

Fertilité des intrusions dans les porphyres cuprifères paléoprotérozoïques de la ceinture de roches vertes birimienne de Boromo, Burkina Faso, Craton Ouest Africain

Aristide BELEMSOBGO^{1*}, Wendkouni Passetché Pauline ZONGO², Urbain WENMENGA¹ et Seta NABA¹

¹ *Université Joseph KI-ZERBO, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire de Géosciences et Environnement, 03 BP 7021 Ouaga 03, Burkina Faso*

² *Université de OUAHIGOUYA, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologies*

(Reçu le 03 Novembre 2023 ; Accepté le 30 Janvier 2024)

* Correspondance, courriel : belaris1er@yahoo.fr

Résumé

Le gisement de Cuivre-Or de Diénéméra-Gongondy est affilié à des porphyres cuprifères paléoprotérozoïques associés à la ceinture de roches vertes birimiennes de Boromo. La minéralisation est en relation avec un complexe intrusif basique à intermédiaire. La présente étude met en évidence le caractère fertile ou non de l'encaissant dans un environnement géologique de subduction. L'approche méthodologique a consisté à un examen de six sondages carottés à travers une analyse des traits lithologiques et des analyses géochimiques sur roche totale. Les données pétrographiques, pétrologiques et géochimiques ont montré un complexe filonien fertile de composition dioritique dominante marqué par une variété de textures subvolcaniques. Les faciès stériles observés sont plus fractionnés et assimilables aux adakites de la Cordillère des Andes. Ils sont enrichis en terres rares ($\sum \text{REE} > 100 \text{ ppm}$) et en éléments à petit rayon ionique et à charge élevée (HSFE), avec un appauvrissement en métaux (Cu, Pb, Zn). Ces différentes données cumulées aux diagrammes de fertilité permettent une meilleure discrimination des faciès à potentiel minéral non négligeable.

Mots-clés : *Burkina Faso, porphyre cuprifère, Diénéméra-Gongondy, complexe filonien, diorite, fertilité.*

Abstract

Intrusions fertility of Paleoproterozoic porphyry copper deposit of Boromo birimian greenstone belt, Burkina Faso, West African Craton

The Diénéméra-Gongondy copper-gold deposit is a porphyry copper mineralisation associated with the Boromo Birimian greenstone belt. The mineralisation is hosted by a basic to intermediate intrusive complex. This study highlights the fertile or non-fertile nature of the host rock in a subduction geological environment. The methodological approach consisted of an examination of six drill cores through analysis of lithological features and whole rock geochemical analyses. The petrographic, petrologic and geochemical data revealed a fertile intrusion complex with a dominant dioritic composition characterised by a variety of subvolcanic textures. The sterile facies observed are more fractionated and similar to Andean cordillera adakites. They

are enriched in rare earth elements ($\sum \text{REE} > 100 \text{ ppm}$) and High Field Strength Elements (HSFE), with a depletion of metals (Cu, Pb, Zn). These different data, combined with the fertility diagrams, allow better discrimination of facies with significant mineral potential.

Keywords : *Burkina Faso, porphyry copper, Diénéméra-Gongondy, intrusion complex, diorite, fertility.*

1. Introduction

Les porphyres cuprifères forment des gisements de faible teneur de l'ordre de 0,2 à 1,5 % de cuivre, 50 à 300 ppm de molybdénite et de 0,004 à 0,35 ppm d'or pour de gros tonnages pouvant aller de quelques millions à plusieurs milliards de tonnes de minerais. Ils représentent plus de trois quart de la production mondiale du cuivre, la moitié de celle de la molybdénite et les un cinquième de celle de l'or [1, 2]. Leur occurrence dans des terrains relativement jeunes, notamment du Cénozoïque, du Mésozoïque et du Quaternaire, se justifie par une mise en place en de faibles profondeurs [3]. Toutefois, ils ont été cités dans certains terrains plus anciens, notamment de l'Archéen et du Protérozoïque. C'est l'exemple du porphyre à Cu-Au de Diénéméra-Gongondy, mis en place dans la ceinture de roches vertes birimienne du Burkina Faso. La minéralisation dans cette zone est encaissée par un complexe dioritique formé de plusieurs générations d'injections subvolcaniques de diorite et de microdiorite porphyrique, majoritairement quartziques [4 - 7]. Ce complexe a été subdivisé en intrusions précoce, syn- et post-minéralisation [8]. Les intrusions précoces sont représentées par une ou plusieurs générations d'injections de diorite quartzique à hornblende et de diorite à hornblende. Elles sont recoupées par des intrusions de diorite et d'andésite porphyrique à Diénéméra, et de larges dykes de diorite porphyrique à Gongondy, toutes synchrones de la minéralisation. Les intrusions tardives, post-minéralisations, sont dominées par une andésite porphyrique et une dacite porphyrique sous forme de dykes à Diénéméra et par une andésite à augite, une microdiorite et une rhyolite aphanitique à Gongondy. Cette discrimination pétrographique et pétrologique n'a pas de corolaire sur le plan géochimique d'après les travaux antérieurs dans la zone de Diénéméra-Gongondy [1, 4, 6 - 16]. Les minéralisations de type porphyre cuprifère étant généralement associées aux intrusions de composition adakitique [17 - 23], se traduisant par un appauvrissement en terres rares lourdes (Yb, Lu, Y, etc.) et en HSFE (Zr, Hf, Ta, Nb, etc.), une anomalie positive en Strontium ($\text{Sr} > 400 \text{ ppm}$; pour $\text{Sr}/\text{Y} \geq 20$), en La ($\text{La}/\text{Yb} \geq 20$) et en Eu [20, 24 - 26], pourrait permettre une discrimination géochimique des intrusions de la zone d'étude.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la province du Poni, au Sud-Ouest du Burkina Faso, à 300 km de la capitale Ouagadougou. La province est localisée entre les latitudes $10^{\circ}10'55''\text{N}$ et $10^{\circ}30'51''\text{N}$ et les longitudes $2^{\circ}57'07''\text{W}$ et $3^{\circ}11'53''\text{W}$ et fait frontière avec le Ghana à l'Ouest et la Côte d'Ivoire au Sud (**Figure 1**). Plusieurs sociétés ont effectué des travaux dans la zone d'étude, mais les travaux de la société minière Volta Ressources demeurent les plus importants. La géologie de la zone d'étude se résume en une association de roches volcaniques et volcano-sédimentaires recoupées par des intrusions de nature et de générations différentes [4, 5, 8, 27]. Les roches volcaniques montrent une prédominance de basaltes et d'andésites et se présentent sous forme de coulées massives pyroclastiques, de tufs, de dykes, de dacite et de rhyolite. Les basaltes affleurent à l'Est et au Nord-Est de Gaoua [5, 7, 28]. Tandis que les andésites sont en intercalations dans les volcano-sédiments et les volcanoclastites [7]. Localement, elles montrent des faciès brèchiques, dans

les zones de Diénéméra et de Gongondy. Les intrusions subvolcaniques forment un complexe volcano-plutonique décrit dans les prospectes de Diénéméra, Gongondy, Boussera, Mont Biri et Malba. Le complexe se présente dans cette zone sous forme de pluton allongé suivant une direction N-S en allant de Diénéméra à Gongondy. Il est souvent marqué par une bréchification hydrothermale, porteuse principale de la minéralisation de type porphyre cuprifère [8, 11]. Les diorites quartziques forment de petites intrusions lenticulaires (Diénéméra) ou circulaires (Gongondy) de quelque dizaine à centaine de kilomètre carré. Les microdiorites se présentent également sous forme de petites intrusions dans un encaissant basique. Elles sont plus déformées et fréquemment traversées par des filonnets de microgranites albitiques [4]. La zone est également marquée par la présence de gabbro précoce dans les basaltes et daté à $2171,6 \pm 9,3$ [29] Ma au niveau du prospect de Gongondy. Ce gabbro est recoupé par les intrusions andésitiques et dioritiques bréchiques [7, 28].

2-2. Matériel et méthodes

Cette étude a été réalisée à partir de sondages réalisés par le Projet Minier Gaoua (PMG) de 1982 à 1985 dans les zones de Diénéméra et de Gongondy, dont les carottes sont stockées dans la carothèque de la section régionale du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB) de Bobo Dioulasso.

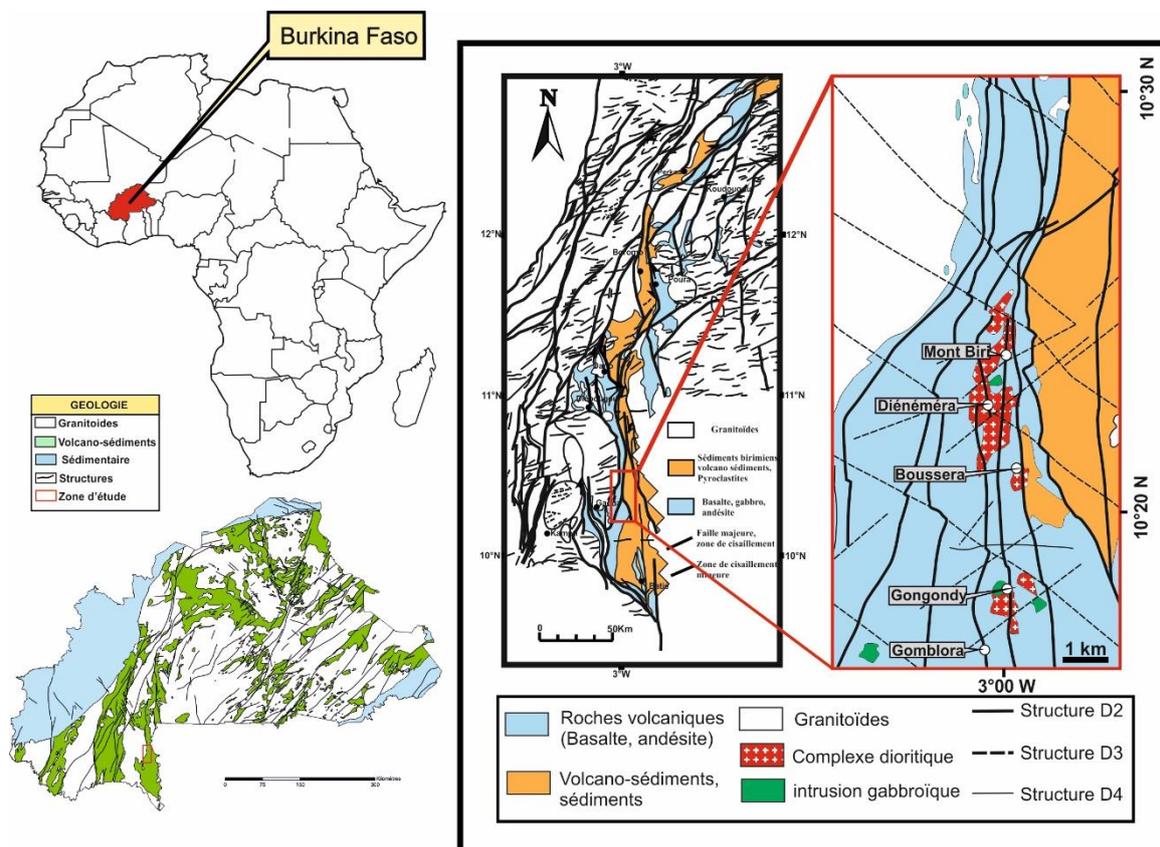


Figure 1 : Carte géologique simplifiée de la ceinture de Boromo situant la zone d'étude [5, 26]

L'étude a porté sur six sondages carottés (Figure 2). Les échantillons prélevés ont fait l'objet de traitement à des fins d'analyses microscopiques et géochimiques. Au total cent dix échantillons ont été prélevés pour des analyses microscopiques aux laboratoires du département des sciences de la Terre de l'Université Joseph KI-ZERBO et du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB). Quant aux analyses géochimiques, elles ont concerné seize (16) échantillons et ont été faites au laboratoire AcmeLabs (Bureau Veritas) au Canada

et au Laboratoire Magmas et Volcans en France par la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP/MS) et la spectrométrie d'émission atomique-plasma à couplage inductif (ICP/AES). Ces données géochimiques ont été complétées par onze (11) autres analyses provenant de travaux antérieurs effectués dans la zone d'étude, par les méthodes ICP/AES sur roche totale pour les majeurs et ICP/MS pour les éléments traces aux laboratoires ALS Chemex en Espagne et Vancouver au Canada [5, 6]. Cette étude a nécessité l'utilisation de matériels techniques appropriés. Pour le géoréférencement et l'élaboration des cartes, le logiciel *ArcMap* de ArcGis a été utilisé. L'ensemble de ces cartes ainsi que les photographies macroscopiques et microscopiques ont fait l'objet d'un traitement à partir du logiciel CorelDraw 15. Les données géochimiques ont été traitées avec le logiciel Geochemical Data Toolkit (GCDKit) version 6.0 associé à la version 3.6 du logiciel R.

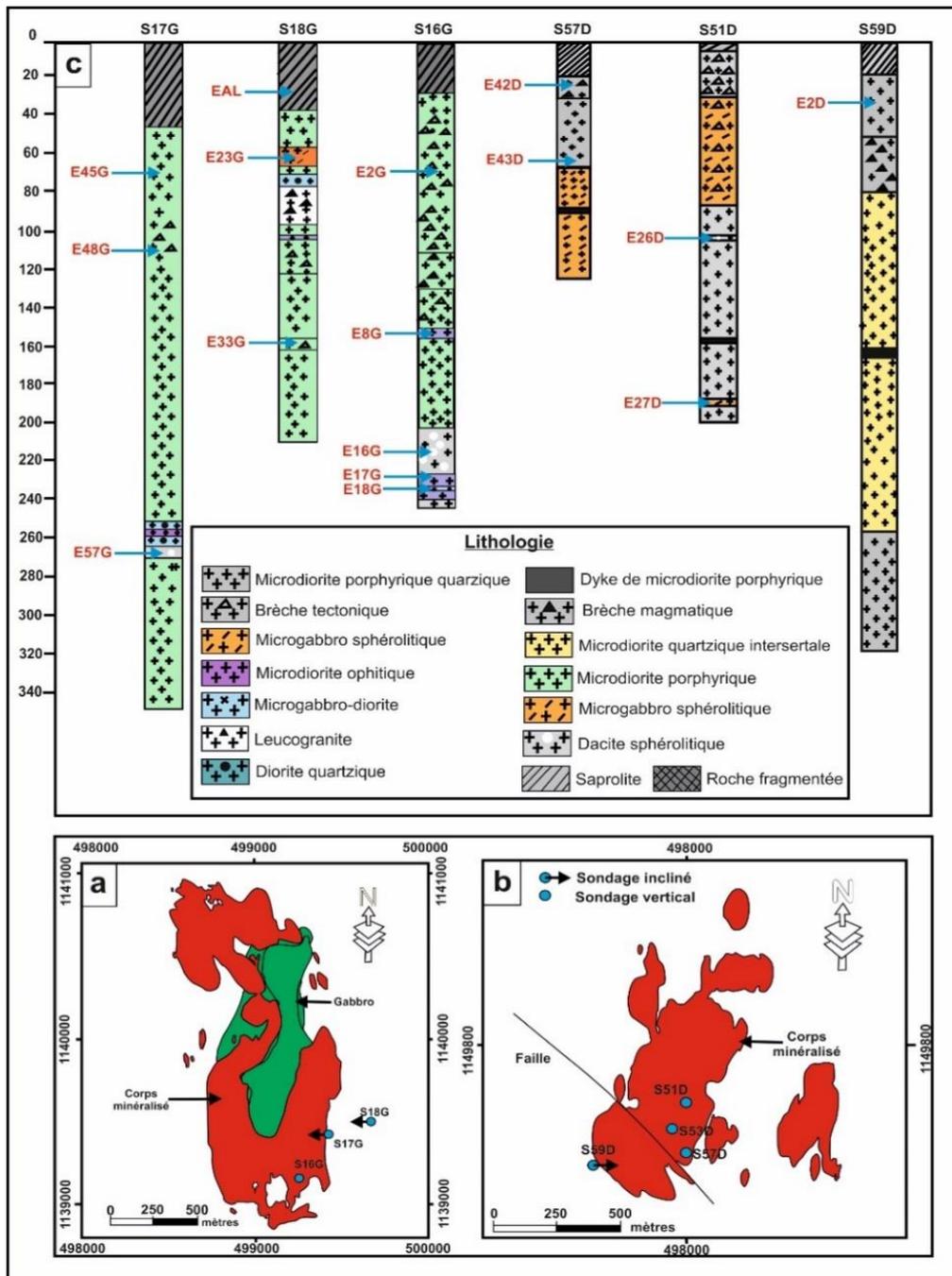


Figure 2 : (a) Corps minéralisé de Gongondy ; (b) Corps minéralisé de Diénéméra ; (c) Localisation des échantillons prélevés et étudiés à travers le log lithologique de quelques sondages étudiés

3. Résultats

3-1. Pétrologie des intrusions

La minéralisation de Gaoua est associée à un complexe volcano-plutonique mise en place sous forme de massif allongé Nord-Sud. Les relations pétrologiques sont assez nettes pour certaines lithologies en carottes permettant de scinder les roches selon la chronologie relative.

3-1-1. Les microdiorites porphyriques (Figure 3a)

Faciès prédominants à Gongondy, ce sont des roches compactes de couleur grise à brunâtre, recoupées par des dykes de natures diverses. La texture est généralement détruite avec un fond microcristallin composé d'abondantes granules d'épidote, de carbonate, de chlorite, de séricite et de reliques d'albite. Quelques rares cristaux arrondis de feldspath potassique sont associés aux phénocristaux de plagioclase dans la roche. Ces derniers sont damouritisés en partie et préservent leurs macles mécaniques. Les anciennes biotites sont remplacées par de petites lamelles de chlorite. Les opaques, automorphes sont disséminés dans la roche.

3-1-2. Les microdiorites porphyriques quartziques (Figure 3b)

Faciès les plus dominants à Diénéméra, elles sont fréquemment recoupées par des dykes de microdiorites porphyriques (*Figure 2*). La roche est de couleur grise à verdâtre avec une texture le plus souvent détruite. Elle se traduit par une mésostase recristallisée et remplacée par une matrice clastique constituée de plagioclase plus ou moins damouritisé (séricite) ou altéré en épidote et carbonate. Le quartz igné (120 à 600 μm) assez abondant ($\approx 20\%$) est associé à des feldspaths potassiques accessoires. Les ferromagnésiens (environ 15 %) constitués de biotite et d'amphibole, se transforment en chlorite. Les phénocristaux de plagioclase sont saussuritisés avec un assemblage à albite-épidote-chlorite-carbonate et actinote. Les rares phénocristaux d'actinote préservés sont partiellement transformés en chlorite, en épidote et plus rarement en carbonate ou en opaques (magnétite).

3-1-3. Les microdiorites quartziques intersertales (Figure 3c)

Elles constituent une variante des microdiorites porphyriques quartziques, se différenciant par une texture primaire intergranulaire avec des espaces ménagés par les charpentes de cristaux tabulaires (910 - 1380 μm) ou en longues baguettes de plagioclases damouritisés (60 - 65 %), et remplis de petites plages (330 à 520 μm) de quartz igné à extinction roulante (15 - 20 %) et de plagioclase altéré. Certaines espaces sont occupées, aux côtés du quartz igné, par des minéraux hydrothermaux constitués de carbonates, de chlorite et de séricite, qui donnent à la roche une texture intersertale. Ces minéraux proviennent de l'altération des ferromagnésiens (amphibole, biotite) réduits à l'état de reliques (10 %). Les opaques (5 à 10 %) assez abondants, sont les produits de déstabilisation des ferromagnésiens aux côtés du quartz secondaire et de la chlorite.

3-1-4. Les microdiorites ophitiques

Avec une texture ophitique, elles sont observées sous forme de dykes centimétriques à métriques dans les microdiorites porphyriques. Cette texture est marquée par une pâte microgrenue ophitique et une structure pseudo trachytique soulignée par une orientation nette des lattes de plagioclase. La mésostase est constituée de microcristaux de plagioclase zoné (160 μm), souvent saussuritisés (albite, carbonate, chlorite), légèrement damouritisés ou déstabilisés en carbonates. Les microcristaux de plagioclase renferment des inclusions d'amphibole aciculaire chloritisée, de petites lattes de plagioclase saussuritisé (chlorite, actinote, carbonate, albite) ainsi que de

la biotite en voie de chloritisation et muscovitisation. Les phénocristaux sont représentés par les plagioclases saussuritisés souvent damouritisés. Ils englobent de l'amphibole en petites sections losangiques ou en baguettes (actinote) ainsi que de la biotite entièrement.

3-1-5. Les microgabbro-diorites

Elles s'observent uniquement à Gongondy et se présentent sous forme de dykes centimétriques à métriques dans les microdiorites ophitiques. La roche présente une texture intersertale avec une mésostase constituée de microcristaux de plagioclase zoné, damouritisé ou déstabilisé en carbonates par devers les cassures des minéraux ou sous forme de pseudomorphes associées aux microcristaux de trémolite zonée. On rencontre dans cette mésostase, des sphérolites mésoperthitiques avec des associations symplectitiques de plagioclase et de feldspath potassique interstitiel. Les phénocristaux sont représentés par des plagioclases plus ou moins damouritisés ainsi que de l'amphibole en prismes losangiques ou en longues baguettes, déstabilisée en carbonates, biotite et opaques.

3-1-6. Les microgabbros sphérolitiques (Figure 3d)

Ce sont des roches qui sont fréquemment au contact des microdiorites porphyriques quartziques. Magnétique, elles se caractérisent par des phénocristaux de plagioclases en baguettes blanches dans un fond verdâtre témoin d'une préservation de la texture. Elle apparaît plus nettement en microscope, sous forme sphérolitique intersertale. Les phénocristaux de plagioclase en longues baguettes ($\approx 1,1$ mm), sont fantomatiques, déstabilisés et recristallisés en carbonate, chlorite et épidote. Ils sont centrés autour d'un nucléus et décrivent des sphérolites unis par une mésostase de microcristaux d'amphibole chloritisée et de plagioclases tabulaires, damouritisés, parfois zonés et saussuritisés (albite, chlorite, épidote, carbonate) ou pseudomorphosés en carbonate zoné. Ces derniers ménagent des espaces remplis par un agrégat de minéraux secondaires (carbonate, chlorite, trémolite, granules d'opaques et de quartz secondaire).

3-1-7. Les dacites sphérolitiques (Figure 3g)

Observés à Gongondy sous formes de dykes recoupant les microdiorites porphyriques, les dacites possèdent une mésostase constituée d'un agrégat de sphérolites de plagioclase et/ou d'orthose entièrement damouritisés ou altérés en carbonates. Les phénocristaux sont des plagioclases dominants, de l'orthose, de l'amphibole. Les sphérolites grossières (55 - 60 %) à plagioclase et d'orthose, avec une microtexture fibro-radiée, ont un caractère poécilitique. Les feldspaths se réduisent à des cristaux fantomatiques damouritisés dans les faciès les plus altérés. Les phénocristaux d'amphibole (5 - 10 %) sont remplacés par un agrégat de carbonates, d'opaques, de reliques de trémolite et d'actinote. Les phénocristaux de biotite (15 - 20 %), sont pseudomorphosés en lamelles de muscovite et de chlorite. Les sulfures (< 5 %) forment de fins cristaux disséminés dans la roche.

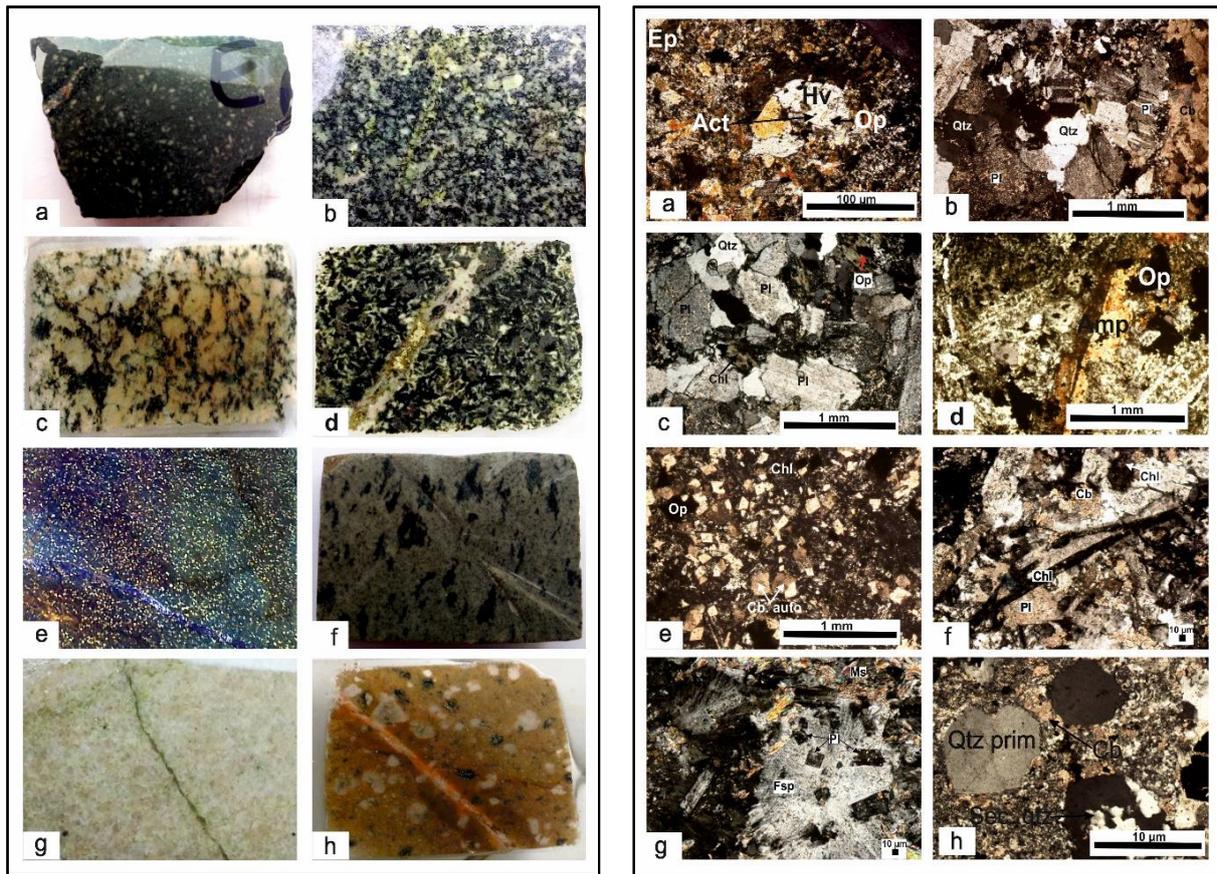


Figure 3 : Observations macroscopique et microscopique des intrusions de la zone d'étude. (a) Microdiorite porphyrique ; (b) Microdiorite porphyrique quartzique ; (c) Microdiorite intersertale ; (d) Microgabbro sphérolitique (Diénéméra) ; (e) Microgabbro (Gongondy) ; (f) Microdiorite ophitique ; (g) Dacite sphérolitique ; (h) Dyke tardif de microdiorite (Diénéméra)

3-2. Études géochimiques

3-2-1. Éléments majeurs

Les teneurs en silice sont dans l'ensemble fonction de la nature pétrographique des roches, plus faibles (44 à 50 % de SiO_2) dans les termes basiques (microgabbros) et relativement élevées dans les autres termes de composition neutre à acide ($50 \leq \text{SiO}_2 \leq 75 \%$). Les microgabbros et microgabbro-diorites ont des teneurs moyennes en alumine plus faibles ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 11,5 \%$) que les autres types de roches identifiés. Ils s'en distinguent par leur caractère ferrifère avec des valeurs en FeO_t supérieures à 16 %. La quantité de MgO est variable au sein des microdiorites (2,3 à 6,21 %) et dans les faciès basiques avec des pourcentages compris entre 3,84 et 6,51 %. Les teneurs en titane ($\text{TiO}_2 \leq 0,5 \%$) sont faibles au niveau des deux faciès à l'exception des microgabbros ferrifères où elle atteint 2%. La perte au feu (LOI) varie de 1,9 % à 12,65 % en fonction de l'intensité de l'altération hydrothermale.

3-2-2. Éléments traces et terres rares

Les teneurs en éléments traces varient en fonction des lithologies. Les fortes valeurs en Y (supérieures à 100 ppm) sont observées dans les microgabbros, les microgabbro-diorites et les microdiorites ophitiques. Les formations basiques montrent également les plus fortes valeurs en Zr entre 15,7 à 43,9 ppm. La somme des terres rares ($\sum \text{REE}$) est plus importante spécifiquement dans les microdiorites ophitiques et les microgabbro-

diorites, comprise entre 122 et 142,25 ppm, suivies des microgabbros avec des valeurs disparates comprises entre 21,75 et 76,65 ppm. La teneur en Sr est variable au sein d'un même groupe pétrographique et d'un groupe à l'autre : les microdiorites porphyriques quartziques et les microdiorites ophitiques et microgabbro-diorites sont les faciès relativement riches en Sr (247,7 à 496,2 ppm) soit huit fois les teneurs des dacites, des microgabbros et des microdiorites porphyriques. Dans certains échantillons de microdiorite, de microgabbro, les teneurs en cuivre (Cu) sont importantes et comprises entre 1000 et 10000 ppm, exception faite des microdiorites ophitiques où les teneurs sont inférieures à 100 ppm. Il en est de même des microgabbro-diorites et des dacites. Le plomb (Pb) n'est pas détecté dans la majorité des échantillons, par contre le zinc (Zn) est présent en quantité négligeable avec des teneurs comprises entre 2 à 150 ppm.

3-2-3. Classification des intrusions

L'étude pétrographique montre une diversité de faciès au sein du complexe intrusif de la zone d'étude. Ces faciès sont dominés par les roches subvolcaniques, subordonnées par un faciès volcanique représenté par les dacites. Le faciès subvolcanique associe des roches basiques à neutre dont des microgabbros, microgabbro-diorites et des microdiorites. Ces dernières constituent les faciès types de la zone d'étude. Le caractère pétrochimique [30] de ces roches est exprimé par la **Figure 4a**. En effet, les microgabbros se retrouvent sur le champ des basaltes, tandis que le champ des andésites est occupé par les roches de compositions microdioritiques. Le champ des rhyolites/dacites est occupé par les dacites. Cette classification confirme les déterminations pétrographiques.

3-2-4. Affinité magmatique

Deux groupes de roches d'affinité géochimique différente sont distingués à travers la **Figure 4b** [31]. L'un tholéitique, défini par les microgabbros, l'autre calco-alkalin impliquant les microdiorites et les dacites. Les variations du rapport La/Yb versus Yb [20] discriminent également deux groupes de roches au sein des roches calco-alkalines. L'un, d'affinité adakitique (microdiorite, microgabbro-diorite) caractérisé par un rapport La/Yb > 20, et l'autre calco-alkalin normal se distinguant par un rapport La/Yb compris entre 0 et 10 (**Figure 4c**). Le diagramme montre en outre que les dacites sont exclusivement de source calco-alkaline tandis que les microdiorites appartiennent aux deux groupes à la fois.

3-2-5. Contexte Géodynamique

Les roches ignées sont élaborées dans des contextes géotectoniques variés qui sont déterminés en fonction de leur composition géochimique. Dans le diagramme de discrimination géotectonique [32], les microgabbros montrent des affinités pour les MORB des zones de distension. Les microdiorites et les dacites occupent le domaine des basaltes calco-alkalins orogéniques (**Figure 4d**). Le diagramme des terres rares normalisé à la chondrite [33] montre certains faciès de dacite avec des anomalies négatives en Eu causées par le fractionnement des plagioclases et d'autres sont exemptes et s'en distinguent par un léger enrichissement en terres rares légères et lourdes (**Figure 4e**). Les microdiorites sont des faciès différenciés avec des profils presque confondus, probablement cogénétiques. Les microdiorites ophitiques et les microgabbro-diorites sont par contre nettement distincts des précédents. Ils ont tous en commun l'enrichissement en terres rares légères et des terres rares lourdes appauvries. Les microgabbros ont des spectres similaires aux microdiorites, bien que certains faciès recoupent en outre les profils des microdiorites. Il s'agirait de faciès différents non co-génétiques. Le diagramme multi élémentaire normalisé par rapport au MORB [34] révèle de nettes anomalies négatives en Nb dans les microdiorites et microgabbros, moins prononcées dans les dacites. Le Ti et le P sont reliés à des anomalies négatives, fortes dans les dacites, modérées dans les microdiorites, sans

doute causées par les teneurs relatives de l'apatite et des oxydes de titane. L'enrichissement en éléments lithophiles est commun à tous les faciès et n'exclut pas les effets des processus d'altération hydrothermale qui ont affecté les différentes roches (*Figure 4f*).

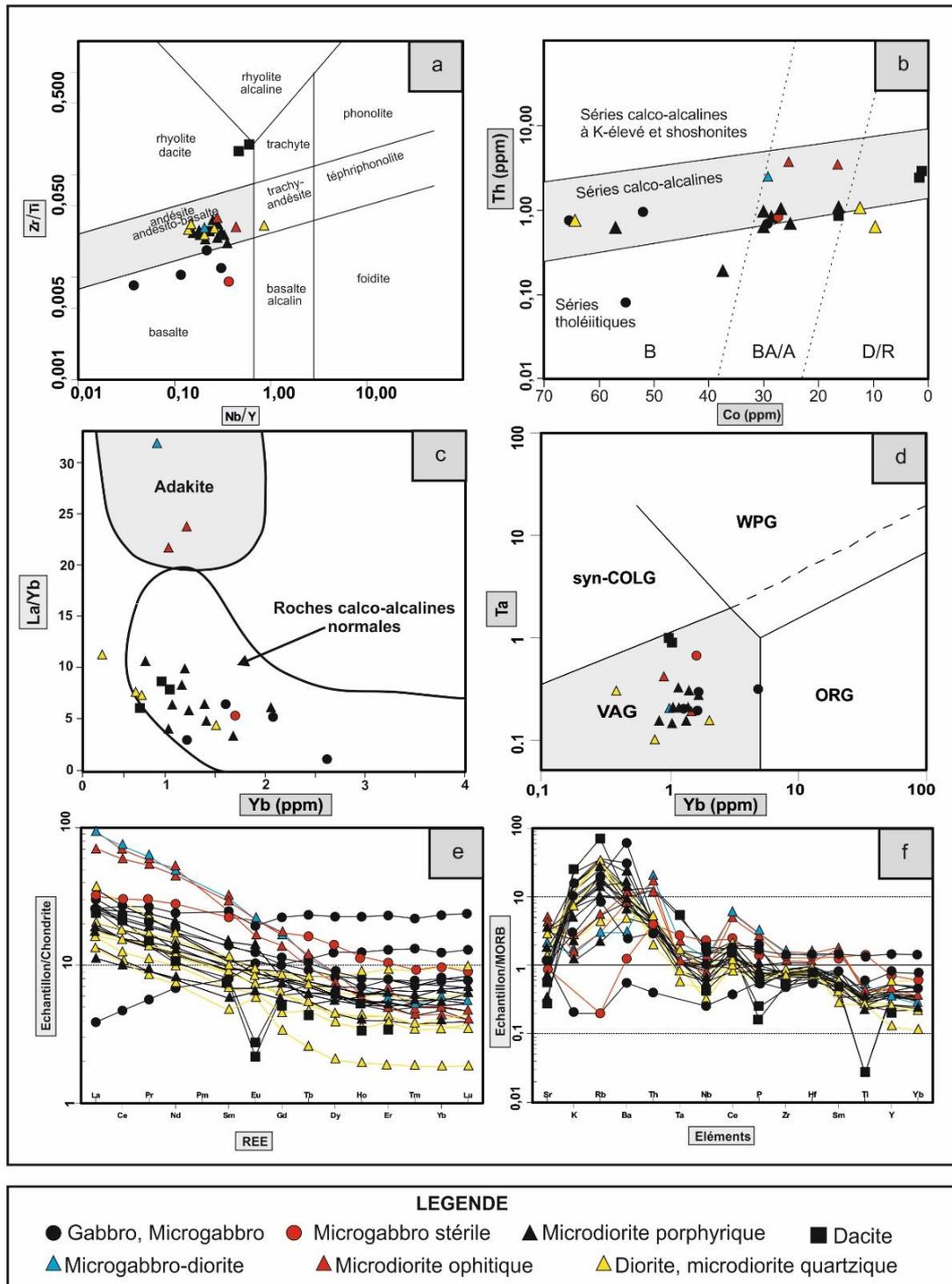


Figure 4 : Diagrammes de discriminations géochimiques du complexe filonien de Diénéméra-Gongondy. (a) Diagramme de classification pétrochimique des intrusions [28] ; (b) Diagramme de mise en évidence de l'affinité magmatique [31] ; (c) Diagramme de discrimination des roches adakitiques des roches calco-alcalines normales [18] ; (d) Diagramme de discrimination du contexte géotectonique [32] ; (e) Diagramme des terres rares normalisés à la chondrite [33] ; (f) Diagramme multi élémentaire normalisé au MORB [34]

Tableau 1 : Données d'analyses géochimiques du complexe intrusif de la zone de Diénéméra-Gongondy

Echantillon Intrusion	E2G	E45G	E48G	E33G	EAL	B1	21-08	E2D	E43D	E42D	E8G	E17G	E18G	
	Microdiorite porphyrique							Microdiorite porphyrique quartzique			Microdiorite ophitique		Microgabbro- diorite	
Eléments majeurs (%)														
SiO ₂	59,37	60,19	61,28	55,85	58,12	58	57,7	60,45	62,43	59,17	54,55	56,46	49,64	
Al ₂ O ₃	15,08	13,38	16,05	13,08	11,23	15,3	15,6	15,26	15,7	14,26	13,61	15	11,84	
Fe ₂ O ₃	8,12	9,69	7,64	8,86	20,23	7,6	9,38	7,15	7,12	13,61	6,55	5,68	6,98	
CaO	2,14	0,3	0,58	5,02	0,22	7,31	4,89	6,15	3,35	2,42	5,76	4,77	7,54	
MgO	4,59	2,06	4,03	2,32	2,02	4,35	4,03	3,16	2,3	1,1	6,21	3,62	6,51	
Na ₂ O	3,6	2,99	3,64	0,84	0,19	3,85	3,6	3,85	4,57	4,87	3,76	5,63	3,33	
K ₂ O	1,07	1,4	1,8	3,39	1,04	0,35	1,12	0,34	1,83	1,17	0,22	0,24	0,39	
Cr ₂ O ₃	0,019	-	-	-	-	0,03	0,02	0,01	0,009	-	0,044	0,005	0,036	
TiO ₂	0,49	0,46	0,53	0,35	0,37	0,5	0,54	0,44	0,39	0,41	0,76	0,64	0,6	
MnO	0,04	0,06	0,03	0,06	0,06	0,09	0,18	0,06	0,02	0,03	0,1	0,08	0,14	
P ₂ O ₅	0,09	0,11	0,12	0,06	0,1	0,07	0,09	0,09	0,08	0,09	0,35	0,36	0,32	
LOI	5	7,96	4,11	9,36	5,44	2,2	2,65	2,9	1,9	2,68	7,9	7,3	12,4	
Eléments traces (ppm)														
Ni	42	-	-	-	-	-	-	35	24	-	150	31	131	
Sc	20	12,4	16,9	17,5	16,6	-	-	15	12	13,8	16	13	21	
Ba	130	135,87	163,46	457,48	185,31	166,5	323	94	139	260,18	60	163	222	
Be	2	0,58	0,68	0,67	0,45	-	-	<1	<1	0,61	<1	<1	1	
Co	28,2	94	103,49	75,8	56,9	62	27,2	12,3	9,5	444,32	25,1	16,7	29,4	
Cs	1,2	1,55	1,8	1,96	1,84	1,43	1,25	0,5	2,3	1,66	0,6	0,4	1,2	
Ga	14,4	14,9	20,1	13	16,4	17,2	16,4	15,1	15,2	17,1	14,3	16	13,7	
Hf	1,8	1,78	2,58	1,71	1,56	2,1	2,3	1,6	1,8	1,82	3,3	3,6	2,7	
Nb	2,2	2,96	3,57	2,09	2,04	1,8	3,5	1,6	1,1	2,47	4,5	3,8	2,7	
Rb	27,2	38,4	51	70	20,3	10,6	29,4	9	67,2	42,6	6	6	10,6	
Sr	81,9	92,2	81,8	92,8	40,9	371	207	482,7	160,2	324,76	247,7	576	496,2	
Ta	0,3	0,19	0,26	0,15	0,14	0,2	0,2	0,1	<0,1	0,15	0,4	0,2	0,2	
Th	0,8	0,83	1,06	0,8	0,59	0,61	0,94	1	0,6	0,39	3,9	3,3	2,4	
U	1,1	0,86	1,4	0,57	0,44	0,22	0,42	0,4	0,5	1,12	1,2	1,4	0,7	
V	158	101,43	122,71	111,64	120,06	145	162	111	112	124,72	96	105	118	
W	1,3	4,1	1,77	9,45	2,93	218	1	0,8	<0,5	2,06	0,7	0,6	<0,5	
Zr	69,5	68,7	98,9	66,4	60,9	80	75	65,5	72,6	69,7	135,8	141,8	105,3	
Y	10,7	16,2	12,4	7,83	11,4	11,6	12,5	7,9	7,3	17,2	10,4	13,6	13,2	
La	8,8	5,65	4,24	7,95	3,49	6,3	8	5,1	5	10,9	29,2	28,3	21,8	
Ce	16,1	12,6	8,84	20,1	8,03	14,5	17,3	12,1	10,1	23,3	56,1	59,4	48,1	
Pr	2,13	1,67	1,11	2,9	1,11	1,98	2,31	1,72	1,35	2,79	7,11	7,55	6,52	
Nd	7,7	7,32	4,69	12,8	4,84	8,7	10,2	6,9	6	10,4	30,2	28,3	27,4	
Sm	1,96	1,81	1,13	2,88	1,33	2,16	2,07	1,72	1,33	1,94	4,82	5,99	5,68	
Eu	0,6	0,68	0,47	1,03	0,5	0,71	0,8	0,54	0,46	0,63	1,21	1,6	1,6	
Gd	2,03	2,34	1,47	2,09	1,83	2	2,46	1,57	1,18	2,22	3,62	4,51	4,31	
Tb	0,34	0,39	0,24	0,26	0,3	0,33	0,36	0,26	0,22	0,39	0,46	0,54	0,56	
Dy	2,24	2,68	1,8	1,43	1,94	1,93	2,23	1,35	1,23	2,72	2,39	2,8	2,86	
Ho	0,44	0,58	0,42	0,29	0,4	0,36	0,5	0,31	0,25	0,62	0,42	0,49	0,44	
Er	1,3	1,67	1,41	0,83	1,13	1,19	1,38	0,89	0,81	1,99	1,03	1,21	1,4	
Tm	0,19	0,24	0,23	0,12	0,16	0,18	0,21	0,12	0,11	0,3	0,14	0,17	0,16	
Yb	1,16	1,5	1,66	0,8	1,04	1,17	1,38	0,76	0,72	2,03	0,92	1,21	1,02	
Lu	0,2	0,22	0,27	0,13	0,15	0,17	0,2	0,11	0,12	0,31	0,13	0,18	0,15	
Mo	7	0,83	12,3	4,92	1,21	1	-	0,2	13	17,4	0,2	<0,1	0,1	
Cu	2128,2	200,65	1100,27	46,2	411,69	9	38	101,3	1156,6	10066,16	37,9	10,7	7,1	
Pb	0,7	2,05	2,5	4,08	1,56	-	23	0,4	0,4	2,29	1	1,6	2,5	
Zn	43	56,5	50,3	7,16	47,8	34	300	17	16	23,7	70	65	67	
Ag	0,6	0,26	0,48	0,22	2,23	-	-	<0,1	0,2	2,62	<0,1	<0,1	<0,1	
Ni	42	70,9	55,1	26,6	37,8	63	51	32,4	25,1	25,8	144,4	29,4	131,7	
As	0,9	10,1	22,2	29	144,56	0,3	3,4	<0,5	1,2	11,1	3	1,9	1,7	
Au	0,0812	0,8	0,16	0,21	0,498	-	-	0,0078	0,0273	0,38	0,002	0,0019	0,0029	
Sb	1,6	10,2	5,11	49,9	5,65	0,05	0,06	0,8	1,2	13,8	0,7	0,8	1,3	
Bi	<0,1	0,14	0,29	0,59	7,43	0,01	0,03	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	
Hg	0,04	-	-	-	-	0,173	0,045	<0,01	0,01	-	<0,01	<0,01	<0,01	
Tl	<0,1	0,14	0,17	0,24	0,08	-	-	<0,1	<0,1	0,18	<0,1	<0,1	<0,1	
Se	2,3	3,86	4,89	2,18	1,06	0,2	0,2	<0,5	<0,5	1,88	<0,5	<0,5	<0,5	
Te	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	
Cr	-	-	-	-	-	260	110	-	-	-	-	-	-	
Echantillon Intrusion	E27D	E23G	G5	G6	B2	G1	G3	B3	M2	D1	D2	E26D	E16G	E57G
	Gabbro, microgabbro					Diorite porphyrique				Diorite quartzique		Dacite sphérolitique		
Eléments majeurs (%)														

SiO2	49,42	44,28	55,3	51,1	49,7	49,5	57,2	61,6	62,4	60,1	57,6	56,75	78,47	76,95
Al2O3	11,27	11,02	13,15	11,35	13,25	11,5	14,45	15,95	14	14,45	14,3	14,42	13	13,1
Fe2O3	18,93	16,51	9,4	10,8	15,3	8,33	8,33	7,72	6,34	9,77	6,82	7,13	1,17	1,29
CaO	5,89	7,61	6,84	7,14	9,57	6,7	4,16	3,01	5	2,11	5,09	7,09	0,56	0,59
MgO	3,84	5,09	5,64	9,66	6,38	5,83	3,9	3,19	2,97	2,25	3,47	2,31	0,36	0,35
Na2O	3,14	1,66	2,41	2,24	1,72	0,76	2,75	4,13	4,34	3,47	4,02	1,12	1,55	3,26
K2O	0,43	0	2,31	1,52	0,03	2,23	1,11	0,74	0,17	1,7	1,03	3,69	2,4	2,27
Cr2O3	0	0,009	0,03	0,06	0,01	0,06	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,015	0	0
TiO2	2,05	2,16	0,63	0,56	0,81	0,42	0,48	0,43	0,33	0,39	0,45	0,38	0,04	0,04
MnO	0,07	0,32	0,16	0,14	0,22	0,08	0,06	0,04	0,05	0,01	0,05	0,04	0,02	0,04
P2O5	0,2	0,17	0,23	0,21	0,07	0,1	0,11	0,12	0,06	0,07	0,08	0,07	0,03	0,02
LOI	4,4	11	2	2,78	2,67	12,7	6,77	3,04	2	2,8	2,28	6,8	2,3	2
Éléments traces (ppm)														
Ni	32	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	<20	<20
Sc	39	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	2	3
Ba	49	25	621	1235	11,1	272	189,5	194	97,1	208	150,5	204	250	192
Be	<1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<1	1	<1
Co	30,1	27,7	65	52	54,9	28	30	16,3	90	108	64	16,3	0,5	1
Cs	1,1	0,3	1,01	1,64	0,25	1,81	1,07	0,42	0,16	1,35	1,41	7,2	4	2,7
Ga	15,7	18	14,9	12,1	14,6	14,4	17,1	17,3	14,9	20,2	16,6	14,1	12,8	13,2
Hf	3,5	3,1	1,4	1,6	1,4	1,5	2	2,1	1,9	2,2	2,3	1,8	2	2
Nb	5,1	7,9	4,9	3,4	0,9	3,6	4	3,1	2,1	3,2	2,9	1,5	5,5	6,5
Rb	17,5	0,4	72,4	39,1	0,4	66,7	31,7	20,9	4,3	65,1	39,7	142,9	59,7	61,5
Sr	127,8	109,9	324	139,5	131,5	78,1	120,5	379	441	253	388	69,8	96,5	35,4
Ta	0,3	0,5	0,2	0,3	-	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	<0,1	1	0,9
Th	0,6	0,8	0,76	0,95	0,08	0,81	0,92	0,97	0,77	1	0,8	0,8	2,7	2,5
U	0,9	0,3	0,34	0,71	<0,05	0,4	0,65	0,23	0,31	0,4	0,47	0,4	1,7	2
V	437	350	213	217	309	130	146	124	92	123	120	108	<8	<8
W	2,5	2,6	224	69	-	19	26	1	367	247	253	1,5	1,1	<0,5
Zr	129,3	116,7	46	61	40	52	71	69	70	73	78	62,1	39,7	45,9
Y	43,9	21,5	16	15,7	23,8	10,2	12,2	10,1	7,9	3,8	11,2	6,5	11,8	10,8
La	8	9,8	9,4	8,2	1,2	11,1	5,9	6,1	5,4	4,1	6,3	4,2	7,8	7,7
Ce	21,8	24,5	19,3	18,1	3,8	21,9	12,5	12,6	12,7	8,5	14,7	9,8	14,6	17
Pr	3,24	3,63	2,62	2,38	0,69	2,71	1,63	1,8	1,71	1,03	2,06	1,38	1,69	1,84
Nd	14,4	16,8	11,1	10,4	4,1	10,5	7,1	8,1	7,5	4,4	9,1	6,3	6,2	6,4
Sm	4,79	4,37	2,67	2,72	1,55	2,16	1,79	1,87	1,73	0,92	2,23	1,48	1,58	1,46
Eu	1,42	1,57	0,92	0,9	0,76	0,64	0,53	0,66	0,54	0,43	0,68	0,41	0,2	0,16
Gd	5,8	4,47	2,92	2,62	2,62	2,11	2,04	1,94	1,62	0,87	2,23	1,32	1,63	1,57
Tb	1,11	0,77	0,49	0,44	0,53	0,35	0,36	0,29	0,24	0,12	0,35	0,21	0,34	0,3
Dy	7,29	4,49	2,88	2,69	4	1,93	2,22	1,79	1,46	0,66	2,05	1,22	1,97	2,02
Ho	1,63	0,83	0,58	0,5	0,89	0,39	0,45	0,37	0,3	0,14	0,43	0,25	0,39	0,37
Er	4,84	2,2	1,64	1,64	2,72	1,11	1,32	1,06	0,9	0,4	1,28	0,74	1,06	0,99
Tm	0,71	0,3	0,23	0,25	0,43	0,16	0,19	0,17	0,12	0,06	0,18	0,12	0,14	0,16
Yb	4,85	2,06	1,58	1,68	2,59	1,19	1,41	1,07	0,85	0,38	1,23	0,75	0,98	1,04
Lu	0,77	0,29	0,25	0,25	0,42	0,18	0,22	0,17	0,14	0,06	0,2	0,14	0,13	0,15
Mo	1,2	0,3	1	2	-	1	1	-	1	1	1	0,5	<0,1	0,2
Cu	1012,9	71,8	104	1960	161	753	1305	1620	204	868	160	388,8	4,3	3,6
Pb	1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	1,5	1,4
Zn	33	59	116	68	98	25	31	24	20	18	30	20	11	8
Ag	0,3	<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1
Ni	31,5	66,8	31	61	53	76	54	38	32	28	44	31	1,4	1,1
As	1,1	1,7	0,7	0,5	0,8	0,6	0,6	0,7	1	0,6	0,5	0,7	4,1	3,3
Au	0,033,9	0,004,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0279	0,0072	0,0007
Sb	1,1	0,9	0,05	0,05	0,17	0,17	0,11	0,12	0,05	0,09	0,12	0,6	0,7	0,5
Bi	0,3	<0,1	0,02	0,54	0,01	0,03	0,08	-	0,01	0,86	0,03	0,1	<0,1	<0,1
Hg	0,01	<0,01	0,14	0,074	0,011	0,02	0,048	0,012	0,3	0,212	0,215	<0,01	0,1	0,02
Tl	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1
Se	0,6	<0,5	0,2	0,3	0,5	0,6	2	-	0,2	0,6	0,2	<0,5	<0,5	<0,5
Te	-	-	0,01	0,04	0,04	0,02	0,06	0,02	0,01	0,07	0,01	-	-	-
Cr	-	-	250	480	40	440	160	90	200	150	170	-	-	-

4. Discussion

4-1. Fertilité des intrusions subvolcaniques

Au regard de la perte au feu (LOI) assez importante observées dans l'ensemble des échantillons étudiés, la définition de la fertilité des intrusions subvolcaniques a été faite à partir des éléments immobiles, notamment avec les éléments à petit rayon ionique et à charge élevée et les terres rares. Le diagramme covariant Zr versus Y [35] permet de définir un champ de fertilité des intrusions porphyriques. Dans ce diagramme, les intrusions de compositions dioritiques et dacitiques, tombent dans le champ de fertilité, exception faite des microdiorites ophitiques, des microgabbro-diorites et des microgabbros (*Figure 5a*). Les mêmes observations prévalent dans le diagramme MnO versus Y [34] (*Figure 5b*).

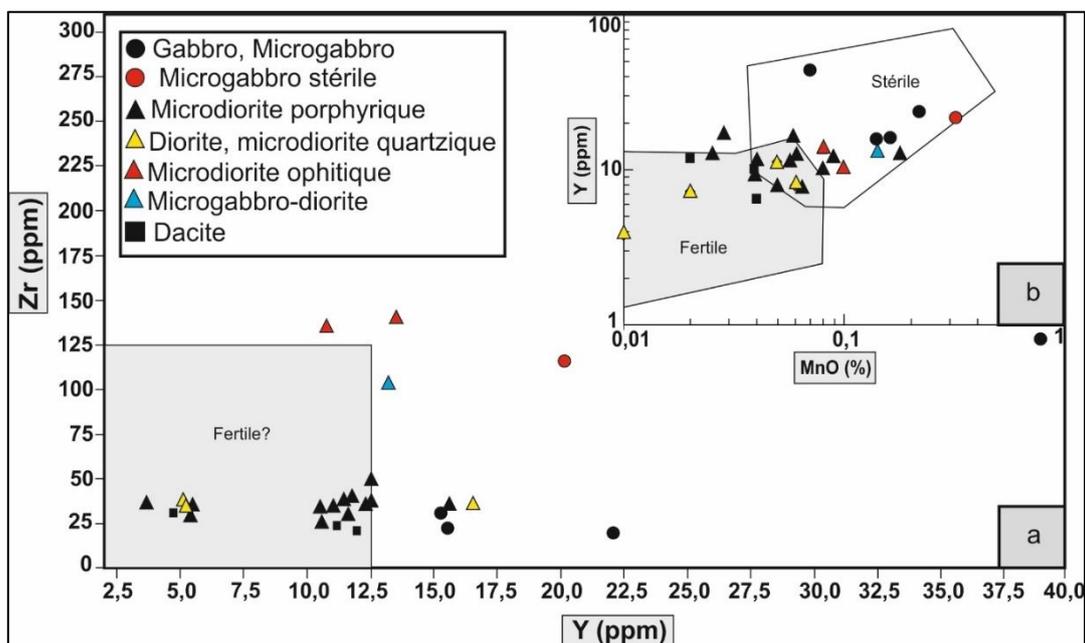


Figure 5 : Diagrammes de fertilité des intrusions subvolcaniques des gisements de porphyre Cu de Diénnéméra-Gongondy. (a) Diagramme de fertilité Y versus Zr [35] ; (b) Diagramme de fertilité MnO versus Y [36]

Les diagrammes de fertilité permettent de montrer que les microdiorites ophitiques, les microgabbro-diorites et les microgabbros ne sont pas fertiles en terme de possibilité de concentration de métaux de base. En utilisant les diagrammes La/Yb versus \sum REE et Zr versus \sum REE le fractionnement des microdiorites ophitiques est net comparativement aux autres formations (*Figure 6a*). Dans le diagramme Zr versus \sum REE, en plus des microdiorites ophitiques, des gabbros et microgabbros se démarquent également des autres faciès par un relatif enrichissement en Zr confirmé, non seulement par un net fractionnement, mais traduit également un faible lessivage hydrothermal de ces faciès, (*Figure 6b*). Le fort fractionnement pétrogénétique des mêmes roches est clairement exprimé dans le diagramme Hf versus Zr [33] (*Figure 6c*). Deux tendances s'observent dans le diagramme La/Yb versus Sr/Y (*Figure 6d*). D'une part les roches stériles d'affinité adakitique, représentées par un fort rapport La/Yb en corrélation avec le rapport Sr/Y et d'autre part les roches propylitisées et fertiles avec un fort rapport Sr/Y pour un faible rapport La/Yb. En définitive, la *Figure 6e* confirme le fort enrichissement en REE des microdiorites ophitiques, des microgabbro-diorites et de certains faciès gabbroïques, corrélativement avec une distribution en LILE-HSFE négative.

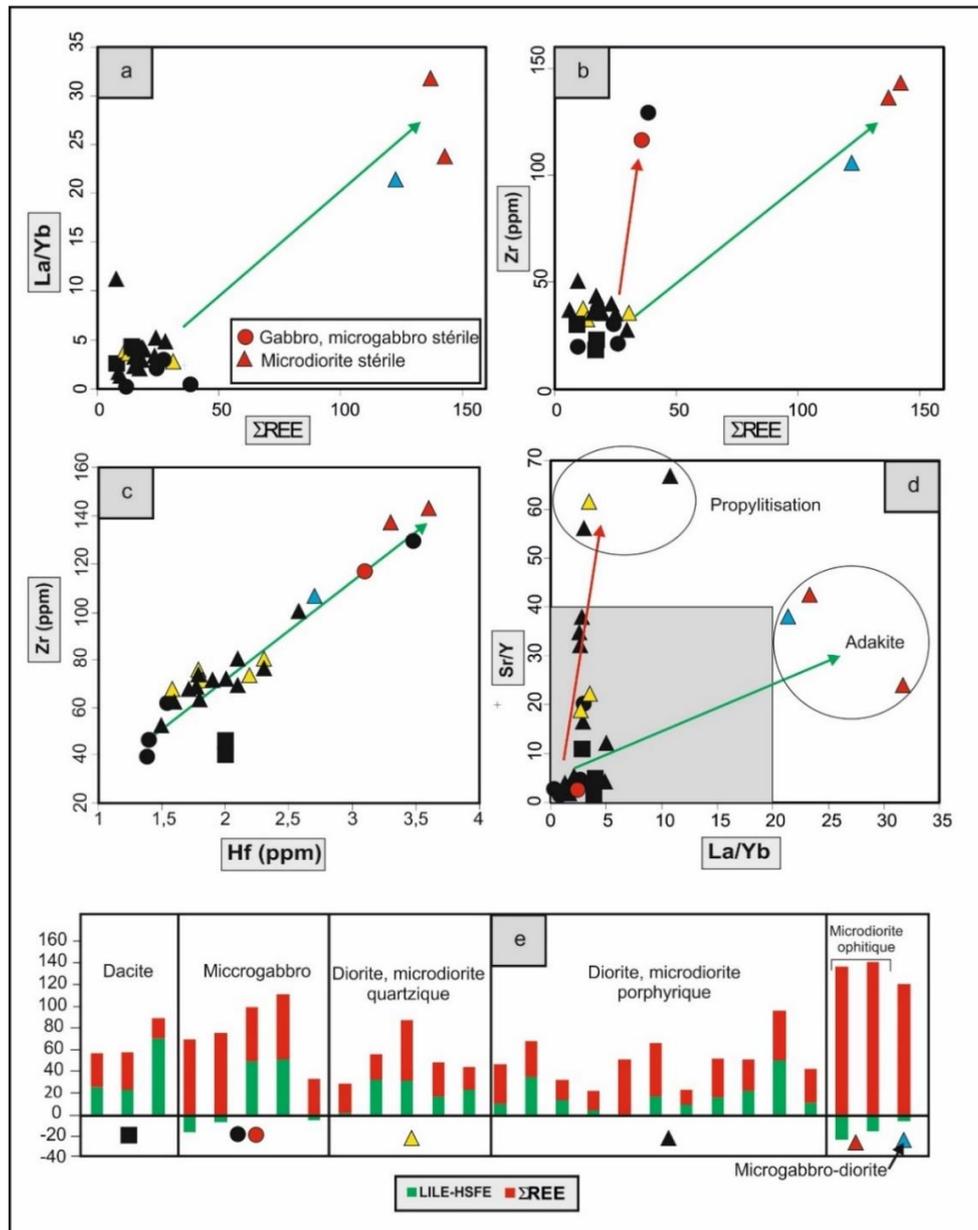


Figure 6 : Diagrammes de discrimination géochimique des intrusions fertiles. (a) Diagramme (ΣREE) versus La/Yb ; (b) Diagramme (ΣREE) versus Zr ; (c) Diagramme Hf versus Zr [33]; (d) Diagramme La/Yb versus Sr/Y ; (e) Diagramme montrant la distribution et proportions relatives des REE et de celle de la différence LILE-HSFE des intrusions des gisements porphyriques Cu de Diénéméra-Gongondy

4-2. Implication géochimique de la minéralisation porphyrique de Diénéméra-Gongondy

Ces travaux montrent que les gisements du porphyre Cu-Au de Diénéméra-Gongondy sont associés aux formations birimiennes de la ceinture de roches vertes de Boromo. La minéralisation est encaissée par un complexe intrusif subvolcanique composé de plusieurs intrusions. En effet, les intrusions des gisements de Diénéméra et de Gongondy ont un caractère bimodal, avec une affinité calco-alcaline prédominante définie par les roches neutres et intermédiaires, et une affinité tholéiitique attribuée aux roches de composition basique représentée par les microgabbros. Au sein des formations calco-alcalines, des roches fortement fractionnées ($La/Yb > 20$) représentées par les microdiorites ophitiques et les microgabbro-diorites apparentées aux adakites décrites dans la Cordillère des Andes [24 - 26, 37, 38], mais se démarquent

toutefois des autres faciès par leur fort enrichissement en REE ($\sum \text{REE} > 100$ ppm) et en HSFE (Zr, Hf). L'enrichissement en Zr est induit par la présence dans ces roches, de minéraux accessoires tel que le zircon, tandis que son appauvrissement pourrait être en lien avec l'hydrothermalisme intense, phénomène similaire observé à Ok Tedi [37]. L'utilisation du diagramme Sr/Y versus Y étant difficile dans la discrimination des roches altérées et adakites ($\text{LOI} > 3$) [40 - 42], le diagramme du rapport La/Yb versus Sr/Y semble par contre plus déterminante. Cette étude montre en outre que les roches subvolcaniques ayant un fort fractionnement, particulièrement les microdiorites ophitiques et les microgabbros-diorites, sont stériles. Ces résultats sont ainsi en accord avec la pauvreté en éléments métalliques de ces faciès confirmés par certains travaux antérieurs [6]. Elles sont cependant contraires à certaines études [17-23, 43], mais assimilables en partie à celles obtenues en Chine sur des adakites [44].

5. Conclusion

L'étude pétrologique, pétrographique et géochimique a permis de faire une ségrégation du complexe intrusif subvolcanique de la zone d'étude, porteur de la minéralisation Cu-Au des gisements de porphyre de Diénéméra-Gongondy dans la ceinture de roches vertes de Boromo. Il est établi que certains faciès sont fertiles tandis que d'autres s'avèrent stériles. Les intrusions minéralisées se caractérisent par une faible proportion en REE généralement inférieure à 100 ppm, un enrichissement en LILE au détriment des HSFE. Elles s'en distinguent des intrusions stériles par un faible fractionnement, dont certaines de ces dernières ont une composition adakitique. Le diagramme Sr/Y versus La/Yb a permis de discriminer ces faciès des intrusions minéralisées à altération propylitique. Ces dernières ont des valeurs en cuivre supérieures à 100 ppm, contrairement aux faciès stériles dont la valeur en cuivre est généralement inférieure à 100 ppm. Ces caractéristiques peuvent servir de guide dans la prospection de la minéralisation de Cu-Au de Diénéméra-Gongondy.

Références

- [1] - R. H. SILLITOE, *Bulletin of the Society of Economic geologists*, Vol. 105, (2010) 3 - 41 p.
- [2] - J. H. DILLES et D. A. JOHN. *Encyclopedia of Geology, Elsevier*, Ed. (2019) 20 p.
- [3] - R. H. SILLITOE, F. A. M. DEVINE, M. I. SANGUINETTI et R. M. FRIEDMAN, *Bulletin of the Society of Economic geologists*, Vol. 114, N°3 (2019) 407 - 425 p.
- [4] - P. E. GAMSONRE, "Etude pétrologique et métallogénique de la région de Gongondy, Diénéméra et Malba" Thèse de 3e cycle. Univ. Besançon, Fr., (1970) 249 p.
- [5] - S. NABA, Volta Resources, Ouagadougou, Burkina Faso, (2010) 64 p.
- [6] - A. NARE, "Métallogénie du cuivre-or de Gaoua, Sud-Ouest du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest." Master prof. non publié de l'université de Toulouse, (2011) 56 p.
- [7] - L. BARATOUX, V. METELKA, S. NABA, P. OUIYA, L. SIEBENALLER, M. W. JESSELL, A. NARE, S. SALVI, D. BEZIAT & G. FRANCESCHI, *Journal of Afr. Earth Sci.*, (2015) 1 - 21 p.
- [8] - R. H. SILLITOE, Wentworth Resources Pty Ltd., (2007) 16 p.
- [9] - P. J. GOSENS, "Guide sur la recherche de gisements de Cu/Mo disséminés-type porphyry copper-en Haute Volta", Nations Unies, (1969)
- [10] - R. H. SILLITOE, "An examination of porphyry copper-molybdenum prospects and the overall metallogeny of the birimian system in Upper Volta and Niger", West Africa, (1973) 18 p.
- [11] - R. H. SILLITOE. "An appraisal of Dienemera and Gongondy Copper-gold Prospects, Gaoua District, Burkina Faso", Wentworth Resources Pty Ltd., (2007) 11 p.

- [12] - P. SOUGUE, "Rapport technique détaillé sur les sondages carottés dans le secteur de Diénéméra Nord", Projet Minier Gaoua, (1986)
- [13] - E. LE MIGNOT, L. SIEBENALLER, D. BEZIAT, A.-S. ANDRE-MAYER, L. REISBERG, S. SALVI, G. VELASQUEZ, C. ZIMERNANN & G. FRANCESCHI, *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, Vol. 88, Sup. 2 (2014) 970 - 972 p.
- [14] - E. LE MIGNOT, L. SIEBENALLER, D. BEZIAT, S. SALVI, A.-S. ANDRE-MAYER, L. REISBERG, G. VELASQUEZ, C. ZIMERNANN, A. NARE & G. FRANCESCHI, *Econo. Geol.*, Vol. 112, (2017) 99 - 122 p.
- [15] - L. SIEBENALLER, D. BEZIAT, S. SALVI, S. NABA, E. LE MIGNOT, L. BARATOUX, A.-S. ANDRE-MAYER, A. NARE, & G. FRANCESCHI, *Ore Geol. Rev.*, (2015) 5p.
- [16] - L. REINSBERG, E. LE MIGNOT, A. S. ANDRE-MAYER, J. MILLER, Y. BOURASSA, "In : Proceedings of the 13th SGA Biennial Meeting", Nancy, 24-27 August 2015, 4, (2015) 1655 - 1658 p.
- [17] - D. THIEBLEMONT, G. STEIN & J.-L. LESCUYER, *C. R. Acad. Sci. Paris, sciences de la Terre et des planètes*, Vol. 325, (1997) 103 - 109 p.
- [18] - F. G. SAJONA & R. C. MAURY, *C. R. Acad. Sci. Paris, Earth planet. Sci.*, N°326 (1998) 27 - 34 p.
- [19] - Q. WANG, Z. ZHAO, J. XU, X. LI, BAO, Z., X. XIONG & Y. LIU, *Sci. in China*, series D, Vol. 46, (2003) 164 - 176 p.
- [20] - J. P. RICHARDS & R. KERRICH, *Bulletin of the Society of Economic geologists*, Vol. 102, N° 4 (2007) 40 p.
- [21] - ZHANG, L., XIAO, W., KEZHANG, Q. & ZHANG, Q. *Miner. Deposita*, (2006) 188 - 200 p.
- [22] - J. P. RICHARDS, *Econ. Geol.*, Vol. 106, N° 7 (2011) 1075 - 1081 p.
- [23] - A. L. R. GOMEZ, N. RUBINSTEIN & V. A. VALENCIA, *Chemie der Erde*, 75 (2015) 89 - 104 p.
- [24] - M. J. DEFANT & M. S DRUMMOND, *Nature*, N° 347 (1990) 662 - 665 p.
- [25] - R. C. MAURY, F.G. SAJONA, M. PUBELLIER, H. BELLON & M. J. DEFANT, *Bull. Soc. Géol. France*, 167, 5 (1996) 579 - 595 p.
- [26] - H. MARTIN, *Lithos*, N° 46 (1999) 411 - 429 p.
- [27] - J. VAN DE STEEN & V. SATTRAN, "Recherches géologiques et minières dans les sillons de Houndé et de Boromo". Rapport final technique de synthèse. PNUD projet UPV 74-004, (1982)
- [28] - L. BARATOUX, V. METELKA, S. NABA, M. W. JESSELL, M. GREGOIRE & J. GANNE, *Precambrian Res.*, 191 (2011) 18 - 45 p.
- [29] - W. BROWNSCOMBE, "The Tinga anomaly : a new style of gold mineralization in Ghana?" Unpublished MSc thesis, University of Oxford, (2009) 80 p.
- [30] - J. A. WINCHESTER & P. A. FLOYD, *Chem. Geol.*, (1977) 325 - 343 p.
- [31] - A. MIYASHIRO, *American Journal of Science*, 274 (1974) 321 - 355 p.
- [32] - J. A. PEARCE, N. B. W. HARRIS & A. G. TINDLE, *J. Petrol.*, 25 (1984) 956 - 983 p.
- [33] - W. V. BOYTON, In Henderson, P., Ed. Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, New York, (1984) 63 - 114 p.
- [34] - J. A. PEARCE, *UK, Shiva*, (1983) 230 - 249 p.
- [35] - T. J. WELLS, S. MEFFRE, R. D. COOKE, J. A. STEADMAN & J. L. HOYE, *Australian Journal of Earth Sciences*, (2020) 23 p.
- [36] - BALDWIN and PEARCE, *Economic Geology*, 77 (3) (1982) 664 - 674 p.
- [37] - H. MARTIN, R. H. SMITHIES, R. RAPP, J.-F. MOYEN & D. CHAMPION, *Lithos*, N°79 (2005) 1 - 24 p.
- [38] - L. ZHANG, S. LI & Q. ZHAO, *International Geology Review*, (2019) 23 p.
- [39] - M. VAN DONGEN, R. F. WEINSBERG & A. G. TOMKINS, *Econo. Geol.*, 105 (4) (2010) 763 - 776 p.
- [40] - J. R. HOLLIDAY & D. R. COOKE, Advances in geological models and exploration methods for Copper ± Gold porphyry deposits. *Ore deposits and Exploration technology*, 53 (2007) 791 - 809 p.
- [41] - D. R. COOKE, P. HOLLINGS, J. J. WILKINSON, R. M. TOSDAL, "Geochemistry of porphyry deposits", *Treatise on geochemistry*, Second Edition, Vol. 13, (2014) 357 - 381 p.
- [42] - R. R. LOUKS, *Australian Journal of Earth Sciences*, (2014) 14 p.
- [43] - J. DENG, X. YANG, H. QI, Z. ZHANG, A. S. MASTOI, E. E. G. BERADOR, W. SUN, "Ore Geology Reviews", Vol. 110, (2019) 20 p.
- [44] - S.-A. LIU, S. LI, Y. HE, F. HUANG, "Geochemistry and Cosmochemistry acta", Vol. 74 (2010) 7160 - 7178 p.