

Structure et mode de mise en place du pluton granitique de Tiébélé (Burkina Faso) et son implication dans la concentration des anomalies en métaux de base (Zn-Pb-Cu) et en or (Au)

Structure and emplacement of the granitic pluton of Tiébélé (Burkina Faso) and its implication in concentration anomalies of base metals (Zn-Pb-Cu) and gold (Au)

Hermann ILBOUDO*, Saga SAWADOGO, Seta NABA,
Abraham Seydoux TRAORE & Martin LOMPO

Université de Ouagadougou, Burkina Faso, Département de Géologie, Laboratoire de Géosciences et Environnement Minier, UFR-SVT, 3 B.P. 7021*(ilboudohermann@yahoo.fr;hermannilboudo@gmail.com).

Résumé. Le pluton granitique de Tiébélé (PGT) se trouve en position centrale dans les formations paléoprotérozoïques, dans l'environnement du gîte d'amas sulfuré polymétallique (Zn-Pb-Cu) et or (Au). Ce granite, visiblement sans structure apparente, présente une microstructure magmatique à sub-magmatique prédominante. L'orthogneissification est localisée. La fabrique magnétique par la méthode de l'anisotropie de la susceptibilité (ASM) montre dans l'ensemble des linéations sub-horizontales avec toutefois une zone de fort plongement ($\times 56^\circ$) qui constituerait le conduit d'alimentation en magma. Celui-ci serait mis en place sous forme diapirique à un niveau supracrustal à la faveur d'un cisaillement régional accommodé par un aplatissement in situ lié à un effet de toit. La source d'alimentation en magma coïncide avec la zone de forte concentration en or et métaux de base (particulièrement Zn). La disposition spatiale des corps minéralisés en métaux (Zn-Pb-Cu), à l'origine très rapprochés et orientés NE-SW, aurait été perturbée par les mises en place successives des granitoïdes à amphibole \pm biotite du groupe Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), puis tardivement par le PGT. L'effet thermique induit par le PGT au cours de sa mise en place, aurait joué un rôle majeur dans la remobilisation et la reconcentration des phases minérales sulfurées notamment la sphalérite, et occasionné des microbrecciations sous l'effet de la pression fluide. Les minéralisations aurifères situées au sud du PGT, sont dans des veines de quartz \pm tourmaline ouvertes à la faveur de cisaillements NE-SW sous pression fluide générée vraisemblablement par l'anomalie thermique du PGT.

Mots-clés : Burkina Faso, Paléoprotérozoïque, Pluton granitique de Tiébélé (PGT), Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique (ASM), pétrologie structurale, minéralisations.

Abstract. The Tiébélé granite pluton (TGP) is located in a central position of the Palaeoproterozoic terrains in an environment made of polymetallic massive sulphide (Zn-Pb-Cu) and gold deposit. The granite, likely undeformed, shows therefore a predominant magmatic and submagmatic structure under microscope. Orthogneissification is localised. The study of magnetic fabric using the magnetic susceptibility anisotropy (MSA) method shows in overall a subhorizontal lineation with however an area of high plunging ($\times 56^\circ$), which constitutes the conduct of the magma feeding. The magma should have emplaced by diapirism in a supracrustal level due to a regional shearing accommodated by an in situ flattening imputable to roof effect. The source of the magma coincides with the most prospective area for gold and base metals (especially Zn). The spatial organisation of the base metals (Zn-Pb-Cu), originally very close along a NE-SW trend, has been largely disturbed by the consecutive emplacement of the amphibole \pm biotite bearing granitoid of Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) group, and later by the TGP. The thermal effect induced by TGP during its emplacement should have played a major role in remobilizing and concentrating sulphide mineral phases notably sphalerite, and causing microbrecciation under fluid pressure effect. Mineralization in the south of the TGP, are hosted by quartz \pm tourmaline veins in the NE-SW shearing, on fluid pressure probably generated by the thermal anomaly of the TGP.

Keywords : Burkina Faso, Palaeoproterozoic, Tiébélé granitic pluton (TGP), Magnetic Susceptibility Anisotropy (MSA), Structural petrology, Mineralizations.

Abridged English version

The Tiébélé granite pluton (TGP) is located in the Paleoproterozoic terrains in the southern part of Burkina Faso, close to the Ghana borders (Figs. 1, 2). At regional scale, the pluton which appears as an elliptic body (6 km x 9km) occurs in a geological setting made of clastic meta-lavas (basalt, andesite and rhyolite). These lavas are associated to chemical meta-sediments, pelitics or graphitic \pm manganese, which are crossed by several intrusions (gabbro-diorite) with lenticular or dyke shape (Fig. 2). Two generations of granitoids occur and the most important of them is the TGP, which is located in central position of the crystalline and metamorphic complex. The petrographic and

geochemical study suggests that this granite appears to be peraluminous calc-alkaline from S type ($A/CNK > 1.1$), commonly made of quartz-plagioclase (An_{12})-K feldspar-biotite (Fig. 3). Biotite is the only ferromagnesian mineral observed in this granite. The observed accessory mineral phases are sphene, zircon, monazite and magnetite.

This study was carried out to investigate the granite using the magnetic susceptibility anisotropy (MSA) and the magnetic susceptibility (MS) methods, in order to understand the magnetic/petro fabric in the TGP and its emplacement and possibly its implication in the metallogenesis. Field works (Fig. 4) followed by laboratory investigation using Kappabridge MFK1-FA and microscope

have been the determinative tools. The Kappabridge works under a weak alternative magnetic field $\pm 4 \times 10^{-4}T$, 920 Hz. The measurement of average susceptibility per site (km), the total anisotropy per site (P) and the shape parameter of Jelinek (T) parameters show a zoning with regard to Km and P values (Fig. 5, 6) and linear-planar for T values (Fig. 7, 8). The foliation is characterised by a predominant east-west trend (Fig. 9) and the lineation measurements, which are even though sub horizontal in overall, show an area of high plunging (Fig. 10). Microstructures under microscope are dominated by magmatic and submagmatic microstructure (Fig.11, 12). Orthogneissification is localised (Fig.12). The area of high value lineation constitutes the conduct of the magma feeding. The magma should be emplaced by diapirism in supracrustal level (Fig. 13), due to a regional shearing accommodated by an in situ flattening imputable to roof effect, compared to some granites studied using the same method in other nearby regions (Naba *et al.* 2004, Vegas *et al.* 2008). The source of the magma coincides with the most prospective area for gold and base metals (especially Zn).

The mining interest of the green stones belt of Tiébélé as reservoir of precious and base metals explains why the succession of exploration companies in this area since 1938 up to date (Van 1938, Bonnard 1964, Trinquard *et al.* 2003). In this area, it occurs: i/ (Zn-Pb-Cu) volcanogenic massive sulphide (Ilboudo 2010b, 2010c), recognized and

described in three zones namely Koubougo, Nabenia and Loubel (Fig.14a); and ii/ gold bearing mineralization highlighted in the south at Kollo (Fig.14a, b). The granite is not potentially mineralised but during its emplacement (Fig. 13), the TGP should have played a major role by thermal effect in: i/ remobilizing and concentrating sulphide mineral phases notably sphalerite from fine into coarse grain size (Fig.15a); and ii/ causing microbrecciation on the effect of the fluid pressure (Fig. 15b). The expression of the fluid in the track of thermal anomaly should be controlled by the granite emplacement. The action was more important in East within the Nabenia prospect. Toward the South, gold bearing fluid mineralisation hosted by quartz \pm tourmaline veins in the NE-SW major shear zone has been reactivated by the TGP.

The effect of the granite is important in this area, where several companies have conducted aggressive exploration programs. At present, the anomalies are deformed, developing lenticular shape, parallel to the granite border (Fig. 14 a), and suggest that they have been controlled by the TGP.

In conclusion, this work shows that the study of intrusion in mineralized environment by the MSA method and their eventual implication in the metallogenesis could orientate the metallogenic determination and therefore helps and increases the chance for exploration companies to target ore deposit.

INTRODUCTION

Le socle paléoprotérozoïque occupe 80% de la superficie du Burkina Faso (Fig. 1). Il est constitué de ceintures de roches vertes structurées NNE-SSW à NE-SW et recoupées de manière polycyclique par des corps granitiques au cours de l'orogénèse éburnéenne entre 2,2 et 2 Ga (Castaing *et al.* 2003). Au Burkina Faso, la classification simplifiée des granitoïdes, basée sur la composition minéralogique (présence ou non d'amphibole), est proposée par Kagambèga (2005) et Naba (2007). Ces auteurs reconnaissent l'existence (i) de granitoïdes à amphibole, plus précoces avec une foliation bien marquée à l'état magmatique ou à l'état solide (Naba *et al.* 2006), et (ii) de granitoïdes à biotite qui sont tardifs (Naba 2007). Ces derniers ne montrent pas de fabriques minérales à l'échelle mégascopique, mais forment des massifs circonscrits ou coalescents au sein des granitoïdes à amphibole, rarement au sein des ceintures de roches vertes (CRV), encore moins au contact des granitoïdes à amphibole. Leur structuration interne a pourtant été mentionnée dans les plutons de Kouaré, de l'alignement Tenkodogo-Yamba, de Naneni, de Déou et de Wayen (Naba *et al.* 2004, Naba *et al.* 2006, Naba 2007, Vegas *et al.* 2008, Traoré 2011, Sawadogo 2011) (Fig. 1). Si toutes ces études ont permis de comprendre le contexte géodynamique de mise en place des plutons, à travers des déformations enregistrées pendant et/ou après leur mise en place, leur implication métallogénique par contre n'a pas été abordée. Pourtant, l'implication de certaines intrusions magmatiques dans ce type de gisements métallifères se précise d'avantage un peu partout dans le monde et en Afrique à travers les travaux de

recherche géologique et d'exploration minière (Bakke 1995, McCoy *et al.* 1997, Baker & Lang 2001, Ilboudo 2010a, Ada *et al.* 2011).

C'est d'ailleurs dans ce contexte que se place la présente étude. Cette étude est axée particulièrement sur la dynamique de mise en place du pluton granitique de Tiébélé (PGT) dans un environnement minéralisé formé d'unamas sulfuré de type Sulfure Massif Volcanogène (VMS) associé à l'or (Ilboudo 2010b, c). Cette dynamique magmatique est contrainte en l'occurrence par des marqueurs de la pétrologie structurale (fabrique magmatique et/ou diastrophique) déduits des mesures de la susceptibilité magnétique (SM).

CADRE GEOLOGIQUE

Géologie régionale

Le contexte géologique régional est formé de métaformations volcanosédimentaires composées de laves basiques, intermédiaires à acides et de métapélites graphiteuses recoupées par des intrusions de gabbrodiorites, sous forme de massifs isolés ou de dykes (Fig. 2). Le métamorphisme associé varie du faciès amphibolite marqué par la présence d'amphibolite et de cornéenne à grenat, au faciès schiste vert généralisé. Ce dernier faciès est affecté d'un retromorphisme à chlorite - carbonate - épidote - quartz \pm tremolite \pm talc dans les faciès basiques à neutres, et à quartz - micas blanc - calcite dans les faciès acides et dans les sédiments. L'ensemble est moulé par les granitoïdes du groupe Tonalite-Trondhjémite-Granodiorite (TTG) composés essentiellement de granites à amphibole et de granites à biotite.

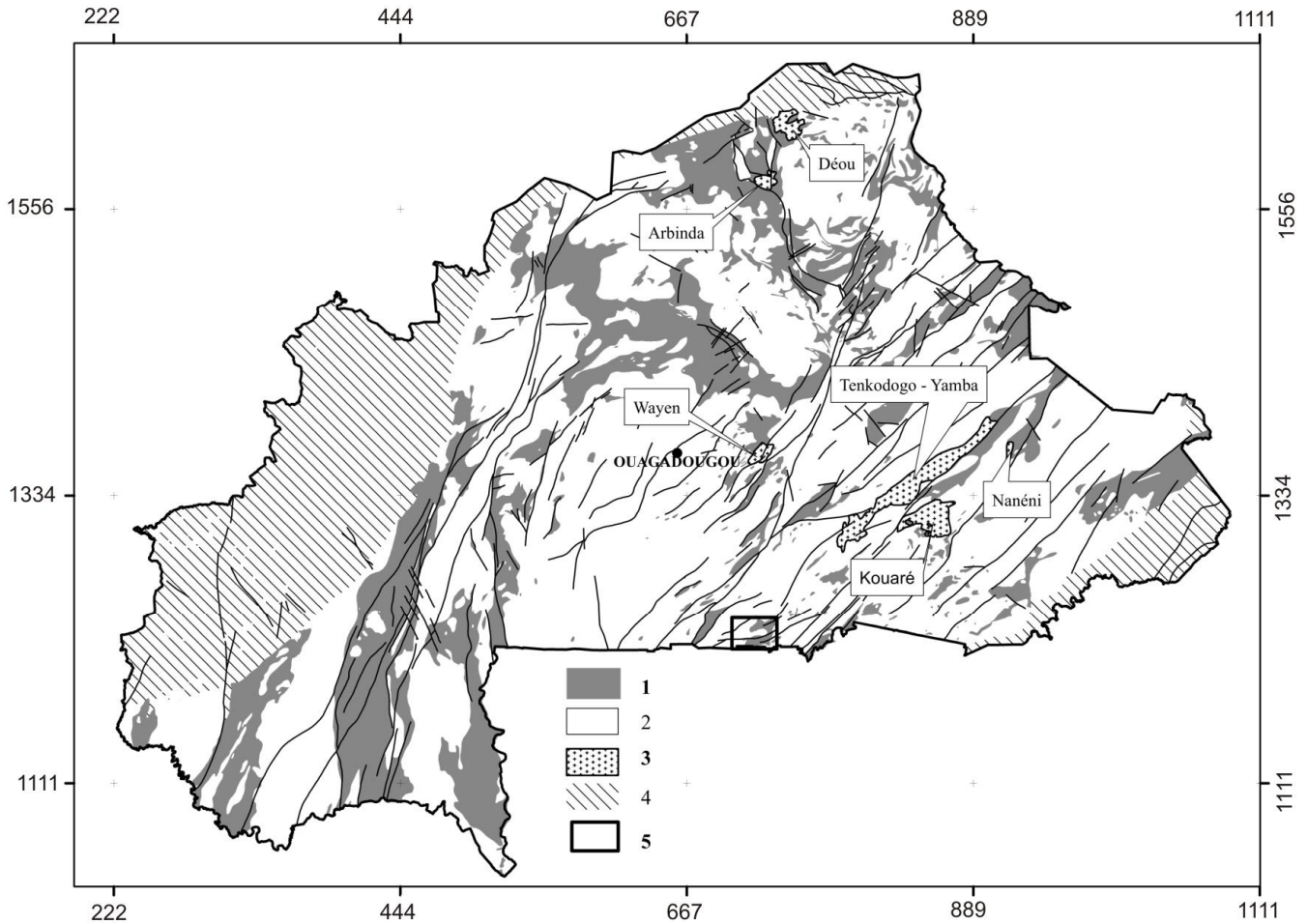


Figure 1. Localisation des granites déjà étudiés par la méthode de l'ASM, sur la carte géologique simplifiée du Burkina Faso au 1/1 000 000 (Castaing *et al.* 2003). 1. Ceinture de roches vertes. 2. Granitoïde paléoproterozoïque (TTG). 3. Granite étudié par ASM. 4. Formation sédimentaire Néoproterozoïque à Cambro-Ordovicien. 5. Zone d'étude.

Figure 1. Location of the studied granite using MSA on a simplified geological map of Burkina Faso at 1/1 000 000 (Castaing *et al.* 2003). 1. Green stones belt. 2. Paleoproterozoic granitoid (TTG). 3. Studied granite by MSA. 4. Neoproterozoic to Cambro-Ordovician sedimentary formation. 5. Study area.

Le pluton granitique de Tiébélé (PGT), situé dans le Sud du Burkina Faso à la frontière avec le Ghana (Fig. 2), occupe une position centrale dans ce complexe cristallin et cristallophyllien. Celui-ci est structuré par quatre phases de déformation lors de l'orogénèse éburnéenne (Ilboudo *et al.* 2008): i/ une déformation D₁ marquée par une déformation précoce qui est soulignée par une schistosité de flux (S₁); ii/ une déformation D₂ qui se surimpose à D₁ et s'exprime par des plissements syn-schisteux avec une schistosité (S₂) de plan axial; iii/ une déformation D₃ caractérisée par des cisaillements ductiles qui sont orientés ENE-WSW à NE-SW; et enfin iv/ une déformation D₄ représentée par des fractures tardives qui sont orientées NW-SE conformément à la direction des dykes d'extension régionale.

PRÉSENTATION DU PLUTON GRANITIQUE DE TIÉBÉLÉ (PGT)

Le PGT est de forme elliptique avec un long axe orienté E-W sur environ 9 km et un axe court orienté N-S sur environ 6 km. Il contient généralement de nombreuses enclaves mafiques microgrenues (EMM) très fines provenant des CRV (Fig. 3a). Il est recoupé par des termes fins aplittiques de couleur rose (Fig. 3b). La roche est de

couleur gris argenté. Elle est finement à moyennement grenue et localement porphyroïde avec des méga-cristaux de feldspath potassique en dents de cheval.

Au microscope, le quartz (30,640%) est sous forme de cristaux xénomorphes de dimension millimétrique (0,07 à 0,7 mm). Le plagioclase (An₁₂) (30,640%) se présente en cristaux automorphes (Fig. 3c) d'environ 3 mm, particulièrement transformés en micas blancs en bordure du pluton. Le feldspath potassique (10,620%) se présente en cristaux de taille pouvant atteindre 2mm. Les feldspaths sont souvent craquelés avec remplissage de quartz.

L'association quartz-feldspath potassique se résout souvent en myrmékite (Fig. 3d). La biotite (5,615%) qui est la seule composante ferromagnésienne, est en partie chloritisée. Le sphène, le zircon, la monazite, la magnétite et l'hématite constituent des phases accessoires. Du point de vue géochimique, le PGT est un granite calco-alcalin peralumineux (A/CNK > 1,1) (Ilboudo 2010b). Des filons d'aplites roses granophyriques et à magnétite recouperont le PGT. Ils traduisent les termes ultimes de la différenciation magmatique du PGT mis en place suivant les directions NW-SE à N-S à la faveur des fractures qui s'ouvrent au sein du massif granitique.

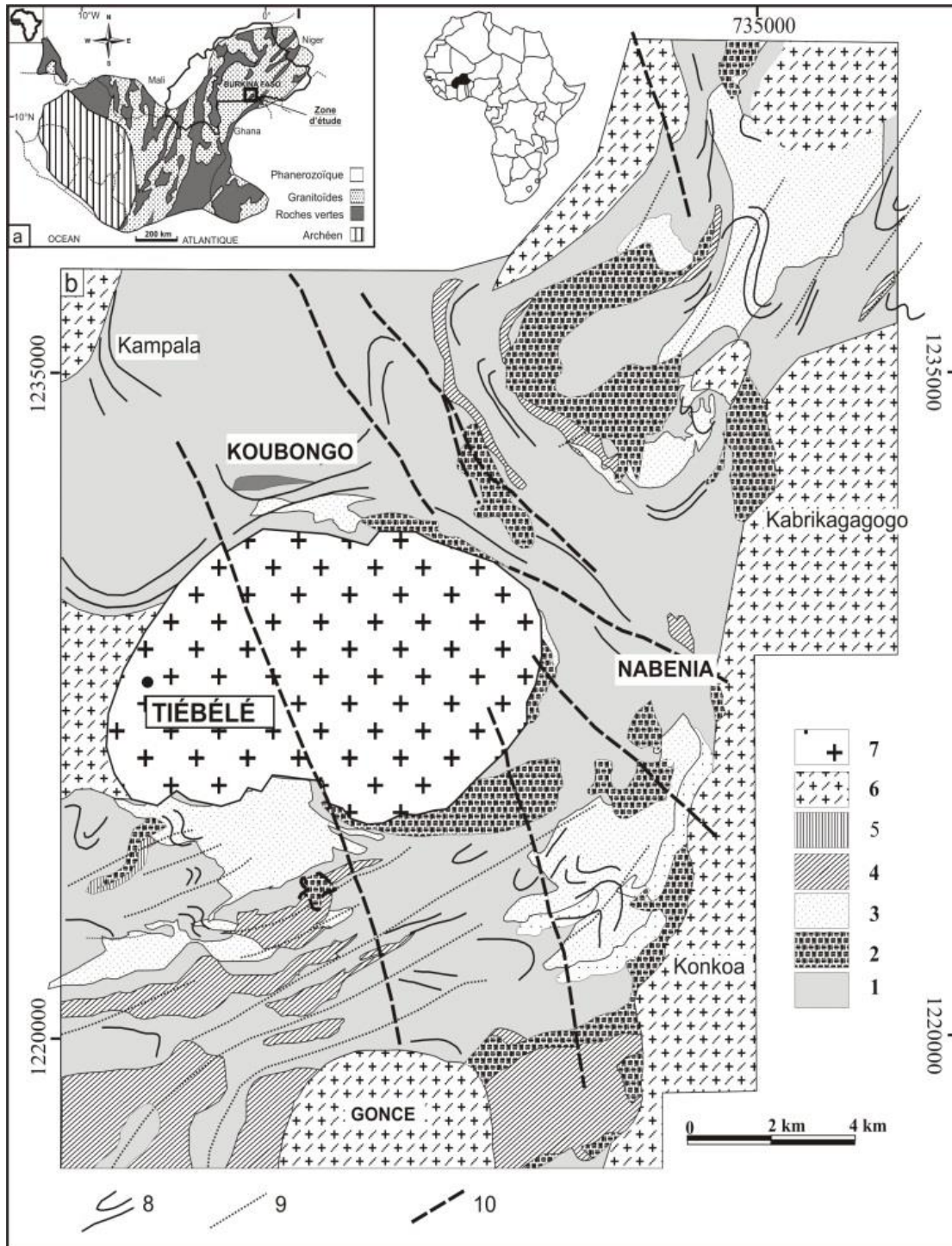


Figure 2. Carte géologique de Tiébélé d'après Ilboudo *et al.* (2008). a. Dorsale de Léo-Man. b. Le pluton granitique de Tiébélé (PGT) en position centrale bordé par la ceinture de roches vertes. 1. Méta-volcanite basique. 2. Intrusif basique (Méta-gabbro/Méta-diorite). 3. Méta-volcanite acide et microgranite associé. 4. Méta-sédiment (méta-chert et faciès gréso-pélitique). 5. Méta-sédiment chimique. 6. Granitoïdes à amphibole ± biotite (TTG). 7. PGT. 8. Trajectoire S0/S1. 9. Traces supposées des charnières de plis. 10. Failles tardives.

Figure 2. Geological map of Tiébélé from Ilboudo *et al.* (2008). a. Leo-Man ridge. b. Location of the Tiébélé granite pluton, bordered by green stones belt. 1. Mafic meta-volcanit. 2. Mafic Intrusion (Meta-gabbro/Meta-diorite). 3. Felsic meta-volcanite and associated microgranite. 4. Meta-sediment (meta-chert and pelitic sandstone). 5. Chemical meta-sediment. 6. granitoid (TTG) bearing Amphibole ± biotite. 7. TGP. 8. S0/S1 trajectory. 9. Supposed trend of fold hinges. 10. Late faults.

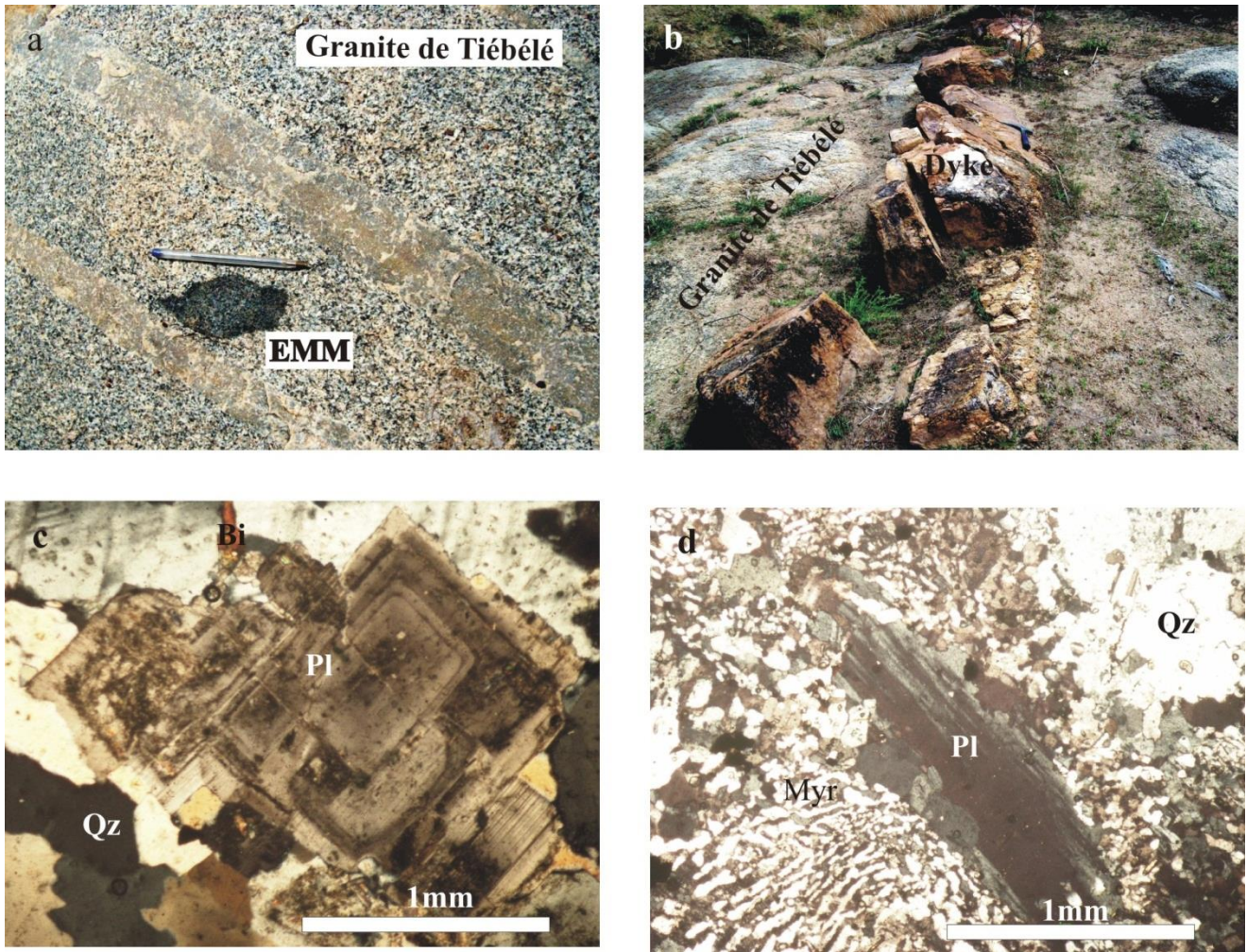


Figure 3. Observation du terrain et étude microscopique du PGT. a. Granite de Tiébélé montrant une enclave mafique microgrenue et des filonnets de quartz rose pâle. b. PGT recoupé par un dyke rose aplitique. c. Plagioclase automorphe zoné, issu d'une différenciation compositionnelle et limité par des plages de quartz. d. Texture granophyrique exprimée aux limites d'un plagioclase au sein d'un microgranite (faciès aplitique).

Figure 3. Field observation and microscope study of the TGP. a. Tiébélé granite showing microgranular mafic enclaves and light pink quartz veinlets. b. TGP crossed by an aplitic dyke. c. Zoned plagioclase from compositional differentiation. It is bordered by anhedral quartz crystals. d. Granophyric texture within a microgranite.

STRUCTURE ET MODELE DE MISE EN PLACE DU PLUTON GRANITIQUE DE TIEBELE (PGT)

Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique (ASM) : Rappel, échantillonnage et mesures

Une démarche classique d'investigation détaillée dans plusieurs documents de référence (Gleizes *et al.* 1997, Bouchez 1997, Nédélec & Bouchez 2010) a été employée pour l'étude de la susceptibilité magnétique (SM) et de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique (ASM). C'est ainsi que nous avons positionné au GPS "Global Positioning System" et prélevé un minimum de deux échantillons (12,1 cm³) par carottes sur treize sites (Fig. 4). La mesure de la susceptibilité magnétique des échantillons sélectionnés est réalisée par Kappabridge MFK1-FA, appareil qui opère sous un champ magnétique faible alternatif $\pm 4 \times 10^{-4}T$, 920 Hz et effectuant des mesures de la susceptibilité magnétique entre 196 et +700°C. L'intensité se mesure en continu pendant que l'échantillon est en rotation sur lui-même. Les mesures sont faites au laboratoire de Géosciences et Environnement Minier,

Université de Ouagadougou, Burkina Faso.

Données

De ces mesures, nous obtenons : i/ des données scalaires qui sont principalement la susceptibilité moyenne (Km), l'anisotropie totale (P) et le paramètre de forme (T) par site d'échantillonnage (Tab. 1); et ii/ des données directionnelles qui expriment la fabrique magnétique (linéation et foliation) de mise en place ou celle acquise postérieurement. De nombreuses études ont montré que la fabrique magnétique est corrélable à la fabrique magmatique ou de déformation à l'état solide (Gleizes *et al.* 1993, Bouchez 1997).

Microscopie

Des lames minces orientées ont été systématiquement réalisées sur un échantillon de chaque site. L'examen microscopique des échantillons des différents sites de prélèvement a permis de mieux caractériser les différents faciès macroscopiques mais aussi et surtout les micro-

structures pour déterminer les conditions rhéologiques d'acquisition de la fabrique observée par les mesures d'anisotropie de la susceptibilité magnétique.

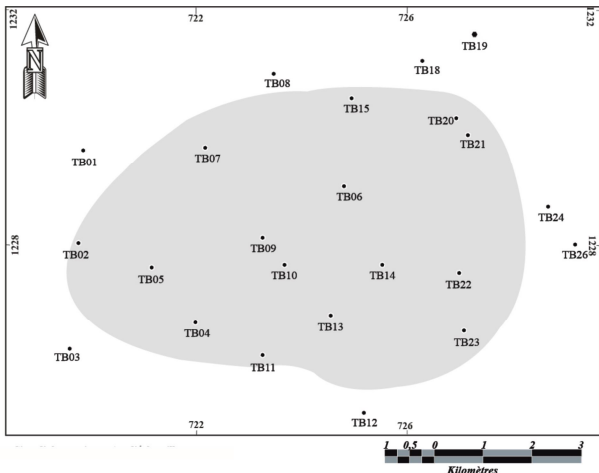


Figure 4. Carte des sites d'observation et/ou échantillonnage.

Figure 4. Map of observation sites and/or sampling.

Données de l'analyse de la Susceptibilité Magnétique

Les mesures de la susceptibilité magnétique dans le PGT sont répertoriées dans le tableau 1. La susceptibilité magnétique (Km) est comprise entre 1612,15 μ SI et 36509 μ SI. Ces valeurs sont caractéristiques de granite ferromagnétique. La limite entre le paramagnétisme et le ferromagnétisme est empiriquement fixée à 500 μ SI

Tableau 1. Données scalaires usuelles du pluton granitique de Tiébélé. Coordonnées UTM-WGS 84-30N. Km. Susceptibilité moyenne par site. L. Linéation. F: Foliation. P. Anisotropie totale par site. T. Paramètre de forme par site.

Table 1. Scalar data from the Tiébélé granitic pluton. Coordinates UTM-WGS 84-30N. Km. Average susceptibility by site. L. Lineation. F. Foliation. P. Total anisotropy by site. T. Shape parameter by site.

Echantillon	Northing	Easting	Km	L	F	P	T
TB02	1228222	720022	36509,14	1,15	1,16	1,34	0,03
TB04	1226565	722468	31607,04	1,16	1,06	1,22	-0,44
TB05	1227719	721541	27532,31	1,05	1,22	1,29	0,48
TB06	1229369	725575	4027,15	1,06	1,07	1,13	0,02
TB07	1230211	722676	7442,34	1,03	1,09	1,12	0,43
TB09	1228341	723872	11743,06	1,03	1,04	1,06	0,14
TB10	1227760	724350	10835,08	1,04	1,06	1,10	0,16
TB11	1225879	723890	6585,26	1,08	1,02	1,10	-0,54
TB13	1226710	725288	4721,46	1,02	1,01	1,02	-0,51
TB14	1227753	726388	6351,98	1,02	1,04	1,06	0,38
TB21	1230467	728175	5738,47	1,03	1,03	1,06	0,00
TB22	1227594	727985	1612,15	1,03	1,01	1,05	-0,44
TB23	1226408	728107	2119,15	1,03	1,01	1,04	-0,30

Interprétation structurale

Les foliations magnétiques déduites des mesures magnétiques du PGT ont des pendages généralement faibles à moyens, localement forts dans la moitié sud du pluton

(Rochette 1987). Au-delà de cette valeur, on considère qu'en plus des silicates ferromagnésiens, il existe des particules ferromagnétiques (magnétite, pyrrhotite) qui sont les porteurs de l'essentiel de l'aimantation. Dans le cas du PGT, la magnétite est déjà observée comme minéral accessoire. La répartition cartographique de la susceptibilité magnétique montre une nette zonation avec des susceptibilités de plus en plus fortes au fur et à mesure qu'on va de l'Est vers l'Ouest (Fig. 5). Ce type de zonation assez courant pour les granites paramagnétiques (Gleizes *et al.* 1993) n'est que rarement rencontré dans les granites ferromagnétiques.

L'anisotropie totale (P) est comprise entre 1,02 et 1,34 et montre que l'anisotropie de forme des grains de magnétite n'est pas très bien développée (Archanjo 1993); ce qui correspondrait normalement à des microstructures magmatiques. La répartition cartographique des valeurs de l'anisotropie totale montre que c'est le secteur occidental à valeur de susceptibilité relativement forte qui présente aussi les fortes valeurs d'anisotropie totale (Fig. 6).

Le paramètre de forme de Jelineck (T) qui décrit la forme de l'ellipsoïde de susceptibilité magnétique varie entre -0,54 et 0,48. Ces valeurs sont caractéristiques d'une fabrique plano-linéaire avec toutefois une tendance à l'allongement pour $T > 0,48$. La répartition cartographique du paramètre de forme montre que dans le Sud du pluton, la tendance est à l'allongement alors que dans le Nord, la tendance est à l'aplatissement. Cette disposition contraste nettement avec celle de Km et de P (Figs. 7, 8).

(Fig. 9). Les directions sont en moyenne E-W et sont localement subméridiennes dans la partie sud-est du pluton. Les foliations correspondent aux fabriques minérales acquises pendant la mise en place du magma. Ces fluidalités dessinent en l'occurrence des orientations conformes à

l'orientation des plans de foliations de l'encaissant, excepté dans la partie sud-est de l'intrusion où les fluidalités apparaissent subméridiennes.

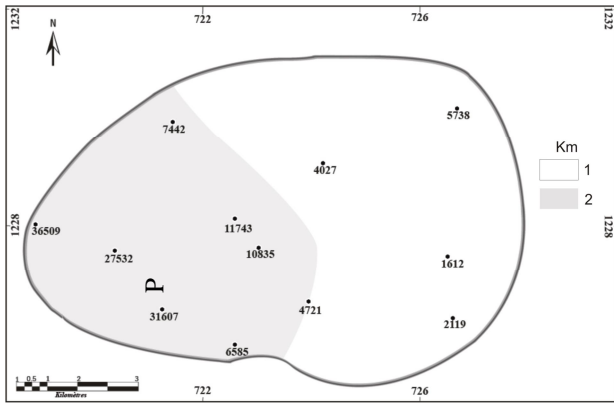


Figure 5. Carte de répartition des valeurs de la susceptibilité magnétique (Km) par site du PGT. 1. Zone de faible susceptibilité magnétique. 2. Zone de forte susceptibilité magnétique.

Figure 5. Map of magnetic susceptibility values (Km) per site of the TGP. 1. Low magnetic susceptibility area. 2. High magnetic susceptibility area.

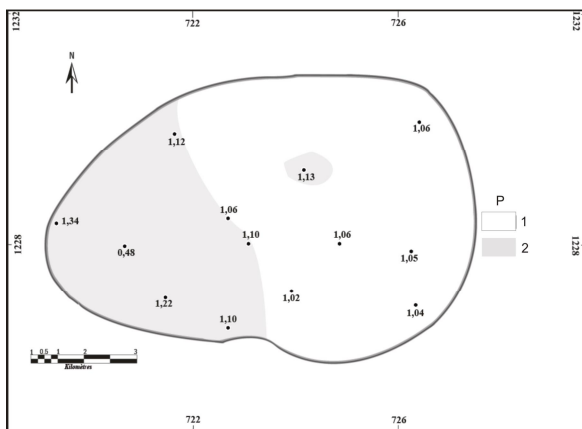


Figure 6. Carte de répartition du degré d'anisotropie (P) du PGT. 1. Zone à faible degré d'anisotropie. 2. Zone à fort degré d'anisotropie.

Figure 6. Distribution map of anisotropy degree (P) from the TGP. 1. Low anisotropy degree area. 2. High anisotropy degree area.

La linéation est l'indicateur cinématique de l'étirement fini au moment de la mise en place du PGT. Dans notre cas, les plongements de la linéation sont faibles à moyens avec des directions qui varient rapidement du NE au NW (Fig. 10). C'est seulement dans le coin SE du pluton que les linéations plongent assez fortement (> 60°). Les linéations fortement plongeantes sont le plus souvent interprétées comme des zones d'alimentation en magma (Vignerresse & Bouchez 1997 Améglio *et al.* 1997). Ce qui voudrait dire que la zone

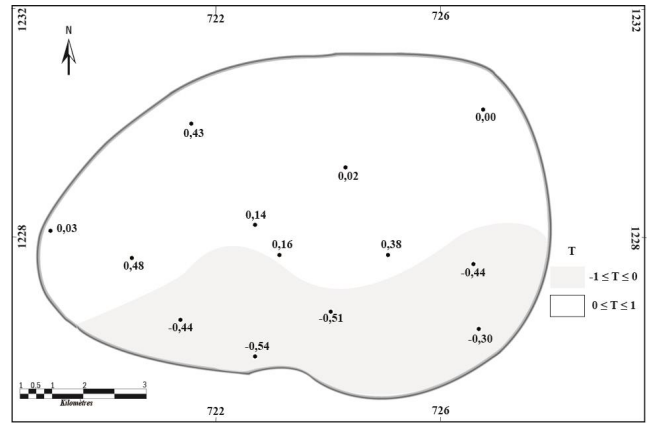


Figure 7. Carte de répartition du paramètre de forme de Jelinek (T) du PGT.

Figure 7. Distribution map of the TGP shape parameter of Jelinek (T).

P

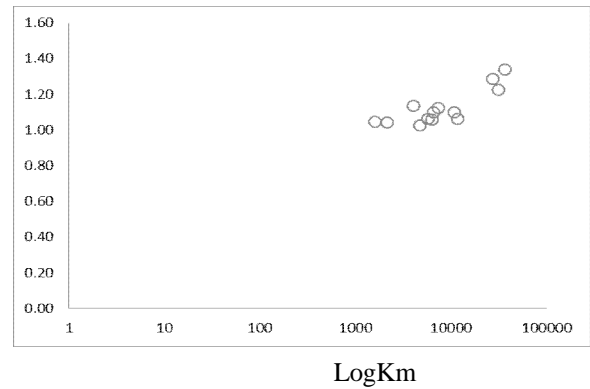


Figure 8. Diagramme binaire de représentation de P en fonction de Log Km. Km. la susceptibilité moyenne par site. P. Anisotropie totale par site.

Figure 8. Binary diagram showing P versus Log Km. Km. Average susceptibility per site. P. Total anisotropy per site.

d'alimentation du PGT se trouve dans le SE.

L'étude des microstructures nous permet de montrer les conditions rhéologiques dans lesquelles la fabrique mesurée par l'anisotropie de la susceptibilité magnétique a été acquise. On distingue habituellement deux grands types de micro-structures: les microstructures à l'état magmatique auxquelles il faut adjoindre les microstructures submagmatiques et les microstructures à l'état solide, qu'elles soient de haute ou de basse température (Paterson *et al.* 1989, Bouchez *et al.* 1992).

Dans le PGT, les microstructures sont à dominance magmatique (Figs. 11 à 12a, b). Quelques microstructures de déformation à l'état plastique (Figs. 12c, d) et de déformation à l'état solide (orthogneissification) sont parfois observées (Figs. 12 e, f).

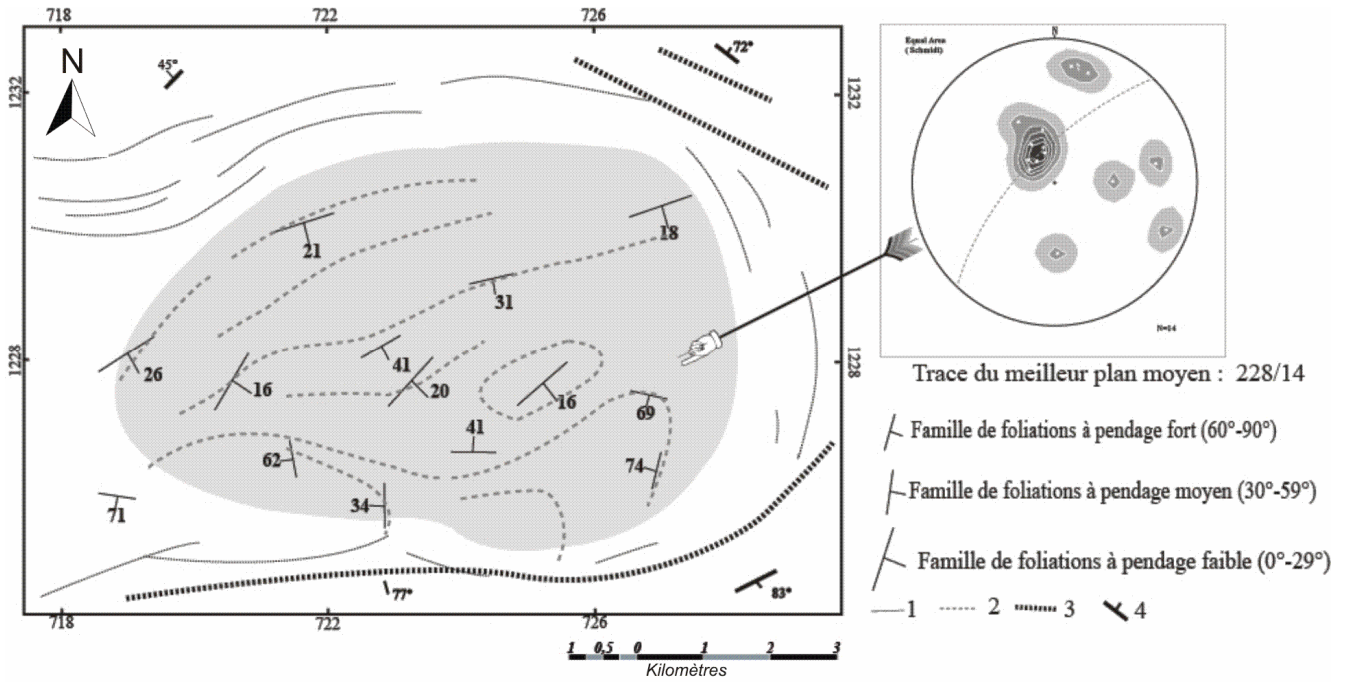


Figure 9. Carte des trajectoires de la foliation dans le PGT et son encaissant. 1. Trajectoire de la schistosité dans l'encaissant. 2. Trajectoire de la foliation dans le PGT. 3. Trajectoire supposée des failles. 4. Valeur de la schistosité mesurée dans l'encaissant.

Figure 9. Map showing the foliation trend in the TGP and its surrounding rocks. 1. Schistosity trend measured on the surrounding field. 2. Foliation trend in the TGP. 3. Fault trend. 4. Schistosity value measured on the surrounding area.

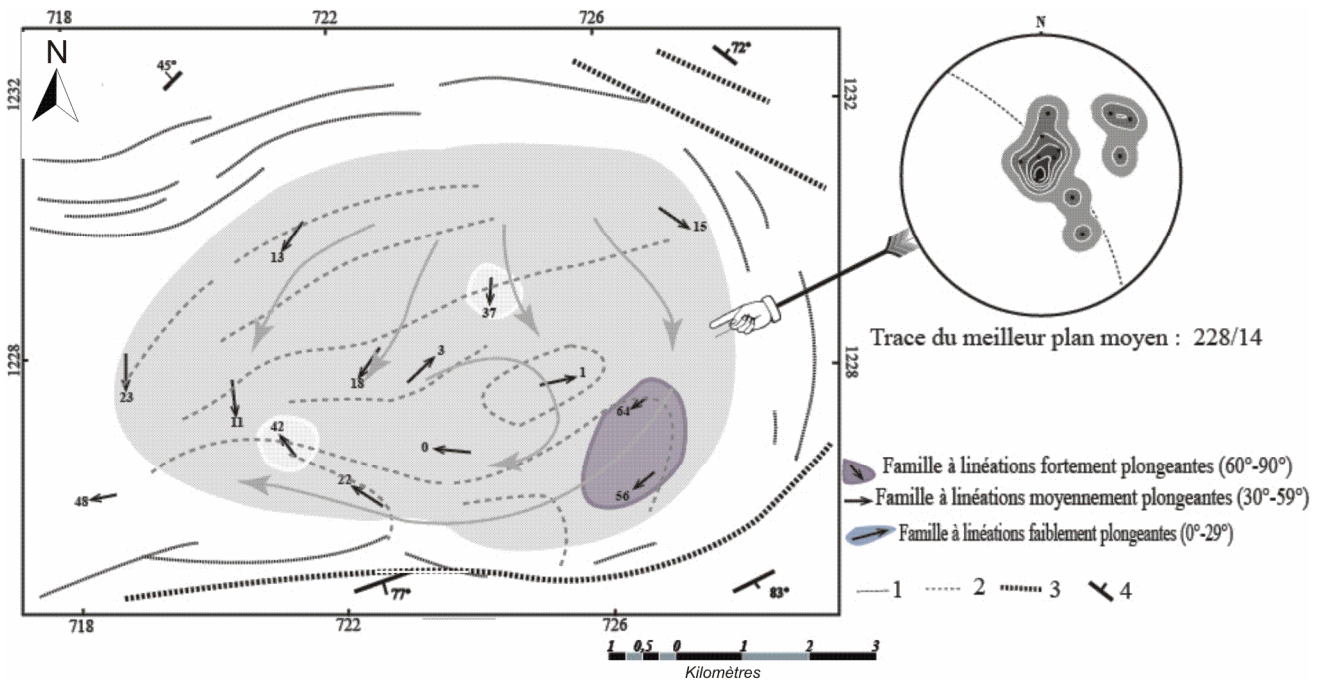


Figure 10. Carte des trajectoires de la linéation dans le PGT. 1. Trajectoire de la schistosité dans l'encaissant. 2. Trajectoire de la foliation dans le PGT. 3. Trajectoire supposée des failles. 4. Valeur de la schistosité mesurée dans l'encaissant.

Figure 10. Map showing the lineation trend in the TGP. 1. Schistosity trend measured on the surrounding field. 2. Foliation trend in the TGP. 3. Fault trend. 4. Schistosity value measured on the surrounding field.

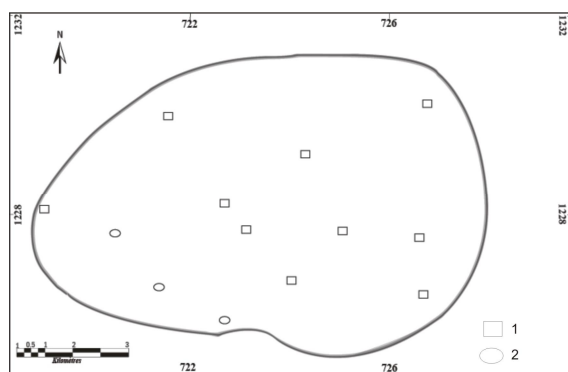


Figure 11. Répartition des microstructures par site au sein du PGT. 1. Microstructure magmatique. 2. Microstructure submagmatique.

Figure 11. Microstructure distribution per site in the TGP. 1. Magmatic microstructure. 2. Submagmatic microstructure.

DISCUSSION DU MODELE DE MISE EN PLACE DU PGT

Les mesures de susceptibilité magnétique du leucogranite peralumineux de Tiébélé montrent qu'il est entièrement ferromagnétique avec une zonation est-ouest. Les valeurs de susceptibilité relativement fortes à l'ouest pourraient traduire une circulation hydrothermale postérieure qui apporte une quantité supplémentaire de particules ferromagnétiques. Le drainage fluide marquerait l'ultime stade de mise en place du corps magmatique et sa transition vers un comportement pseudoplastique attesté par la déformation plastique du quartz à cet endroit. Les fabriques magnétiques montrent qu'il existe une direction de fluidalité majeure ENE-WSW, globalement compatible avec l'orientation de la foliation dans les deux tiers de la partie nord du PGT. Les linéations sont moins bien réglées avec des plongements faibles et rarement moyens, mise à part la partie Sud-Est où le plongement dépasse 60°. Cette configuration plaide en faveur d'une mise en place du PGT à un niveau relativement supérieur dans la croûte, comparativement à d'autres massifs des régions voisines (Naba *et al.* 2004, Vegas *et al.* 2008). Les linéations, fortement plongeantes dans la partie sud-est du massif, présentent une mise en zone autour d'un axe vraisemblablement NE-SW à ENE-WSW (Fig. 10) qui souligne la direction d'injection du magma. La foliation telle que esquissée sur la figure 9, semble mouler le PGT et forme un point triple sur son côté droit. Cette géométrie asymétrique est un argument pour une contemporanéité de la mise en place de la schistogenèse au cours d'une déformation cisailante (Brun 1981, Gapais 1989, Pons *et al.* 1992, Roman Berdiel 1994).

Le conduit d'alimentation apparaît excentré par rapport à l'accident majeur et explique la forme en goutte avec initialisation d'une pointe (queue) dans le sens de cisaillement, en l'occurrence dextre. Les relations générales entre les trajectoires de foliation, structures et mécanismes de déformation dans un pluton soumis à une interférence entre gonflement et cisaillement régional peuvent être

traduites dans le modèle ci-après (Fig. 13a, b). L'aplatissement horizontal enregistré par la fluidalité magmatique et la linéation subséquente serait corrélé à un effet de toit lié à une mise en place supracrustale. Le drainage magmatique est facilité par la présence d'une discontinuité lithologique qui est soulignée par le contact entre le massif granitoïdique de TTG et les formations de la ceinture verte (CRV).

La persistance de la contrainte régionale NW-SE après la mise en place et consolidation du magma est à l'origine des fractures NW-SE à NNW-SSE qui affectent le PGT et son encaissant.

IMPLICATION METALLOGENIQUE

L'intérêt minier de la ceinture de roches vertes de Tiébélé en tant que réservoir de métaux précieux et de métaux de base, a suscité plusieurs campagnes d'investigations géologiques depuis 1938 jusqu'à ce jour (Van 1938, Bonnard 1964, Trinquard *et al.* 2003). On y relève:

- des minéralisations de type amas sulfurés volcanogènes à Zn, Pb et Cu reconnues dans trois zones qui sont Koubongo, Nabénia et Loubel (Fig. 14a);
- des minéralisations aurifères mises en évidence dans la région de Kollo au sud (Fig. 14a, b).

Les indices de métaux ont été répertoriés dans le Nord, l'Est et le Sud du PGT respectivement dans les prospectifs de Koubongo, Nabénia et Loubel. Dans le prospectif de Koubongo, les associations minérales sont à pyrite-pyrrotite-sphalérite-galène (Ilboudo 2010b). A Nabénia, la minéralisation est massive ± rubanée et dominée par la sphalérite avec galène - pyrite - chalcopryrite et des traces d'or (3,2764,51 % Zn; 0,4 % Pb; 0,38 % Cu; 29,4g/t Ag et trace d'or). La sphalérite qui normalement cristallise en grains fins, se présente à proximité du PGT en plages grossières recristallisées (Fig. 15 a). De surcroît, certaines carottes de sondages réalisés dans ce prospectif montrent une microbréchification (Fig. 15b). L'expression de ce fluide dans le sillage de l'anomalie thermique serait contrôlée par la mise en place du PGT.

Le PGT n'est pas potentiellement minéralisé. Néanmoins, la présence d'une anomalie en or à l'aplomb de la source d'alimentation en magma pourrait suggérer une filiation génétique entre ces deux composants (Fig. 14a). Plus loin à 162 km vers le Sud, la minéralisation aurifère est concentrée dans des veines de quartz ± tourmaline (Fig. 14b), ouvertes à la faveur des cisaillements NE-SW qui tracent la direction structurale majeure dans la région. Les fluides de remplissage seraient de nature orthomagmatique et/ou remobilisés à partir des formations encaissantes, sous l'effet de l'anomalie thermique induite par le PGT.

De plus, les anomalies géochimiques régionales (500 m x 500 m) ou de détail (500 m x 50m) présentent des formes allongées suivant les structures de cisaillements majeures NE-SW, ou curvilignes épousant parfaitement les limites du PGT; suggérant que la mise en place du pluton a contrôlé la disposition de ces anomalies (Fig. 14 a, b).

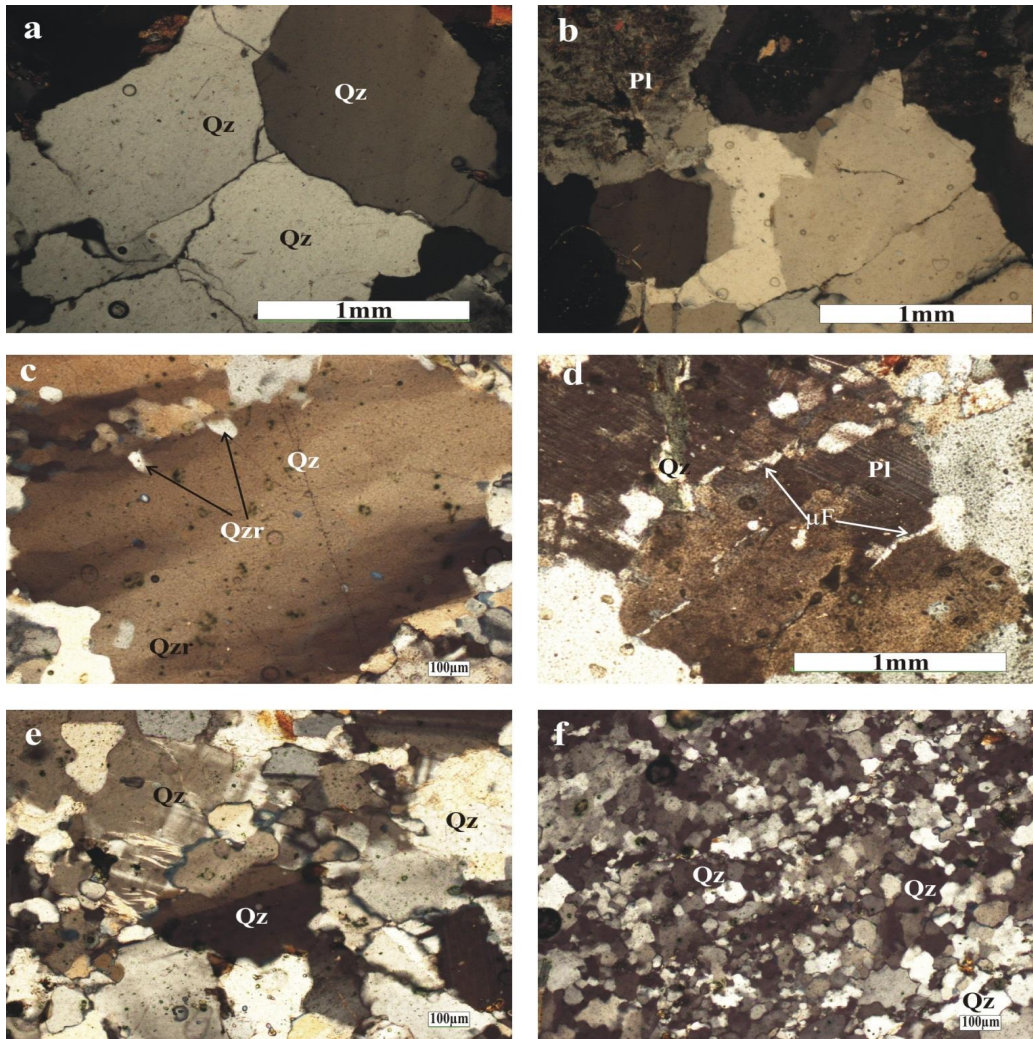


Figure 12. Principales microstructures du massif granitique de Tiébélé. a. Microstructure magmatique caractérisée par de grosses plages de quartz et de feldspath. b. Microstructure magmatique à plages xénomorphes de quartz et de plagioclase automorphe. c. Microstructure magmatique avec début de recristallisation polygonale de microcristaux de quartz aux dépens de large plage de quartz. d. Microstructure submagmatique marquée par des fractures du plagioclase remplies de quartz. e. Orthogneissification naissante avec polygonisation des sous-joints de grains. f. Orthogneissification naissante.

Figure 12. Main microstructures of the granitic pluton of Tiébélé. a. Magmatic microstructure with large quartz and feldspar. b. Magmatic microstructure with anhedral quartz and euhedral feldspar. c. Magmatic microstructure with beginning of polygonal recrystallization of quartz microcrysts at the expense of large quartz. d. Submagmatic microstructure expressed by quartz filling fracture in plagioclase. e. Nascent orthogneissification with polygonization of grains sub-joint. f. Nascent orthogneissification.

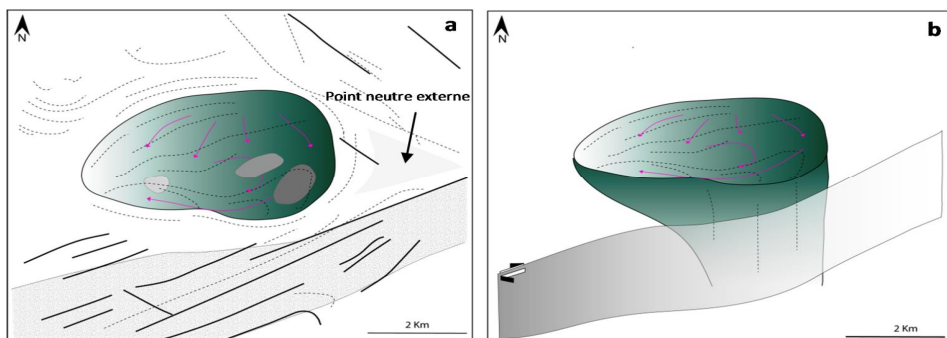


Figure 13. Modèle (étapes) de mise en place. Relations générales entre trajectoires de foliation, structures et mécanismes de déformation dans le pluton granitique de Tiébélé (PGT) (a) soumis à une interférence entre gonflement et cisaillement régional (b). Même légende des éléments structuraux que la Figure 14.

Figure 13. Emplacement model (Stages). General relation between foliation trends, deformation structures and mechanisms in the Tiébélé granite pluton (TGP) (a) subject to interference between swelling and regional shearing. Same legend for the structural data as it appears in Figure 14.

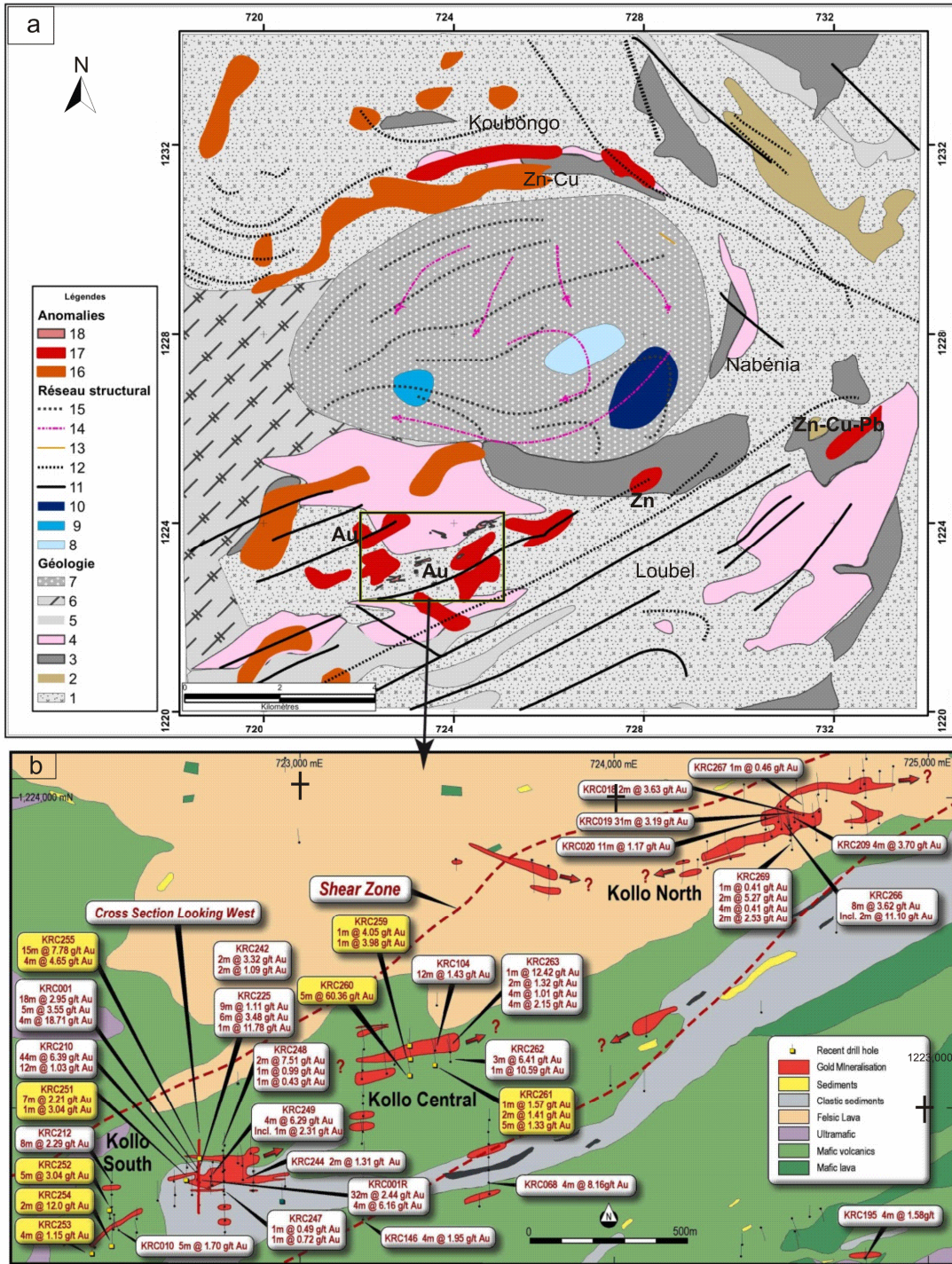


Figure 14a. Relation entre la distribution des minéralisations de type VMS, Or (Au) et le PGT. 1. Méta-volcanite basique. 2. Agglomérat mafique 3. Intrusif basique (Méta-gabbro/Méta-diorite). 4. Méta-volcanite acide et microgranite associé. 5. Méta-sédiment (méta-chert et faciès grésopélitique). 6. Granitoïdes à amphibole ± biotite (TTG). 7. PGT. 8. Zone à faible linéation. 9. Zone à linéation modérée. 10. Zone à linéation forte. 11. Failles majeures. 12. Trajectoire de la schistosité régionale. 13. Trajectoires de la linéation. 14. Trajectoire de la foliation. 15. Anomalies géochimiques régionales. 16. Anomalies géochimiques de détail. 17. Prospect au Sud défini par la compagnie Vital Métal.

Figure 14b. Carte des anomalies et intersections en or des sondages (d'après Vital Metal, press release, 2012).

Figure 14a. Relationship between the spatial distribution of VMS, gold mineralisation system and the TGP. 1. Mafic meta-volcanit. 2. Mafic Agglomerate. 3. Mafic intrusion (Meta-gabbro/Meta-diorite). 4. Felsic meta-volcanite and associated microgranite. 5. Meta-sediment (meta-chert and pelitic sandstone). 6. Amphibole ± biotite bearing granitoid (TTG). 7. TGP. 8. Low lineation area. 9. Moderate lineation area. 10. High lineation zone. 11. Major fault. 12. Trajectory of the regional schistosity. 13. Trajectory of the lineation. 14. Trajectory of the foliation. 15. Regional geochemical anomalies. 16. Detail geochemical anomalies. 17. Southern prospect area defined by Vita Metal.

Figure 14b. Map showing anomalies and gold bearing rock drilling intersection (press release, Vital Metal, 2012).

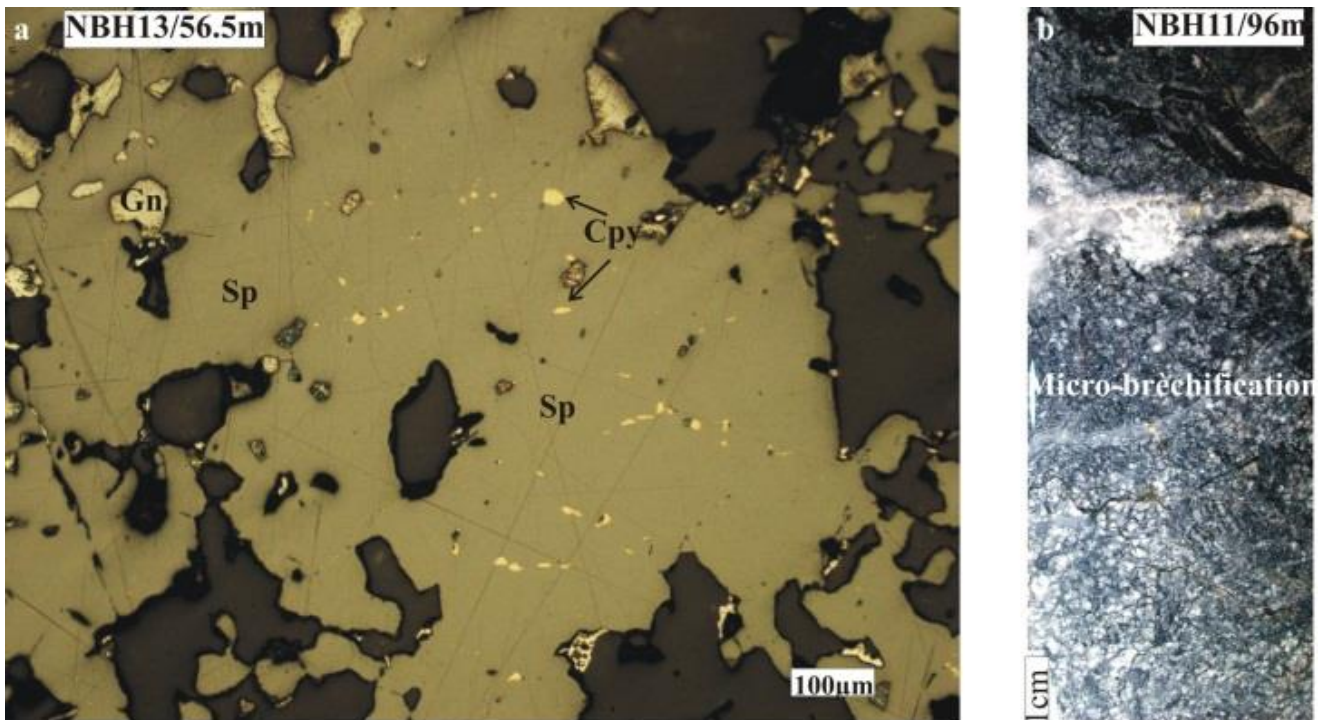


Figure 15. Evidences d'une implication du PGT dans le système de minéralisation. a. Large plage de sphalérite (Sp) à inclusions de galène (Gn) et de chalcopryrite (Cpy). b. Microbréchification d'origine fluide observée dans une carotte de sondage du prospect de Nabénia.

Figure 15. Evidences of the PGT implication in the mineralised system. a. Large sphalerite (Sp) containing galena (Gn) and chalcopyrite (Cpy). b. Microbrecciation observed in a drilling core in the Nabenia prospect.

CONCLUSION

Le pluton granitique de Tiébélé est un Granite leucocrate peralumineux à biotite. Il est recoupé par des filons d'aplités roses granophyriques et à magnétite, qui traduisent les termes ultimes de la différenciation magmatique du pluton, mis en place suivant les directions NW-SE à N-S à la faveur des fractures qui s'ouvrent au sein du massif granitique. Les investigations menées sur le pluton par la technique de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique à travers la mesure de la fabrique minérale (foliation et linéation) montrent d'une part, que le granite se serait mis en place à un niveau supracrustal, accommodé par un effet de toit qui engendre un aplatissement subhorizontal des structures fluidales, et d'autre part, que cette mise en place de nature diapirique est synchrone d'un cisaillement régional. L'effet thermique induit par le PGT aurait contribué à remobiliser et reconcentrer les fines phases minérales sulfurées en l'occurrence de sphalérite en des phases grossières. La disposition des zones minéralisées en lentilles subparallèles aux contours du PGT corrobore l'implication de celui-ci dans le processus de minéralisation. En outre, quoique le PGT ne soit pas minéralisé, la présence d'anomalies en or à l'aplomb du conduit d'alimentation en magma pourrait suggérer une filiation génétique entre ces deux composantes. Enfin, ce travail montre que l'étude des intrusions dans les environnements minéralisés par les méthodes d'ASM et leur implication éventuelle dans la métallogénèse pourrait orienter la détermination de métalotectes et partant contraindre la démarche de l'exploration minière.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Nathanaël ADA, Eric Stéphane GAMPINI pour le soutien apporté lors de la collecte des échantillons. Une reconnaissance est adressée au Prof. Urbain WENMENGA pour avoir guidé sur le choix de la zone. Le bureau d'étude TEGECO (Télécommunication & Géosciences Consult) est vivement remercié pour la logistique. Enfin, les auteurs expriment leur profonde gratitude à Dr. A. Boushaba et de façon particulière à Dr. T. Remmal pour les contributions profondes très constructives à l'amélioration de ce manuscrit.

REFERENCES

- Ada K., Gampini S.E., Naba S., Marquis P., Lompo M., Wenmenga U., Traoré, A.S. & Ilboudo H. 2011. Le gîte aurifère de Djarkadougou dans la ceinture de roches vertes de Houde (Burkina Faso - Afrique de l'ouest): Contexte lithologique et structural. *J. Sci. et Technol.*, 9, 2, 49664.
- Améglio L., Vignerresse J.L. & Bouchez J.L. 1997. Granite pluton geometry and emplacement mode inferred from combined fabric and gravity data. In: J. L. Bouchez, D.H.W. Hutton & W.E. Stephens (Eds.) - granite from segregation of Melt to Emplacement Fabrics. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*. 1996214.
- Archanjo C. J. 1993. *Fabriques des plutons granitiques et déformations crustales du NE du Brésil. Une étude par anisotropie de susceptibilité magnétique de Granites ferromagnétiques*. Thèse Doct. Univ. Toulouse III, 167 p.
- Baker T. & Lang J. R. 2001. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. *Mineralium Deposita*, 36, 4776489.

- Bakke A. A. 1995. The Fort Knox porphyry gold deposit: structurally controlled stockwork and shear quartz vein, sulfide-poor mineralization hosted by a late Cretaceous pluton, east-central Alaska. *In: Schroeter TG (Ed.) - Porphyry deposits of the northwestern cordillera of North America. Can. Inst Min Metall. Spec.*, 46, 7956802.
- Bonnard F. 1964. *Étude géologique et prospective en relation avec les anomalies géophysiques de la région de Kampala-Tiébélé (cercle de Pô)*. Rapp. DGM, Ouagadougou.
- Bouchez J.L., Delas C., Gleizes G., Nédélec A. & Cuney M. 1992. Submagmatic microfractures in granites. *Geology*, 20, 35638.
- Bouchez J.L. 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. *In: J. L. Bouchez, D.H.W. Hutton & W.E. Stephens (Eds.) - Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics, Kluwer Academic, Dordrecht*, 956112.
- Brun J.P. & Pons J. 1981: Strain patterns of pluton emplacement in a crust undergoing non coaxial deformation. Sierra Morena, Southern Spain. *J. Struct. Geol.*, 3, 2196229.
- Castaing C., Bila M., Milési J-P., Thiéblemont D., Le Metour J., Egal E., Donzeau M., Guerot C., Cocherie A., Chevremont P., Teygey I., Itard Y., Zida B., Ouédraogo I., Koté S., Kabore B-E., Ouédraogo C., Ki J-C & Zunino C. 2003. *Notice explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1000 000*. 3^{ème} édition, 148 p.
- Gapais D. 1989. Les orthogneiss. Structures, mécanismes de déformation et analyse cinématique. *Mem. Doc. C.A.E.S.S.* 28 p.
- Gleizes G., Nédélec A., Bouchez J.L., Autran A., Richette P. 1993. Magnetic susceptibility of the Mont-Louis-Andorra, ilmenite-type granite (Pyrenees): new tool for the petrographic characterisation and the regional mapping of zoned granite pluton. *J. Geophys. Res.*, 98, 431764331.
- Gleizes G., Leblanc D. & Bouchez J.L. 1997. Variscan granites of the Pyrenees revisited: their role as syntectonic markers of the orogen. *Terra Nova*, 9, 38641.
- Ilboudo H., Lompo M., Wenmenga U., Naba S., Kagambèga N. & Traoré S. A. 2008. Caractères pétrographiques et structuraux des formations paléoprotérozoïques du gîte à sulfures de Tiébélé, Burkina Faso (Afrique de l'ouest). *J. Sci.*, 8(3), 37650.
- Ilboudo H. 2010a. *Les intrusions basiques de la fosse principale de la mine d'or d'Anata: Chronologie de mise en place et leur rôle dans la remobilisation des fluides minéralisateurs*. Rapport, Avocet Gold, Burkina Faso, 16 p.
- Ilboudo H. 2010b. *Le gîte d'amas sulfuré de Tiébélé. Faciès lithologiques, Structures et Minéralisations, Burkina Faso (Afrique de l'ouest)*. Thèse Doct. Univ. Ouagadougou, Burkina Faso, 158 p.
- Ilboudo H. 2010c. *Etude par Microscope électronique et par diffraction au RX des associations et phases minérales des sulfures massifs volcanogènes de Tiébélé, Burkina Faso-Afrique de l'ouest*. Rapport, ULB-Solbosh, 22 p.
- Kagambèga N. 2005. *Typologie des granitoïdes paléoprotérozoïques du Burkina Faso: cas des granitoïdes de Pô. Approche pétrologique dans la région de Pô*. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, UCAD, Dakar, Sénégal, 200 p.
- McCoy D.T., Newberry R.J., Layer P.W., Dimarchoi J.J., Bakke A.A., Masterman J.S. & Minehane D.L. 1997. Plutonic related gold deposit of interior Alaska. *In: R.J. Goldfarb & L.D. Miller (Eds.) - in Ore deposits of Alaska. Soc. Econ. Geol., Monogr*, 9, 1516190.
- Naba S. 2007. *Propriétés magnétiques et caractères structuraux des granites du Burkina Faso oriental (Craton Ouest Africain, 2,2-2,0 Ga) : implications géodynamiques*. Thèse Doct. Univ. Paul-Sabatier, Toulouse III, 144 p.
- Naba S., Lompo M., Debat P., Bouchez J.L. & Béziat D. 2004. Structure and emplacement model for late-orogenic Paleoproterozoic granitoids: the Tenkodogo-Yamba elongate pluton (Eastern Burkina Faso). *J. Afr. Earth Sci.*, 38, 41657.
- Naba S., Vegas N., Bouchez J.L., Siqueira R. & Lompo M. 2006. Caractères magnétiques, fabrique et contexte géodynamique des granites du Burkina Faso Oriental. *Africa Geosc. Rev.*, 13, 1, 63676.
- Nédélec A. & Bouchez J-L. 2010. *Pétrologie des granites. Structures-Cadre géologique*. Vulbert, *Soc. Géol. France*, 304 p.
- Paterson S.R., Vernon R.H. & Tobisch O.T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *J. Struct. Geol.*, 11, 3496363.
- Pons J., Oudin C. & Valero, J. 1992. Kinematics of large syn-orogenic intrusions: example of the Lower Proterozoic Saraya batholith (Eastern Senegal). *Geologische Rundschau*, 81, 2, 4736486.
- Rochette P. 1987. Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. *J. Struct. Geol.*, 9, 101561020.
- Roman Berdiel M. T. 1994. Mécanismes d'intrusion des granites supracrustaux. Modèles analogiques et exemples naturels. *Mém. Géosc.* 62 p.
- Sawadogo S. 2011. *Application de la technique de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique à la cartographie structurale du pluton de granite d'Arbinda, Nord Burkina Faso (Afrique de l'ouest)*. Mém. DEA, Univ. Ouagadougou, 79 p.
- Traoré A.S. 2011. *Mise en place des plutons de granites alcalins paléoprotérozoïques du Burkina Faso (Afrique de l'ouest)*. Thèse Doct., Univ. Ouagadougou, 121 p.
- Trinquard R., Kagambèga N., Naba S., Castaing C. 2003. Notice explicative de la carte géologique de Tenkodogo à 1/200 000, *Feuille Tenkodogo*, 59 p.
- Van A. 1938. *Mission de recherche minière effectuée dans le permis de la Société des Recherches Minières de Pô-Tenkodogo*. Rapp. S.R.M., 41 p.
- Vegas N., Naba S., Bouchez J.L. & Jessell M. 2008. Structure and emplacement of granite plutons in the Paleoproterozoic crust of Eastern Burkina Faso: rheological implications. *Intern. J. Earth Sci. (Geologisches Rundschau)*, 97, 116561180.
- Vignerresse J.L. & Bouchez J.L. 1997. Successive granitic magma Batches during pluton emplacement: the case of Cabeza de Araya (Spain) *J. Petrol.* 38, 12, 176761776.