d'âge précambrien couvrant 97,5 % du territoire et un bassin sédimentaire côtier secondaire-tertiaire couvrant 2,5 % du pays et apparaissant en discordance sur les formations précambriennes (*Figure 1*) [10]. Le socle précambrien ivoirien est subdivisé en deux domaines géologiques par la faille du Sassandra [9]; le domaine archéen (3500 - 2500 Ma) qui occupe la partie occidentale et le domaine protérozoïque (2500 - 1600 Ma) situé à l'est. Entre ces deux domaines, [11] a identifié une zone de transition. Le domaine protérozoïque auquel appartient le gisement d'or de Bonikro a été structuré par le mégacycle éburnéen. Ce domaine renferme des formations d'âge birimien ; le Birimien étant considéré comme un épisode de création crustale

entre 2,2 et 2,1 Ga [12]. Les roches birimiennes couvrent les deux tiers de la Côte d'Ivoire et sont matérialisées par l'alternance de sillons volcanosédimentaires généralement orientés NNE et bordés ou renfermant des granitoïdes qui sont syntectoniques (orientés) ou post-tectoniques (équants) [13]. Le sillon birimien de Fettèkro est long de 300 Km et large de 5 à 40 m [14]. Il s'étend ainsi du sud de Dabakala, admet Toumodi comme le centre du sillon et se termine à Divo où l'on rencontre le gisement d'or de Bonikro dans le district aurifère de Hiré-Oumé. La géologie de ce sillon est faite de schistes, de grès, de quartzite et de conglomérats affectés par différentes injections de metabasites et de métaacidites [6, 13, 15 - 19].

3. Géologie du gisement de Bonikro

Le gisement d'or de Bonikro est situé dans le sud du sillon birimien de Fettèkro. L'analyse lithostratigraphique a montré que le gisement comportait deux principales unités lithologiques (volcanique et volcano-sédimentaire), contemporaines et intrudées par des granitoïdes [18]. L'unité volcanique occupe l'est du gisement et se compose principalement de basaltes dont certaines sont amygdulaires. L'unité volcano-sédimentaire constituant l'ouest de Bonikro comporte des pyroclastites, des pélites et des argilites. Ces deux unités lithologiques, séparées par une structure majeure ; le couloir de cisaillement de Bonikro, ont subi un métamorphisme général dans le faciès des schistes verts et localement un métamorphisme de contact marqué par la présence de cornéenne autour de l'intrusif granodioritique. La mise en place de cet intrusif est accompagné par des dykes aplo-pegmatitiques ainsi que par des volcanites felsiques. La présence de pyroclastite implique que le volcanisme birimien intervenu dans le sillon de Fettèkro a eu des épisodes explosifs [19]. En ce qui concerne la minéralisation aurifère de Bonikro, elle se rencontre aussi bien dans la granodiorite faiblement altérée que dans la granodiorite fortement altérée [16]. Les zones d'intense altération ont guidé les travaux d'exploration et d'exploitation car l'or visible y étant fréquent. En effet, pour les mineurs, certaines veines étaient utilisées comme de vrais guides dans l'exploitation de l'horizon. La paragenèse métallifère du gisement est principalement à pyrite-molybdénite-arsénopyrite-pyrrhotite avec des fractions moindres de tétradymite, de sphalérite et de chalcopyrite.

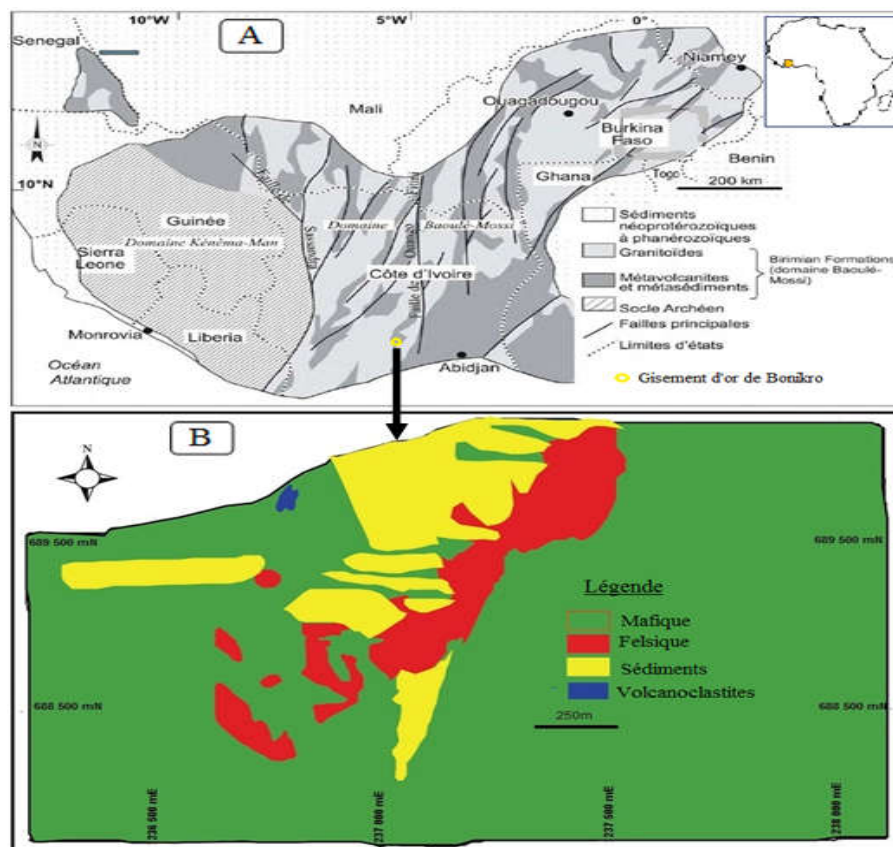


Figure 1 : Cartes synthétiques de la dorsale de Man (A : Naba, [10]) et du gisement d'or de Bonikro (B).

4. Matériel et méthodes

La région d'Oumé - Hiré est marquée par la rareté des affleurements et un horizon latéritique variant de 25 à 40 mètres. L'étude de l'activité hydrothermale dans le gisement de Bonikro a été réalisée sur des carottes de sondage et des échantillons de carrière. Pour éviter l'influence de l'altération supergène, les prélèvements ont été faits en profondeur sur différents sondages aussi bien dans les zones minéralisées que sur divers intervalles non minéralisés. L'observation macroscopique de ces échantillons a permis de noter l'intensité, le type de l'altération hydrothermale et aussi d'identifier certains minéraux du remplissage associé. Des lames minces et sections polies issues des échantillons sélectionnés ont ensuite été l'objet d'analyses minéralogiques et pétrographiques sous des microscopes en lumières transmises et réfléchies à l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Côte d'Ivoire également au laboratoire de Géoressources, Université de Lorraine, Nancy, France. Les microanalyses des minéraux d'altération ont été effectuées au laboratoire de Géoressources notamment sur le MEB de type JEOL JSM 7600-F et la microsonde de type CAMECA SX100. Au cours des investigations, la tension utilisée variait entre 15 to 20 kV et un faisceau de courant de 20 nA. La Cameca SX 100 était soumise à une tension de 20 kV avec un faisceau de courant de 20 nA.

5. Résultats

Les faciès d'altération rencontrés dans le gisement de Bonikro sont nombreux et variés. En effet, les interactions entre fluides et roches ont provoqué l'altération de la plupart des minéraux primaires et aussi des cristallisations dans les fissures. On peut donc de ce fait, grouper les faciès d'altération en deux types : les altérations pervasives et les altérations filoniennes.

5-1. Altérations pervasives

Ces altérations portent sur les principaux minéraux primaires et ont affecté toutes les lithologies de la zone. Cependant, compte tenu de l'importance de la granodiorite porphyroïde dans l'économie du gisement, leur étude se fera principalement sur cette lithologie. Les faciès d'altération qu'offre la granodiorite porphyroïde sont principalement la séricitisation, l'albitisation et la silicification. A celles-ci il faut associer l'hématisation, la chloritisation, la carbonatation et la sulfudation.

5-1-1. La séricitisation

La séricitisation (*Figures 2A et 2B*) est l'altération la plus répandue dans la granodiorite porphyroïde de Bonikro car elle est portée par les deux plus gros et abondants cristaux ; les mégacristaux de feldspath et les phénocristaux de biotite. Sur les échantillons faiblement altérés, la biotite garde son caractère magmatique tandis que les grains de feldspath deviennent verdâtres. Au microscope, on s'aperçoit que ces feldspaths sont partiellement remplacés par la séricite. Dans les échantillons moyennement à fortement altérés, les feldspaths sont entièrement séricitisés tandis que la biotite donne la séricite, mais également la chlorite. La séricitisation, lorsqu'elle est intense, aboutit à la formation de veines traversant la roche. Ces veines contiennent régulièrement des sulfures (pyrite) ainsi que de la muscovite. Les analyses au MEB et à la microsonde électronique [16] projetés dans les diagrammes ternaires de [20, 21] indiquent que les micas de Bonikro ont des compositions comprises entre le groupe des muscovites et celui des interstratifiés illites / smectites (*Figures 3A et 3B*), avec une évolution marquée des muscovites vers les illites. Selon le diagramme de Si en fonction de la charge interfoliaire (C.I), ces micas se regroupent au pôle des phengites (*Figure 3C*). Ces micas se caractérisent par une prédominance du potassium dans l'espace interfoliaire (*Figures 3D et 3E*).

5-1-2. L'albitisation

L'albitisation est la seconde altération la plus répandue au sein de la granodiorite porphyroïde (*Figures 4A et 4B*). Il s'agit de l'apparition de l'albite qui domine de plus en plus la matrice de la roche et faisant disparaître les taches vertes précédemment rattachées à la séricite. Au microscope, on observe les grosses plages d'albite fracturé à leur tour avec de fréquentes inclusions de chlorite, de quartz et de pyrite. Lorsque l'albitisation devient intense, la roche devient toute blanche, donnant l'impression d'un fluide qui aurait déposé ces albites. D'ailleurs, on retrouve l'albite au pourtour des veines en feuillets sans toutefois faire partie de la composition fissurale.

5-1-3. La carbonatation

La carbonatation s'observe dans la plupart des lithologies mais surtout dans les formations mafiques (*Figures 4C à 4E*). Son ampleur augmente lorsque l'une et l'autre des lithologies est à proximité d'une zone de cisaillement. La calcite y est le principal carbonate et reconnue à travers le test à l'acide chlorhydrique froid dilué à 10 %. Quant à l'ankérite, elle est identifiée quelques heures après l'exposition de la carotte au vent puisque l'ankérite commence à produire de l'oxyde de fer. Au MEB et à la microsonde électronique [16], les analyses ont montré que la calcite est le carbonate le plus répandu du gisement de Bonikro car elle apparaît dans 68% des analyses au détriment des ankérites et de la dolomite (*Figure 5*).

5-1-4. La silicification

La silicification consiste à une fine couverture de silice tardive qui imprègne les roches dans toute leur entièreté. Cette altération se rencontre sur l'ensemble des lithologies de Bonikro lorsque l'une de ces lithologies se trouve en contact franc avec la granodiorite, c'est notamment le cas de l'unité basaltique ou alors lorsque ces lithologies occupent les shear zones.

5-1-5. L'hématisation

Cette altération s'observe dans le granitoïde par la présence de fibres rouges d'hématite au sein des minéraux de feldspaths potassiques (**Figure 6A**). Cela aboutit dans la pegmatite à la diffusion d'oxyde de fer.

5-1-6. La sulfudation

Différents sulfures sont présents à Bonikro [16, 19] : on y a principalement la pyrite et la molybdénite. Ces sulfures sont associés à la plupart des zones d'altération mais également abondent dans les shear zones et au niveau des contacts lithologiques (**Figure 6B**).

5-1-7. La chloritisation

La chloritisation s'observe au niveau des phénocristaux de biotites mais également, dans les zones de cisaillement (**Figures 4C et 6C**). Elle s'observe de ce fait dans les plans de schistosités surtout au sein de l'unité basaltique. Les analyses effectuées à la microsonde électronique sur des chlorites en relation étroite avec la pyrite provenant essentiellement de la zone du cisaillement [16], indiquent des compositions de ripidolite et de pychnochlore (**Figure 7A**) [22]. Par contre, le diagramme de [23], les situe dans le champ des ripidolites et des brunsvigites (**Figure 7B**). Les chlorites de Bonikro ont une composition dominée par le magnésium au détriment du fer (**Figure 7C**). Le diagramme de Al (VI) en fonction de Al (IV) place les échantillons autour de la droite de pente 1 surtout presque tous du côté de Al (VI) (**Figure 7D**). Cette répartition permet de dire que les chlorites de Bonikro se sont formées dans un environnement de température faible à modérée.

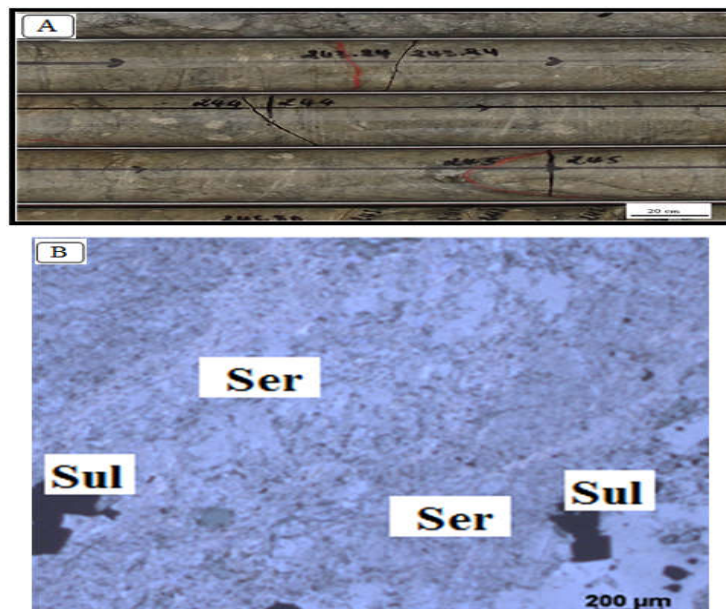


Figure 2 : Photographies de l'altération hydrothermale pervasive en séricite dans le gisement d'or de Bonikro

A : Photo montrant la séricitisation pervasive sur des carottes de Bonikro

B : Aspect microscopique de la séricitisation à Bonikro

Ser : séricite ; sul : sulfure

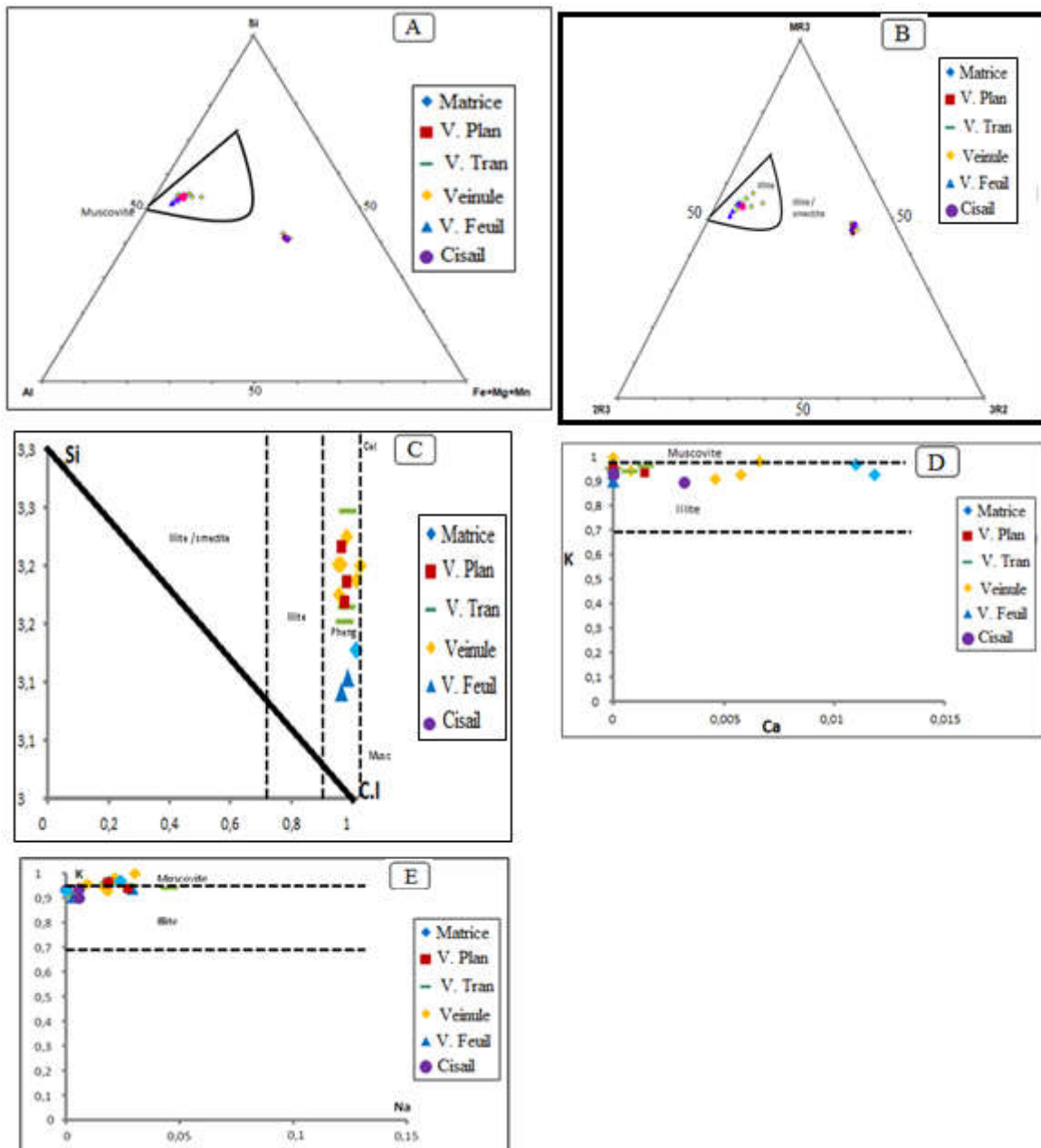


Figure 3 : Diagrammes de caractérisation des micas appliqués aux échantillons du gisement d'or de Bonikro
 A et B : Diagrammes ternaires de McNamara : Si, Al, Fe+Mg+Mn [20] (A) et de Velde [21] : MR3, 2R3, 3R2 (B)
 C à E : Diagramme binaire de Si vs C.I (C), de K vs Na (D) et de K vs Ca (E)

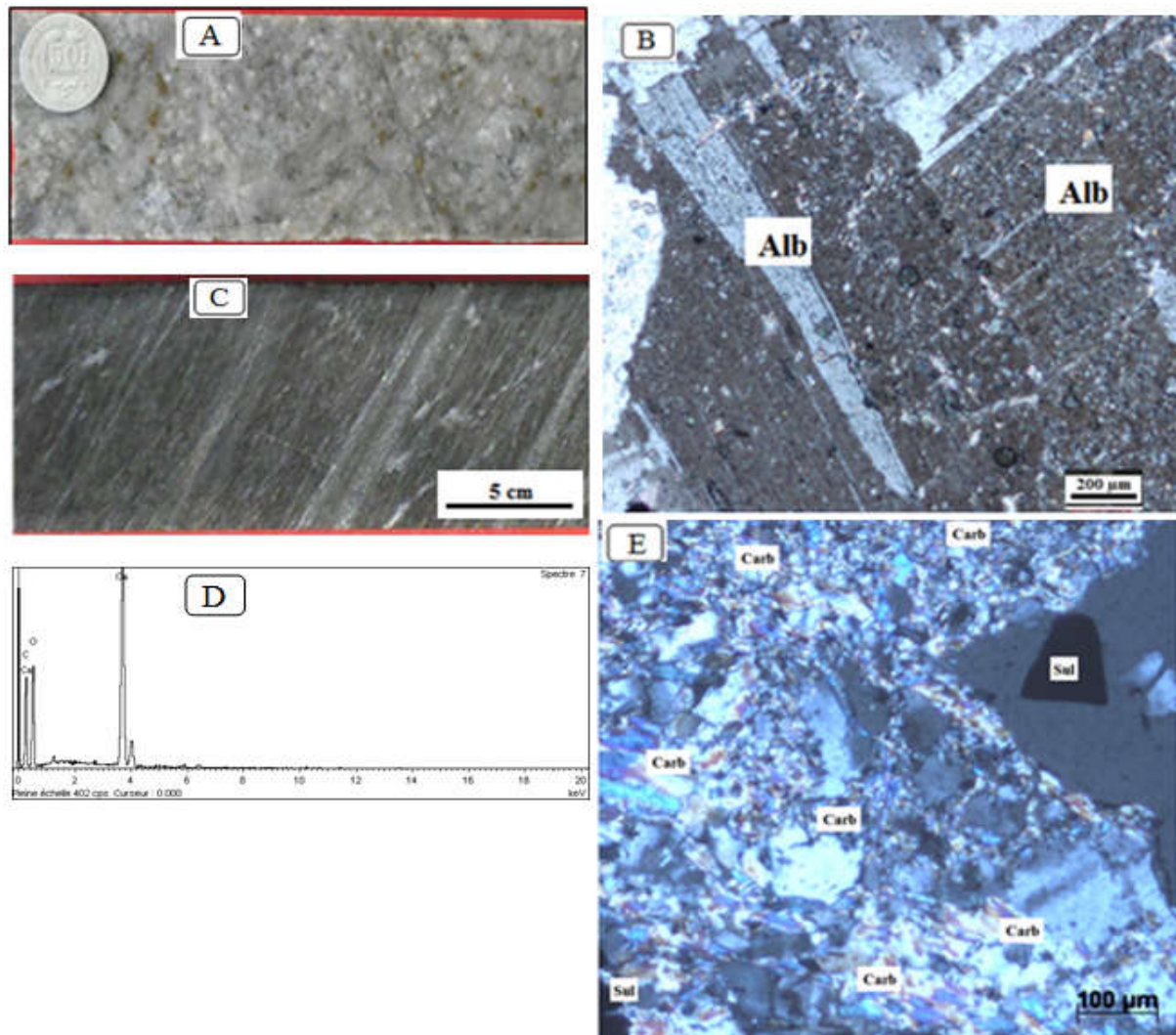


Figure 4 : Photographies de l'altération hydrothermale pervasive en albite et en carbonate dans le gisement d'or de Bonikro

A et B : Aspects macroscopique et microscopique de l'albitisation pervasive à Bonikro

C à E : Aspects macroscopique et microscopique de la carbonatation pervasive et du suspect au MEB de la calcite à Bonikro

Alb : Albite ; Carb : carbonate ; sul : sulfure

Le diagramme de Fe en fonction de la température nous permet de quantifier les températures de formation des chlorites (**Figure 7E**), et dans l'ensemble il confirme les prédictions du diagramme de Al (VI) en fonction de Al (IV). Pour estimer les températures de formation des chlorites, nous avons utilisé le géothermomètre « chlorite » défini par [24]. Selon cet auteur, la T est liée à Al ([IV]) selon la formule : $T (^{\circ}\text{C}) = -61,92 + 321,98 (\text{Al} [\text{IV}])$. Nous obtenons ainsi que les chlorites des 4 échantillons du sondage BD60 se sont formées entre 350 et 358° C [21].

5-2. Altérations filoniennes

Elles sont matérialisées par les remplissages des veines hydrothermales. Dans le gisement de Bonikro, sur la base de critères minéralogiques et pétrographiques, on peut distinguer trois principaux types : les veines en feuillets, les veines planaires et les veines transversales.

5-2-1. Les veines en feuillets

Les veines en feuillets (ou sheeted veins en Anglais) sont de petites veines parallèles entre elles à compositions quartzo-feldspathiques de taille variant du mm au cm (**Figures 8A à 4C**). Ces veines s’observent plus particulièrement dans la granodiorite où elles apparaissent comme étant post-magmatiques puisqu’elles fracturent dans leur mise en place les mégacristsaux de feldspaths potassiques. A l’œil nu ou à la loupe, l’on remarque l’abondance du quartz blanc laiteux (70 à 80 %), et des albites (10 %) dans les halos d’altération. L’or y est régulièrement visible, on y note la rareté de la calcite et des sulfures notamment la pyrite (2 %). Exposée aux rayons ultraviolets, les veines en feuillets présentent des fluorescences bleutées symbolisant ainsi la présence de la scheelite (CaWO_4) dans des proportions variant de 5 à 10 % (**Figure 8B**). La scheelite est contenue dans la roche et plus particulièrement contrôlée par les veines en feuillets. La présence de l’albite dans les halos de ces veines en feuillets pourrait suggérer que le plagioclase est issu d’un précédent remplissage où indique un changement de composition au sein du fluide initial (**Figure 8C**). L’analyse des veines en feuillets au MEB et à la microsonde révèle que :

- les micas des veines en feuillets sont à composition proche des muscovites (**Figures 3A et 3B**). Dans le diagramme de Si en fonction de la charge interfoliaire (C.I), les micas se localisent principalement sur l’axe allant des muscovites aux céladonites en passant par les phengites au niveau duquel un regroupement conséquent est observé (**Figure 3C**). Ainsi les échantillons issus des veines en feuillets sont les plus proches du pôle muscovite. Le cation prédominant dans l’espace interfoliaire de ces micas est le potassium (**Figures 3D et 3E**).
- les carbonates des veines en feuillets se répartissent en deux groupes : celui des calcites et celui variant entre dolomite et ankérite selon le diagramme Fe-Mg-Ca (**Figure 5**) avec une substitution du Mg par le Fe.

5-2-2. Les veines transversales

Les veines transversales sont les moins répandues des trois types de veines à Bonikro. Ce sont des veines d’épaisseur variant de 0,5 à 1 cm et se présentant dans la majorité des cas perpendiculairement aux veines en feuillets (**Figures 8D et 8E**). Leur remplissage est fait de quartz blanc (40 %), de calcite (30 %), d’albite (10 %), de biotite (15 %), et de sulfures (5 %) (**Figure 8F**). La biotite de même que les autres minéraux est d’origine hydrothermale. Ces veines sont les seules au sein desquelles on a la tourmaline mais aussi la powellite (CaMoO_4) qui est mis en exergue par sa fluorescence jaune. Par ailleurs, parmi les sulfures, on note la molybdénite (**Figure 8E**).

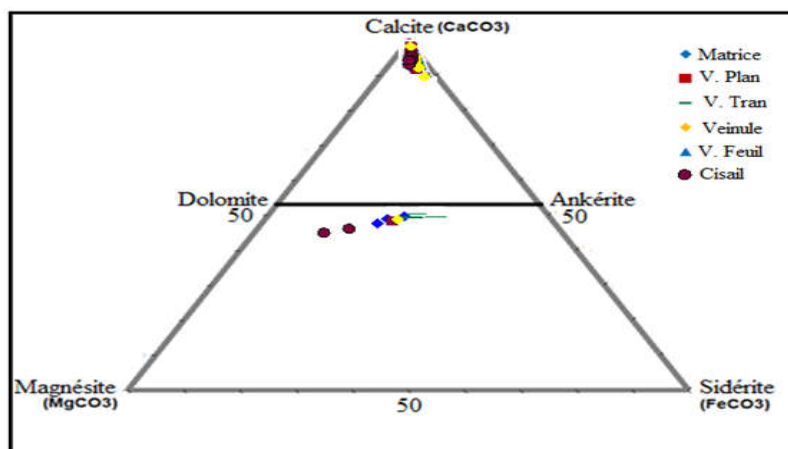


Figure 5 : Diagramme ternaire Ca-Mg-Fe de caractérisation des carbonates appliqués aux échantillons du gisement d’or de Bonikro

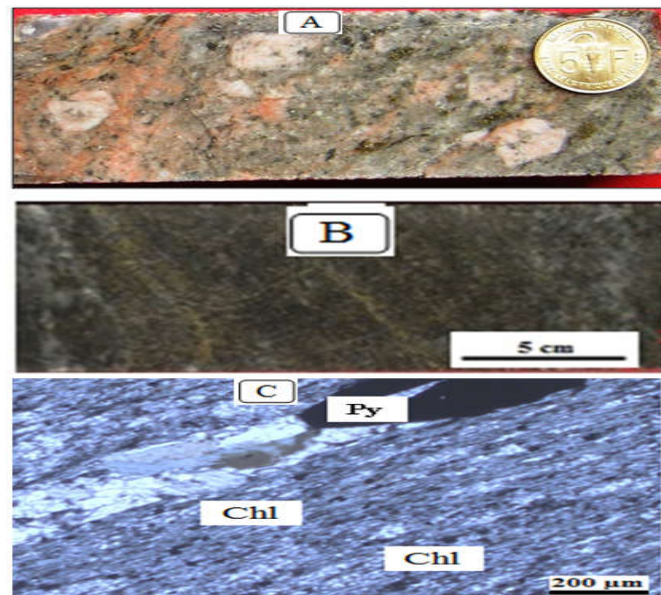


Figure 6 : Photographies des carottes montrant l'altération hydrothermale pervasive en hématite (A), en sulfure et un aspect microscopique de la chloritisation dans le gisement d'or de Bonikro

Chl : Chlorite ; Py : pyrite

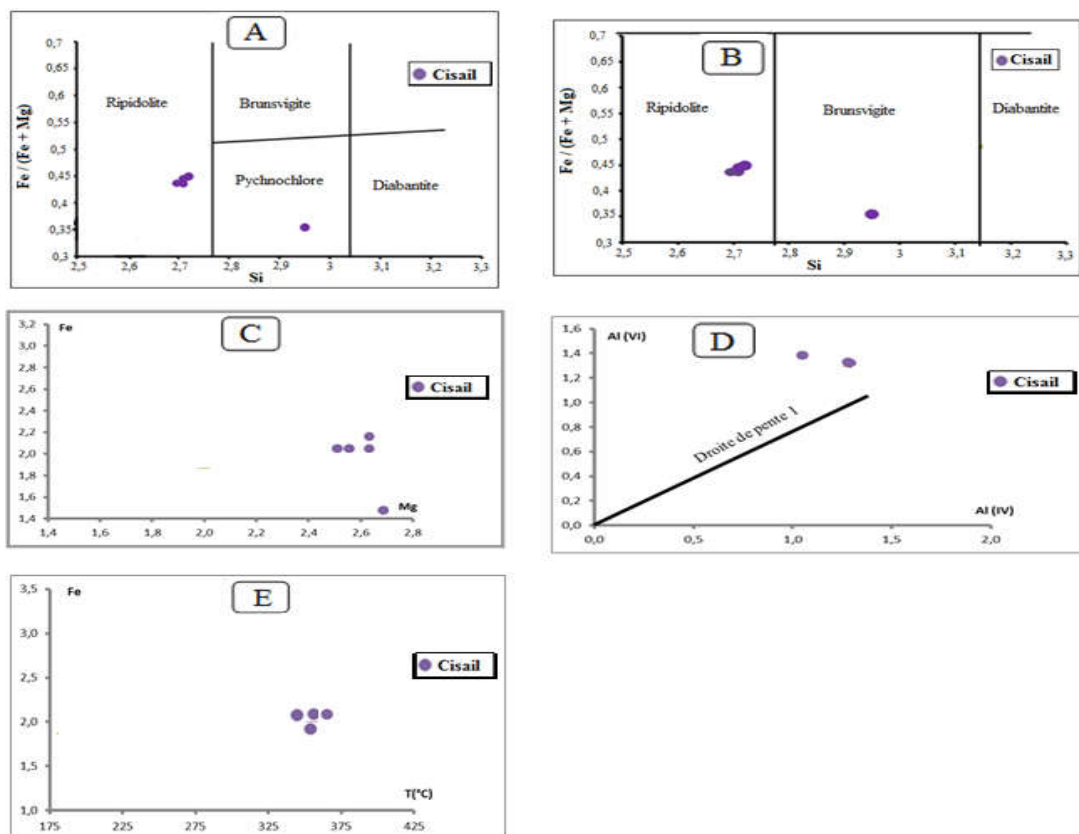


Figure 7 : Diagrammes de caractérisation des chlorites appliqués aux échantillons du gisement d'or de Bonikro

*A et B : Diagrammes de $Fe / (Fe + Mg)$ vs Si de Hey [22] (A) et de Foster, [23] (B) ;
C à E : Diagrammes de Fe vs Mg (C), de $Al(VI)$ vs $Al(IV)$ (D) et de Fe vs $T(E)$*

L'étude des veines en transversales au MEB et à la microsonde a montré que :

- les micas sont principalement des muscovites (*Figures 3A et 3B*) avec une évolution vers les illites. Le diagramme de Si en fonction de la charge interfoliaire (C.I) distribue les micas principalement sur l'axe allant des muscovites aux céladonites en passant par les phengites au niveau duquel un regroupement conséquent est observé (*Figure 3C*). Le potassium constitue le cation prédominant dans l'espace interfoliaire (*Figures 3D et 3E*).
- les carbonates des veines en transversales de Bonikro se divisent en deux groupes distincts (*Figure 5*). Le premier est autour du pôle de la calcite tandis que le second groupe est entre les domaines de la dolomite et de l'ankérite.

5-2-3. Les veines planaires

Les veines planaires de Bonikro sont d'épaisseur variable (0,5 à 1 voire 2 cm) et de composition contenant soit du quartz blanc soit du quartz enfumé, des carbonates, des micas, des chlorites et des sulfures (*Figures 8G et 8H*). Le principal sulfure est la molybdénite qui est abondante faisant de ces veines, les plus pourvoyeuses de la molybdénite du gisement. Elles abondent au niveau des contacts lithologiques et sont comme les veines en feuillets porteuses d'or visible. Les investigations des veines planaires au MEB et à la microsonde électronique ont permis de comprendre que :

- les micas issus des veines planaires de Bonikro sont à composition proche des muscovites (*Figures 3A et 3B*). Les micas se localisent principalement sur l'axe allant des muscovites aux céladonites en passant par les phengites au niveau duquel un regroupement conséquent est observé (*Figure 3C*). Dans ces micas, le potassium constitue le cation dominant dans l'espace interfoliaire (*Figures 3D et 3E*).
- les carbonates issus des veines planaires montrent des compositions allant du pôle de la calcite tandis que d'autres sont entre les domaines de la dolomite et de l'ankérite (*Figure 5*).

5-2-4. Les veinules

Des veinules ont été relevées dans ces zones d'altération hydrothermale de Bonikro. Ces veinules se mettent en place à la suite de la fracture des minéraux primaires et ne sont pas la continuité des veines décrites ci-haut. Elles présentent des variables compositions pouvant contenir le quartz, les carbonates et la chlorite. On observe localement de petites veines dues à l'hématite (*Figure 6A*). Elle se distingue par la coloration rose à rougeâtre naissante dans les veines de quartz et est couramment associée à la forte altération potassique autour des dykes felsiques dans l'ouest de la fosse d'exploitation. Les échantillons présentent les cristaux de feldspaths potassiques ayant une coloration rouge-rose donnant une coloration rose voire rouge à la veine et aussi à la roche. Certains cristaux de feldspaths potassiques apparaissent peu émoussés comme s'ils avaient subi un faible transport. Le microcline est d'ailleurs le principal minéral observé dans ces lames minces de Bonikro. [25] en Espagne ont observé en lame mince ces types d'altération et firent allusion à une microclinitisation. L'analyse des veinules au MEB et à la microsonde a mis en relief :

- les micas étudiés au sein des veinules sont des muscovites (*Figures 3A et 3B*). Le diagramme de Si en fonction de la charge interfoliaire (C.I) montre que les micas sont plutôt proches des phengites (*Figure 3C*). Le potassium est le cation qui prédomine dans l'espace interfoliaire (*Figures 3D et 3E*).
- les carbonates obtenus dans les veinules sont soit des calcites (*Figure 5*).

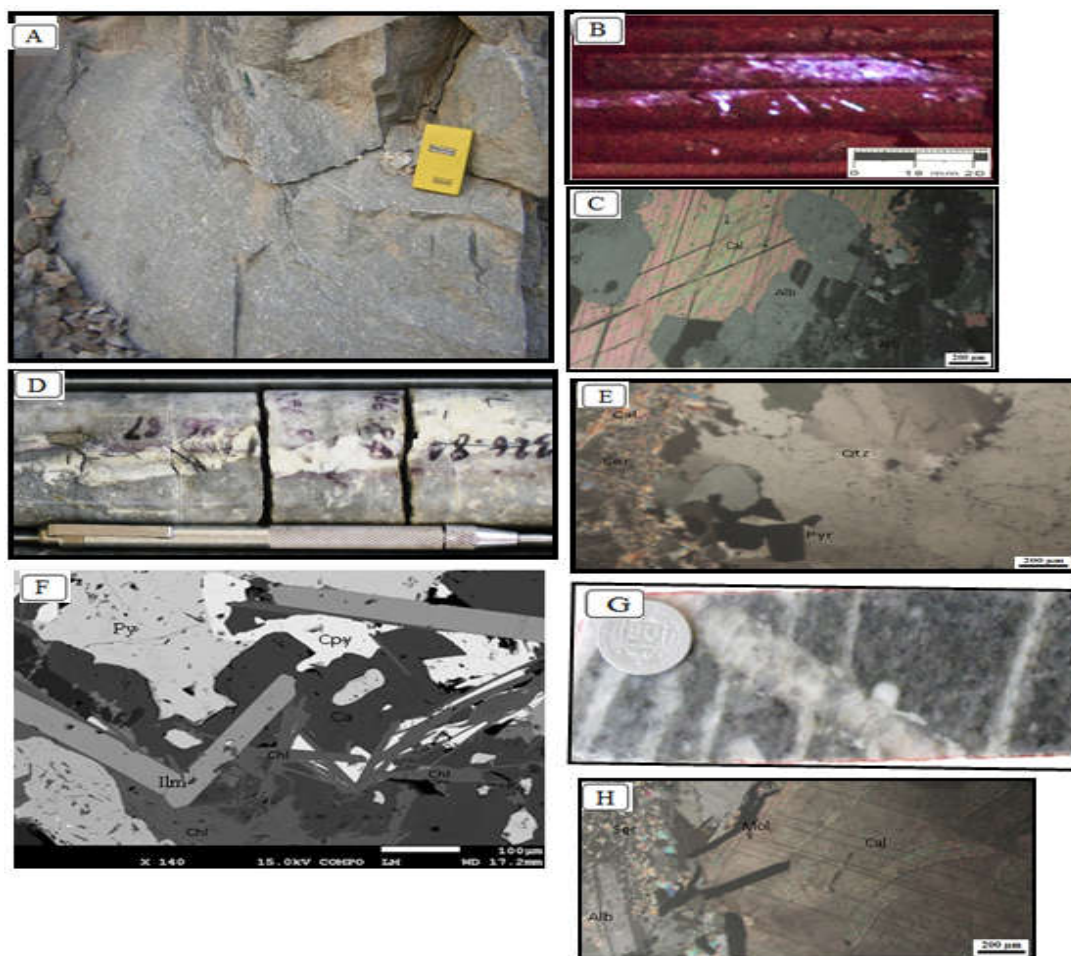


Figure 8 : *Aspects macroscopiques et microscopiques de l'altération filonienne à Bonikro*

A à C : Vues macroscopiques et microscopiques des veines en feuillets (A et C) et aspect macroscopique de la fluorescence de la scheelite (B)

D et E : Vues macroscopique (E) et microscopiques (F) des veines transversales

F : Photo du MEB montrant la chlorite, le carbonate et des sulfures dans un filon de Bonikro

G et H : Vues macroscopique microscopique des veines planaires à Bonikro

Alb : albite ; Cal et Ca : calcite ; Qtz : quartz, Pyr et py : pyrite, Ilm : ilménite, Cpy : chalcopryrite ; Chl : chlorite et Mol : molybdénite

6. Discussion

- *Une zone d'intense altération hydrothermale*

L'étude de l'altération hydrothermale du gisement d'or de Bonikro a permis de mettre en évidence deux types d'altération d'intensité variable : altération pervasive et altération filonienne. Au sein de la minéralisation de Dougbafla, [8] a également observé ces deux types d'altération. Dans le cas du gisement d'or de Bonikro, la granodiorite qui est la principale lithologie porteuse de la minéralisation est presque toujours altérée lorsqu'elle se situe dans les horizons minéralisés [16]. Les principaux processus de l'altération pervasive sont : la séricitisation, l'albitisation, la silicification, la chloritisation, et l'hématisation. L'altération hydrothermale filonienne se matérialise surtout par les veines planaires,

transversales et en feuillets qui sont généralement minéralisées. La chronologie relative de ces veines est : (i) veines en feuillets à quartz-scheelite-or ; (ii) veines transversales à tourmaline-powellite-pyrite-carbonates ; (iii) veines planaires à molybdénites-pyrite-carbonate-or. Cette variabilité de l'altération aussi bien au niveau des types que dans le degré de chaque type témoigne qu'à Bonikro, l'altération hydrothermale fut évolutive et intense. En effet, la plupart des minéraux primaires montrent des transformations en minéraux secondaires. Notons d'ailleurs, que bien au-delà de la granodiorite, la plupart des lithologies de ce gisement ont subi les effets de cette altération. Cette intensité de l'altération hydrothermale est également observée dans le reste du sillon de Fettekro notamment à Dougbafla [8], à Agbahou [6] et à Toumodi [17].

- *Une zone de circulation de divers fluides hydrothermaux*

La séricitisation est l'altération hydrothermale la plus commune à Bonikro, et son apparition est consécutive à l'altération de deux minéraux omniprésents dans la granodiorite : la biotite et les plagioclases. L'origine et plus particulièrement l'intensification de la séricitisation sont imputables aux différentes phases d'altération hydrothermale intervenues à Bonikro. Nous avons en effet, observé deux niveaux de séricite. La première type de séricite est purement pervasif, se développant au détriment des minéraux primaires de biotite et de plagioclases. Cela dénote d'un événement local et dans le cas d'espèce est à relier aux fluides postérieurs à la mise en place de la granodiorite. La seconde séricite est liée aux filons hydrothermaux, elle est sélective dans sa mise en place, elle est contrôlée par les veines irisées tardives recoupant les minéraux primaires où on la rencontre en association avec les sulfures. De ce fait, la seconde séricitisation est ramenée à une circulation de fluides issus d'un événement d'envergure globale ou régionale comme le métamorphisme du faciès des schistes verts également reconnu en place. C'est également le cas pour l'albitisation qui est d'abord pervasif dans la granodiorite puis après la mise en place des veines en feuillets se retrouvent dans les épontes de ces veines. Des oxydes de fer de coloration rouge se répandent dans les pegmatites dans le sud-ouest de la carrière. Ils affectent également les feldspaths potassiques en laissant voir des fibres rouges dans la matrice de ces mégacristaux. L'hématite du feldspath potassique est dû à la transformation de la magnétite en hématite et est communément appelée la martitisation.

Les différents remplissages fissuraux de Bonikro, hormis les veines en feuillets, sont constitués de quartz blanc ou enfumé, de tourmaline, d'albite, de carbonates associés à la molybdénite, la pyrite, la chalcopirite comme les remplissages déjà relevés dans des gisements birimiens à Agbahou : [6] ; à Aféma: [2, 5] ; à Angovia : [7] ; dans des gisements au Ghana [26, 27] ; dans les gisements de Taparko et de Diabatou au Burkina Faso [29, 30], en Afrique de l'Ouest [1, 35] et dans la mine de Sigma au Canada [31, 32]. L'importance des veines en feuillets se trouve dans le fait que leur présence dans la granodiorite saine est synonyme de teneur appréciable d'or. Cela est évoqué ailleurs dans le monde au sein des gisements liés aux intrusions. C'est le cas des gisements du territoire du Yukon au Canada [38], du gisement de Linares en Espagne [25] et de ceux de Mokrsko (République Tchèque), de Salava en Espagne, Vasilkovskoe (Kazakhstan), Kidston et Timbarra en Australie, et de Kori Kollo en Bolivie [34]. Une autre particularité des veines en feuillets est leur pauvreté en sulfures. La présence de l'or visible en leur sein démontre qu'elles ont dès leur ouverture permis la circulation ensuite le piégeage de l'or dans les fractures du feldspath potassique. A Bonikro, comme dans des gisements cités ci-dessus, ces veines sont pauvres en sulfures. Par exemple, Baker et Lang [33], après l'étude de cinq dépôts aurifères au Canada n'ont trouvé que des teneurs de sulfures ne dépassant pas 5 %. Dans le gisement de Linares, en Espagne, cette teneur est plus faible ; 0,5 % ([25]). Enfin, dans le gisement de Morila au sud du Mali, [35] ont relevé de faibles teneurs en sulfures. Ces derniers auteurs ont d'ailleurs reconnu que le gisement aurifère de Morila est un gisement intrusionnel repris tardivement par des minéralisations orogéniques. Dans le gisement aurifère de Inata au Burkina Faso,

[36] ont abouti sur un modèle intrusionnel au vue du lien entre la minéralisation et les intrusions. L'application du géothermomètre chlorite a permis de situer les températures de formations des veines hydrothermales. Ainsi, les couloirs de cisaillement se sont formées entre 350 et 358° C. Ces températures sont similaires à celles obtenues par d'autres auteurs sur des chlorites observés dans des gisements sur d'autres sillons birimiens ivoiriens [2, 7, 8, 36]. En ce qui concerne l'origine des fluides hydrothermaux, la présence de dykes aplo-pegmatitiques minéralisés semble indiquer un lien avec le pluton granodioritique ayant un fond aurifère avéré. Notons qu'avant la découverte de ces dykes aplo-pegmatitiques, [38] liait l'origine des fluides hydrothermaux de ce gisement à un autre pluton. Ainsi, la formation du granitoïde au stade orthomagmatique a-t-il été suivi par le stade pegmatitique où les éléments volatils se sont regroupés dans les cavités formant des pegmatites renfermant de la tourmaline. La dernière étape de mise en place des éléments volatils est toujours selon cet auteur, le stade pneumatolytique où apparaissent le wolfram et la molybdénite. Cela concorde avec la chronologie relative établie entre les veines en feuillets, planaires et transversales. En effet, les veines en feuillets avec la scheelite se sont mises en place puis ont suivi les veines à powellite et celles à molybdénite. L'or et le molybdène se sont mis en place en au moins deux phases d'altération et de minéralisation. Dans cette granodiorite affectée par les veines planaires, l'inclusion de l'or accompagné par la tétradymite et les tellures de bismuth se sont faits après le magmatisme.

7. Conclusion

A la lumière des résultats, le gisement aurifère de Bonikro est marqué par diverses altérations hydrothermales ayant favorisé la concentration de l'or. Nous notons d'abord les altérations pervasives en séricite, en albite, en chlorite et en carbonates. Ensuite, nous avons les altérations filoniennes qui s'observent dans les remplissages fissuraux dont les principaux sont les veines en feuillets, veines planaires et les veines transversales. Ces veines sont remplissages fissuraux sont matérialisés par le remplacement progressif des minéraux de scheelite et la tétradymite puis ont suivi la powellite enfin la molybdénite et la pyrite. Le comportement cristallographiques des minéraux d'altération montre que (i) Les carbonates sont la calcite, la dolomite et l'ankérite. La calcite, abondante, occupe les veines planaires, transversales et la matrice tandis que les veines en feuillets sont dominées par la dolomite et surtout l'ankérite; (ii) les chlorites de Bonikro sont de types ferrifères et magnésiens (ripidolites, pynochlore et brunsvigite). L'utilisation du géothermomètre des chlorites situe leur température de formation et donc du dépôt de l'or entre 350 et 360°C; (iii) les micas de Bonikro sont dominés par les muscovites évoluant en illite voire illite/smectite avec leur espace interfoliaire dominé par le potassium. Cette variabilité de composition des minéraux d'altération et des veines indique que les fluides hydrothermaux liés à l'or de Bonikro sont ceux consécutifs au magmatisme mais également métamorphisme d'envergure régionale.

Remerciements

Les auteurs remercient la compagnie Newcrest Mining Limited pour ses soutiens logistique et financier dans la réalisation de cette étude. Egalement, les remerciements vont ensuite à l'endroit des évaluateurs dont les critiques ont permis d'améliorer positivement le manuscrit.

Références

- [1] - J. P. MILESI, J. L. FEYBESSE, P. LEDRU, A. DOMMANGET, M. F. OUEDRAOGO, E. MARCOUX, A. PROST, C. VINCHON, J. P. SYLVAIN, V. JOHAN, M. TEGYEY, J. Y. CALVEZ and P. LAGNY, Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest, leurs relations avec l'évolution lithostructurale du protérozoïque inférieur, *Chron. Rech. Min.*, 497 (1989) 98 p.
- [2] - K. E. ASSIE, Lode gold mineralization in the Paleoproterozoic (Birimian) volcano- sedimentary sequence of Afema gold district, southeastern Côte d'Ivoire, Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences, Technical University of Clausthal, Germany, (2008) 198 p.
- [3] - Y. COULIBALY, M. C. BOIRON, M. CATHELINÉAU and A. N. KOUAMELAN, Fluid immiscibility and gold deposition in the Birimian quartz veins of the Angovia deposit (Yaouré, Ivory Coast), *J. Afr. Earth Sci.*, 50 (2008) 234 - 254 p.
- [4] - K. B. KRAMO, Y. COULIBALY, K. B. K. POTHIN and E. KADIO, Mineralogical and chemical characters of the Aféma Shear Zone Gold Mineralization, southe-east of Ivory Coast : Example of the Hermann Mine, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 21, N°1 (2008) 154 - 163 p.
- [5] - E. KADIO, Y. COULIBALY, M. E. ALLIALY, A. N. KOUAMELAN and K. B.K. POTHIN, On the occurrence of gold mineralizations in southeastern Ivory Coast, *J. Afri. Earth Sci.*, 57 (2010) 423 - 430 p.
- [6] - N. N. HOUSSOU, Etude pétrologique, structurale et métallogénique du gisement aurifère d'Agbahou, Divo, Côte d'Ivoire, Doctorat, Univ. Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, (2013) 177 p.
- [7] - Y. COULIBALY, A. N. KOUAMELAN, C. S. DJRO, K. B. K. POTHIN et M. O. BOFFOUE, Les altérations associées à la minéralisation aurifère d'Angovia (Massif du Yaouré, centre de la Côte d'Ivoire), *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 11 (2008) 159 - 175 p.
- [8] - A. S. OUATTARA, Y. COULIBALY et F. J-L. H. KOUADIO, Les altérations hydrothermales associées à la minéralisation aurifère du gisement de Dougbafla (District d'Oumé-Hiré, centre-ouest de la Côte d'Ivoire), *European Scientific Journal*, Vol. 13, N°30, (2017) 108 - 125 p.
- [9] - B. BESSOLES, Géologie de l'Afrique, le craton ouest-africain, Paris, *Mém. B.R.G.M.*, France, N°88 (1977) 404 p.
- [10] - S. NABA, Propriétés magnétiques et caractères structuraux des granites du Burkina Faso oriental (Craton ouest Africain, 2.2 — 2.0 Ga) : implications géodynamiques, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, Paul Sabatier, (2007) 144 p.
- [11] - A. N. KOUAMELAN, Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire, implication pour la transition Archéen- Protérozoïque, Thèse, Mém. Géosciences Rennes, 73 (1996) 289 p.
- [12] - W. ABOUCHAMI, M. BOHER, A. MICHARD & F. ALBAREDE, A major 2,1 Ga event of mafic magmatism in West Africa : An early stage of crustal accretion, *J. Geophys. Res.*, 95 (11) (1990) 17605 - 17629 p.
- [13] - I. YACE, Etude géologique du volcanisme Eburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fettekro, Ministère des mines, République de la Côte d'Ivoire, (1982) 156 p.
- [14] - I. YACE, Initiation à la géologie, l'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest, Edition CEDA, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2002) 183 p.
- [15] - Y. B. DAOUDA, Lithostratigraphie et pétrologie des formations birimiennes de Toumodi-Fettekro, Côte d'Ivoire : implication pour l'évolution crustale du Paléo- protérozoïque du craton Ouest-Africain, Doctorat, Univ. Orléans, Mémoire Géosciences, 737 (1998) 191 p.
- [16] - Z. OUATTARA, Caractères lithostratigraphique, structural, géochimique et métallogénique du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien de Fettekro, centre-sud de la Côte d'Ivoire, Thèse Unique, Univ. Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, (2015) 275 p.
- [17] - I. COULIBALY, Pétrologie des volcanites et des plutonites du sud du sillon birimien de Toumodi-Fettekro (Côte d'Ivoire) : implications pétrogénétiques et tectonique, Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, (2018) 218 p.

- [18] - Z. OUATTARA, Y. COULIBALY and M. C. BOIRON, Lithostratigraphy of the Bonikro gold deposit; contribution to the setting of the birimian units in the southern Fettekro greenstone belt, Côte d'Ivoire. *Rev. RAMRES*, Vol. 06, N° 01 (2018) 6 - 14 p.
- [19] - Z. OUATTARA, Y. COULIBALY et F. LIEBEN, Pétrographie du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien d'Oumé-Fettekro, Côte d'Ivoire, *European Scientific Journal*, Vol. 11, N°21 (2015) 119 - 132 p.
- [20] - M. MCNAMARA, The lower greenschist facies in the Scottish Highlands, *Geol. Fôr. Stockholm Fôr.*, 87 (1965) 347 - 389 p.
- [21] - B. VELDE, Mixed-layer mineral association in muscovite-celadonite and muscovite-chlorite joins, Clay and clay minerals; 13th nat. conf, Wisconsin, USA, (1964)
- [22] - M. H. HEY, *A new review of the chlorites*, *The mineralogical magazine*, Vol. 30, (224) (1954) 277 - 292 p.
- [23] - M. D. FOSTER, Interpretation of the composition and a classification of the chlorites, *US. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 414 A (1962) 27 p.
- [24] - M. CATHELINÉAU, Cations site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature, *Clay Minerals*, 23 (1988) 471 - 485 p.
- [25] - A. CEPEDAL, M. FUERTES-FUENTE, A. MARTIN-IZARD, J. GARCIA-NETO and M. C. BOIRON, An intrusion-related gold deposit (IRGD) in the NW of Spain, the Linares deposit: Igneous rocks, veins and related alterations, ore features and fluids involved, *Journal of Geochemical Exploration*, 124 (2013) 101 - 126 p.
- [26] - P. O. AMPONSAH, Geology and Geochemistry of the shear-hosted Julie gold deposit, NW Ghana, *J. Afr. Earth. Sci.*, (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.0.013>
- [27] - T. OBERTHÜR, A. SCHMIDT MUMM, U. VETTER, K. SIMON and J. A. AMANOR, Gold mineralization in the Ashanti belt of Ghana: genetic constraints of the stable isotope geochemistry, *Econ. Geol.*, (91) 2 (1996) 289 - 301 p.
- [28] - F. BOURGES, P. DEBAT, F. TOLLON, M. MUNOZ and J. INGLES, The geology of the Taparko gold deposit, Birimian greenstone belt, Burkina Faso, West Africa, *Mineralium Deposita*, 33 (1998) 591 - 605 p.
- [29] - R. KLEMD, T. OBERTHÜR and A. OUEDRAOGO, Gold telluride mineralization in the Birimian at Diabatou, Burkina Faso: the role of CO₂-N₂ fluids. *J. Afr. Earth Sci.*, 24 (1997) 227 - 239 p.
- [30] - J. P. MILESI, P. LEDRU, J. L. FEYBESSE, A. DOMMANGET and E. MARCOUX, Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa, *Precambrian Research*, 58 Issues 1-4 (1992) 305 - 344 p.
- [31] - F. ROBERT, A. C. BROWN and A. J. AUDET, Structural control of gold mineralization at the Sigma Mine, Val d'Or, Quebec, *Bull. Can. Inst. Min. Metall.*, 76 (1983) 72 - 80 p.
- [32] - R. H. SIBSON, F. ROBERT, K. H. POULSEN, High-angle reverse faults, fluid- pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits, *Geology*, 16 (1989) 551 - 555 p.
- [33] - T. BAKER and J. R. LANG, Fluids inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada, *Mineralium Deposita*, 36 (2001) 563 - 582 p.
- [34] - J. F. H. THOMPSON, R. H. SILITOE, T. BAKER, J. R. LANG and J. K. MORTENSEN, Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces, *Mineralium Deposita*, 34 (1999) 323 - 334 p.
- [35] - C. R. M. MCFARLANE, J. MAVROGENES, D. LENTZ, K. KING and A. ALLIBONE, Geology and intrusion-related affinity of the Morila Gold Mine, Southeast Mali, *Economic Geology*, 106 (2011) 727 - 750 p.
- [36] - H. ILBOUDO, S. SAWADOGO, A.S. TRAORÉ, M. SAMA, U. WENMENGA and M. LOMPO, Intrusion-related gold mineralization : Inata gold deposit, Bélahourou district, Northern Burkina Faso (West Africa), *J. Afr. Earth. Sci.*, 148 (2018) 52 - 58
- [37] - Z. OUATTARA, Etudes pétrographique, minéralogique et cristalochimique des gisements d'Aféma, d'Angovia et du prospect de Dahapleu (Ity), Mémoire de DEA, Univ. Cocody, (2009) 75 p.
- [38] - A. ALLIBONE, Geology of the Bonikro Mine, Côte d'Ivoire. Rapport interne LGL Equigold., (2010) 48 p.