

Note préliminaire sur un indice de minéralisations sulfurées associées aux formations leptynitiques du centre-Est du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest)

Hermann ILBOUDO & Urbain WENMENGA*

Université de Ouagadougou, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie et Minéralogie, UFR-SVT, 03 BP 7021, Burkina Faso. e-mail : il_mann@yahoo.fr ; *Auteur correspondant ; e-mail : urbain_wenmenga@univ-ouaga.bf

Résumé. La carrière de Tintin est implantée dans les formations leptynitiques paléoprotérozoïques de Koubri, un complexe constitué de lithofaciés variés de composition évoluant des tonalites/trondhjémites aux granodiorites, adamellites et granites et recoupé par des filons de micro-monzodiorite. Ils sont affectés à l'échelle de l'affleurement par des altérations supergènes marquées par des dépôts superficiels de minéraux sulfatés et à l'échelle de l'échantillon par des altérations hydrothermales type potassique, phylliteux, siliceux, propylitique et plus rarement argileux. Ces formations représentent l'encaissant d'un indice de minéralisations sulfurées à pyrite dominante, chalcopyrite fréquente, à pyrrhotite et covellite secondaires. Les relations microtexturales sur le plan métallographique mettent en évidence deux générations de pyrite et de chalcopyrite, à l'état disséminé ou sous forme de remplissage de fissures ou rubané dans les lithofaciés gneissiques. Le contexte géologique, les lithofaciés et les modes d'altération et d'assemblages sulfurés rappellent ceux décrits dans certains gîtes de type "porphyre cuprifère" à travers le monde, mais sont inédits au Burkina Faso.

Mots clés : Burkina Faso, Paléoprotérozoïque, leptynite, tonalite, altération hydrothermale, indice, sulfures, porphyre cuprifère.

Preliminary report on sulphide deposits hosted by leptynitic formations in the East center part of Burkina Faso (West Africa).

Extended abstract. In the Koubri area, Palaeoproterozoic leptynitic formations (Figs 1 and 2) are a complex with lithofacies varying from tonalite/trondhjemite to granodiorite, adamellite and granite (Fig. 3) crosscut by micro-monzodiorites. They show both tholeiitic and calc-alkaline affinity and other geochemical signatures (Figs. 4 and 5, Tabl. I) close to those of Birimian lavas (Fig. 6) of subduction zones. Tintin quarry, located in this area (Fig. 7, Pl I) reveals the presence of sulfide mineralization dominated by pyrite, chalcopyrite, minor amount of pyrrhotite and secondary covellite (Pl II) often disseminated, filling fractures or banded. Alterations in this deposit are potassic (biotitization), phyllitic (muscovite, sericite), siliceous (quartz, chalcedony), propylitic (chlorite, epidote, carbonate). Therefore, at this stage of investigation and in absence of drill holes (RC, DD), we cannot establish relationship between the alteration halos and the mineralization zonation as recognized in other environments of "porphyry copper" deposits through the world. In Burkina Faso, this type of deposit is associated with propylitized sub-volcanic intrusions like microdiorite, granophyre or extrusive lavas implying dacite, rhyolite. The sulfide paragenesis observed in these leptynitic formations are new and can contribute to the research of base metals in this country (Tab. II).

Key words: Burkina Faso, Palaeoproterozoic, leptynite, tonalite, hydrothermal alteration, small deposit, sulfurs, porphyry copper.

INTRODUCTION

Le Burkina Faso appartient du point de vue géologique au domaine Baoulé-Mossi de la dorsale de Léo (Fig. 1). Cette dorsale située au Sud du Craton Ouest Africain est séparée du bouclier Réguibat par la synclise de Taoudeni (Fig. 1). Dans ce pays, le socle paléoprotérozoïque façonné au cours de l'orogénèse éburnéenne (2200-2000 Ma) (Bessoles 1977, Lemoine 1988, Boher *et al.* 1992, Castaing *et al.* 2003a) contient des ceintures de roches vertes birimiennes et des rides granitiques polycycliques occupant 80 % du territoire (Naba 1999, Sattran & Wenmenga 2002, Kagambèga 2005). Ces ceintures constituent le contexte privilégié de concentration de métaux précieux et de métaux de base. Les minéralisations sulfurées type amas à pyrite, sphalérite, pyrrhotite, galène ± chalcopyrite ± mispickel sont encaissées par un niveau épicyclique au sein d'une enveloppe volcano-sédimentaire (Napon 1988). Les minéralisations sulfurées de type porphyre à pyrite, chalcopyrite, chalcosine et molybdénite sont liées à une variété de roches subvolcaniques (microdiorite, diorite quartzifère, granophyre) ou volcaniques (dacite, rhyolite) affectées par l'altération propylitique. Contrairement aux ceintures, peu de travaux ont été consacrés à l'évaluation des ressources minérales des granitoïdes paléoprotérozoïques associés aux ceintures, dont les termes rubanés ou foliés sont interprétés comme des produits de

différenciation des volcanites basiques birimiennes (Castaing *et al.* 2003a) parmi lesquels figurent les formations leptynitiques.

CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

Au Burkina Faso, les travaux de cartographie géologique (Fig. 2) (Castaing *et al.* 2003a) joints à ceux de Sawadogo (1983), de Zonou (1987) et de Wenmenga & Affaton (2003) mettent en évidence des complexes de leptynites ou leptyno-amphibolitiques associés aux ceintures de roches vertes. Ces formations constituent des bandes allongées suivant une direction NE-SW principale et NW-SE secondaire. Elles affleurent essentiellement dans la partie centrale et orientale et plus rarement dans la zone septentrionale du pays. L'analyse cartographique montre que la majorité des formations leptynitiques se trouve prise en «sandwich» entre les ceintures de roches vertes birimiennes et les domaines tonalitiques (Castaing *et al.* 2003a) composés de granodiorite, tonalite et diorite quartzifère parfois rubanées ou foliées. Les ceintures de roches vertes birimiennes sont formées de séquences volcano-sédimentaires et volcaniques basiques à ultrabasiques. Les contacts tectoniques existent entre ces formations leptynitiques sus mentionnées et les autres formations paléoprotérozoïques, essentiellement contrôlés

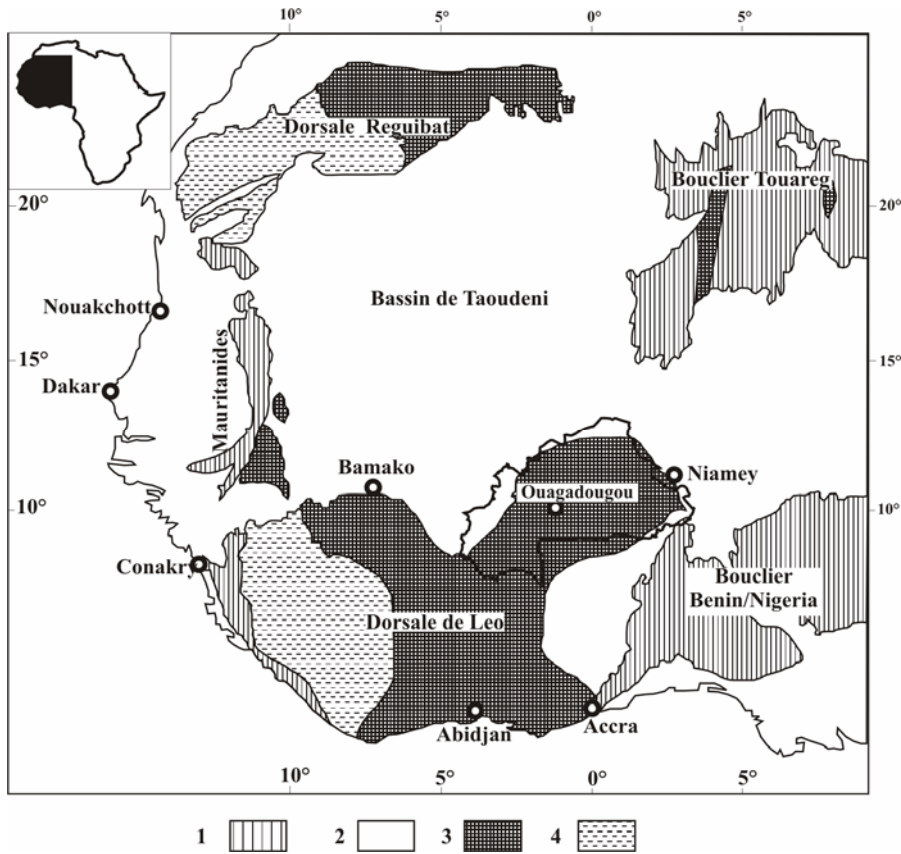


Figure 1. Carte géologique simplifiée du Craton Ouest Africain d'après Boher *et al.* (1992) (in Castaing *et al.* 2003a). 1, Formation d'âge Panafricain à Hercynien ; 2, couverture sédimentaire néoproterozoïque à phanérozoïque ; 3, formation des ceintures et granitoïdes birimiens (2,25-2,0 Ga) ; 4, formations archéennes (3,5-2,6 Ga).

Figure 1. Simplified geological map of West African Craton from Boher *et al.* (1992) (in Castaing *et al.* 2003a). 1, Panafrican to Hercynian formations; 2, Neoproterozoic to Phanerozoic sedimentary cover; 3, Greenstone belts and Birimian granitoids (2,25-2,0 Ga); 4, Archean formations (3,5-2,6 Ga).

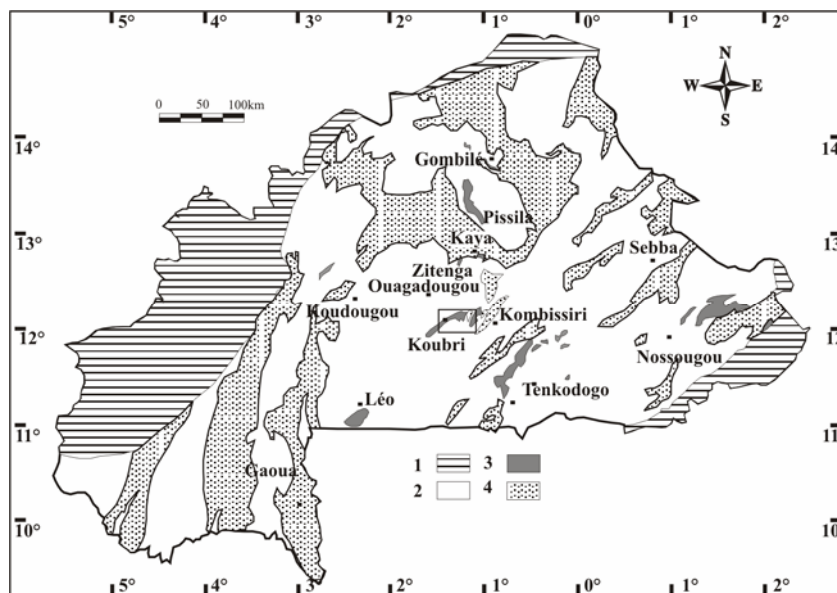


Figure 2. Carte géologique schématique du Burkina Faso à 1/1 000 000 (Castaing *et al.* 2003a) et localisation de la zone d'étude (rectangle). 1, formation sédimentaire néoproterozoïque à paléozoïque ; 2, granitoïdes paléoproterozoïques indifférenciés ; 3, formations leptynitiques paléoproterozoïques ; 4, ceintures de roches vertes birimiennes.

Figure 2. Schematic geological map of Burkina Faso at 1/1000000 (Castaing *et al.* 2003a) and location of the study zone. 1, Palaeozoic to Neoproterozoic sedimentary formation; 2, undifferentiated Palaeoproterozoic granitoids; 3, Palaeoproterozoic leptynitic formations; 4, Birimian greenstone belts.

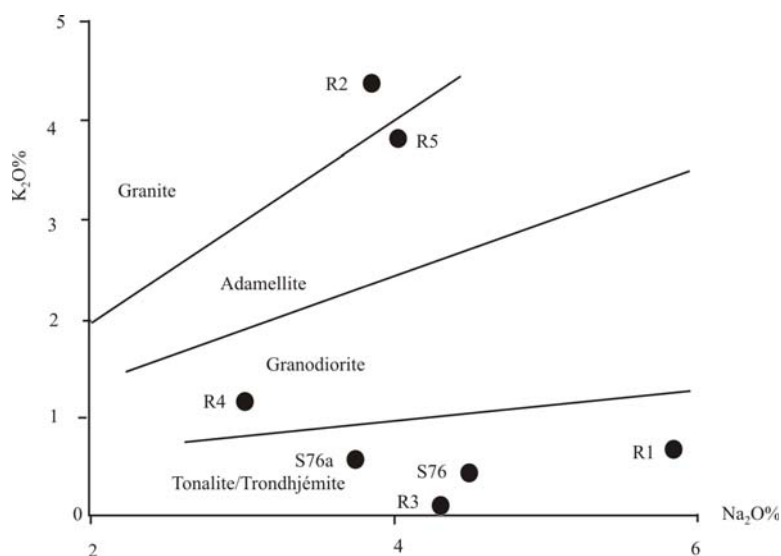


Figure 3. Classification pétrographique des faciès représentatifs des formations leptynitiques (Ouagadougou, Koudougou, Kaya) dans le diagramme de Harpum (1963). R1, R2, leptynites à biotite (Ouagadougou/carrière de Tintin) ; R3, R4 ; leptynites à biotite (région de Kaya 1) ; R5, leptynites à biotite (région de Koudougou) ; S76, S76a, leptynites à grenat (région de Kaya 2).

Figure 3. Petrographic classification of leptynitic formations in Harpum (1963) diagram. R1, R2, biotite leptynites (Ouagadougou/Tintin quarry); R3, R4, biotite leptynites (Kaya 1 area); R5, biotite leptynites (Koudougou area); S76, S76a, garnet leptynites (Kaya 2 area).

par des fractures de direction principalement NE-SW. Au sein de ces formations leptynitiques se trouvent des septas métamorphiques basiques à ultrabasiques de taille variable, formant ce qu'on qualifie souvent de complexe leptyno-amphibolitique. Antérieurement, les formations leptynitiques et leptyno-amphibolitiques avaient été assimilées à des migmatites leptynitiques anté-birimiennes sous entendu libériennes ou archéennes (Ducellier 1956, Bonnard 1967, Hottin & Ouédraogo 1975), mais la tendance actuelle consiste à les considérer comme des granitoïdes rubanés paléoprotérozoïques (Castaing *et al.* 2003a, Naba *et al.* 2004, Kagambèga 2005, Kagambèga *et al.* 2006). Les âges Sm/Nd mesurés sur les leptynites de Pissila (2140 ± 32 Ma) par Boher *et al.* (1992) et U/Pb sur des faciès similaires à caractère trondhjémitique (2153 ± 7 Ma) (Castaing *et al.* 2003b) au NE de Ouagadougou (Fig. 2) confirment leur âge paléoprotérozoïque et leur appartenance à l'orogénèse éburnéenne. Sur l'un des complexes leptynitiques, à la faveur de l'ouverture de la carrière de Tintin, un indice de minéralisation sulfurée a été mis en évidence et fait l'objet de la présente étude préliminaire.

CARACTERES PETROGRAPHIQUES

L'examen pétrographique de plusieurs échantillons provenant de secteurs différents montre que la structure rubanée, bien que discrète, est une caractéristique constante des formations leptynitiques. Toutefois, leur texture varie des termes isogranulaires fins à moyens aux termes hétérogranulaires grossiers. La composition minéralogique est dominée par le quartz, le plagioclase et le microcline, alors que la biotite et parfois l'amphibole et le clinopyroxène constituent les phases mineures, à l'exception des faciès mésocrates où la présence des ferromagnésiens est plus abondante. Les minéraux de haut grade métamorphique (orthopyroxène, sillimanite)

caractéristiques du faciès granulite sont absents de cette paragenèse. Le diagramme de classification chimique de Harpum (1963) montre que ces formations leptynitiques sont de nature variée et s'apparentent soit à des tonalites/trondhjémites comparables à celles de la région de Kaya (Fig. 2) (Wenmenga & Affaton 2003), soit à des granodiorites, à des adamellites ou à des granites (Fig. 3). Cette association rappelle les TTG birimiens foliés ou non, décrits dans certaines régions de la Côte d'Ivoire (Lemoine 1988, Kouamelan 1996, Doumbia 1998, Daouda Yao 1998).

CARACTERISATION GEOCHIMIQUE

Matériel et méthode

Les analyses des éléments majeurs et des traces (Tab. I) des roches représentatives de complexes leptynitiques de quatre localités (Ouagadougou / carrière de Tintin, Koudougou, Kaya 1 et 2) ont été réalisées au Centre de Recherches Pétrographiques et Géologiques (CRPG) à Nancy (France) par ICP-MS. Certaines phases minérales supergènes spécifiques ont été identifiées par la diffraction des RX utilisant un appareil de marque Sigma 2080 à irradiation Cu K α . L'analyse d'une dizaine d'échantillons minéralisés contenant des métaux (Cu, Pb, Zn, Mo, Ag, Au) a été menée au Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso (BUMIGEB) par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme ou sans flamme. Les résultats figurent dans le tableau II.

Géochimie

Les formations leptynitiques présentent globalement un caractère fortement siliceux ($69\% \leq \text{SiO}_2 \leq 79\%$) mais hypo-alumineux ($\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 15\%$) et peu potassique ($\text{K}_2\text{O} \leq 4\%$) (Tab. I) contrôlé par la teneur variable des phases minérales majeures. Les teneurs en Sr (43 - 421,1 ppm) et

Tableau I. Analyse chimique des majeurs (%) et des traces (ppm) de quelques faciès des complexes leptynitiques et des laves basaltiques birimiennes du Burkina Faso. R1, R2, leptynites à biotite (Ouagadougou/carrière de Tintin) ; R3, R4, leptynites à biotite (région de Kaya 1) ; R5, leptynites à biotite (région de Koudougou) ; S76, S76a, leptynites à grenat (région de Kaya 2) ; KB1, KB2, basalte (Koudougou) ; OB1, OB2, basalte (Ouagadougou).

Table I. Chemical analysis of major(%) and trace elements (ppm) of some facies of birimian basaltic lavas and leptynitic formations of Burkina Faso. R1, R2, biotite leptynites (Ouagadougou/Tintin quarry); R3, R4, biotite leptynites (Kaya 1 area); R5, biotite leptynites (Koudougou area); S76, S76a, garnet leptynites (Kaya 2 area); KB1, KB2, basalt (Koudougou area); OB1, OB2, basalt (Ouagadougou area).

Localisation	Leptynites du Burkina Faso						Formations basaltiques de Koudougou et de Ouagadougou				
	Ouagadougou		Kaya 1		Koudougou	Kaya 2		Koudougou		Ouagadougou	
Elements	1	2	3	4	5	S76	S76a	KB1	KB2	OB1	OB2
SiO2	78,65	69,2	77,49	69,46	73,05	81	76	50,49	55,01	48,74	50,47
TiO2	0,32	0,64	0,23	0,56	0,2	0,08	0,19	1,45	1,21	1,03	1,1
Al2O3	9,84	14,85	10,42	13,29	13,97	10,2	11,4	15,16	14,65	14,51	13,99
Fe2O3(t)	3,35	3,86	4,22	4,8	1,53	1,25	3,17	12,87	11,51	12,89	13,15
MnO	0,04	0,06	0,07	0,09	0,03	0,04	0,1	0,18	0,19	0,18	0,19
MgO	0,31	0,8	0,19	2,23	0,47	0,2	0,32	5,53	3,82	8,01	6,62
CaO	0,33	1,5	1,83	3,55	1,51	2,3	2,77	12,42	8,51	9,23	9,28
Na2O	5,8	3,82	4,31	3,04	4,03	4,35	3,82	1,43	3,21	1,58	1,5
K2O	0,74	4,4	0,15	1,22	3,83	0,58	0,65	0,15	0,32	0,16	0,14
P2O5	0,04	0,09	0,02	0,16	0,07	—	—	0,08	0,13	0,08	0,08
LOI	0,6	0,6	1	1,2	1,1	—	—	0,3	1,3	3,4	3,1
Total	100,08	99,82	98,93	99,6	99,85	100,83	99,13	100,06	99,86	99,81	99,62
Li(ppm)	—	—	1,7	129,4	—	—	—	—	—	—	—
Cs	2,6	4	0,1	7,1	5,5	—	—	0,3	0,2	0,1	0,2
Rb	29,7	95,6	5,2	85	155,3	—	—	3,4	8	4,5	3,2
Ba	94	974	111,5	314,8	783	—	—	61	184	53	25
Sr	43,7	268,4	95,8	150,6	421,1	—	—	191,9	290,6	124,9	167,4
U	1,3	2,5	1	0,6	4,5	—	—	—	0,5	0,2	—
Th	2,1	6,9	2,6	1,4	11	—	—	0,2	1,7	0,2	0,3
Ta	0,7	0,6	0,7	0,4	0,5	—	—	0,3	0,3	0,2	0,2
Nb	6,5	8,1	8,6	5	4,5	—	—	3,2	4,1	2,4	2,6
Hf	5,5	7,1	9	2,8	3,5	—	—	1,9	3,1	1,7	1,6
Zr	213,5	266	289,9	114,9	122,8	—	—	65,7	111,3	51,5	56,8
Y	59,2	30,5	54,4	25,4	3,7	—	—	23,6	24,8	20,8	22,4
Ni	4,5	4	7,6	16,6	1,9	—	—	132,2	14,4	69,9	323,9
Cr	1,8	4,5	6,4	18,2	12	—	—	29	3,2	54	108,6
Co	0,8	3,5	1,3	10,6	3,1	—	—	60,9	44,4	47,1	48,7
Sc	6,7	8,4	7,65	10,39	2,4	—	—	24,7	17,4	25,5	28,1
V	7	16	10	59	19	—	—	367	293	368	396
La	21,3	30,8	14,1	14,5	26,6	—	—	4	12,6	3,5	3,5
Ce	54,3	70,4	35,2	22,4	46,5	—	—	9,9	24,2	8,8	9,4
Pr	7,28	8,56	4,58	3,37	4,92	—	—	1,57	3,12	1,37	1,43
Nd	35,3	35,8	21	14,5	16,8	—	—	8,9	13,8	7,4	7,5
Sm	8,3	7	4,9	3,2	2,5	—	—	2,6	3,4	2,1	2
Eu	2,72	1,56	1,21	0,95	0,61	—	—	1,06	0,97	0,91	0,89
Gd	9,71	5,66	5,82	3,97	1,63	—	—	3,79	3,67	3,08	3,18
Tb	1,56	0,89	1,08	0,63	0,16	—	—	0,63	0,68	0,52	0,54
Dy	9,74	6,03	8,11	3,77	0,81	—	—	4,22	3,57	3,47	3,85
Ho	2,09	1,17	1,86	0,82	0,11	—	—	0,96	0,93	0,74	0,85
Er	6,89	3,72	6,46	2,15	0,33	—	—	2,89	2,9	2,26	2,73
Tm	0,9	0,44	1,05	0,3	<0,05	—	—	0,34	0,38	0,33	0,38
Yb	6,45	3,22	6,7	1,79	0,33	—	—	2,76	2,8	2,05	2,55
Lu	0,9	0,53	1,06	0,35	0,05	—	—	0,42	0,41	0,32	0,38

Tableau II. Analyse des métaux précieux (ppb) et de base (ppm) dans les différents faciès du complexe leptynitique de la carrière de Tintin. T5A, leptynite à biotite à grain moyen ; T5B, leptynite à biotite à grain fin ; T6, leptynite à biotite ; T7, leptynite à biotite à grain fin ; T8, gneiss mésocrate ocellé ; T9, micro-monzotonalite ; T10, monzotonalite à biotite à grain fin.

Table II. Precious metal (ppb) and base metal (ppm) analysis of some representative samples of Tintin quarry leptynitic formations; T5A, medium-grained biotite leptynite; T5B, fine-grained biotite leptynite; T6, biotite leptynite; T7, fine grained biotite leptynite; T8, mesocratic augen gneiss; T9, micro-monzotonalite; T10, fine grained biotite monzotonalite

Echantillon	N°	Au-ppb	Ag	Cu	Mo	Pb	Zn
T5A	1	40		5	–	–	54
T5B	2	230	0.4	7	–	2	22
T6	3	–	–	13	–	–	21
T7	4	–	–	2	–	–	2
T8	5	–	–	3	0.2	–	88
T9	6	–	–	6	–	–	36
T10	7	–	–	11	–	1	30

en Ba (94 – 783 ppm) sont extrêmement variables au sein d'un même complexe ou d'un complexe à l'autre et reflètent la distribution des feldspaths dans les roches. Elles sont relativement enrichies en éléments incompatibles [$4 < \text{Nb} < 9$ ppm, $14 < \text{La} < 31$ ppm, Th/Nb (0,28-2,4)] et en terres rares lourdes ($\text{Yb} = 0,33-6,7$ ppm) (Tab. I). Leur affinité pour les séries tholéiitiques d'une part et calco-alcalines faiblement potassiques d'autre part (Wenmenga & Affaton 2003) exprimée dans le diagramme de Peccerillo & Taylor (1976) (Fig. 4) confirme la diversité des sources

géochimiques de ces formations leptynitiques en accord avec la différenciation pétrographique des faciès. Les coulées basaltiques birimiennes (OB1, OB2, KB1, KB2) s'inscrivent dans le même champ des tholéiites que la majorité des formations leptynitiques, malgré la mobilité relative de la silice et de la potasse prises comme critère de caractérisation. Il s'avère que quelque soit leur source, ces formations leptynitiques demeurent orthodérivées d'après le diagramme de De la Roche (1965) (Fig. 5). A l'exception des leptynites de la région de Koudougou (R5), les autres formations montrent des spectres de terres rares normalisés aux chondrites CL (Sun & McDonough 1989) plus enrichis pour certains en LREE et HREE par rapport à ceux des coulées basaltiques birimiennes presque plats (Fig. 6) qui rappellent ceux des N-MORB (Castaing *et al.* 2003b). Les profils des REE de ces deux groupes de roches sont interrompus par de faibles anomalies négatives en Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,69$ à $1,09$) dues au fractionnement du plagioclase. Selon ces auteurs, quelque soit l'affinité de ces formations leptynitiques, leur signature est tout à fait comparable à celle des laves birimiennes apparentées à celles des zones de subduction moderne dont elles pourraient être des produits dérivés (Castaing *et al.* 2003a).

L'INDICE DE MINERALISATIONS SULFUREES DE LA CARRIERE DE TINTIN

Géologie

Cet indice a été mis en évidence dans la bande leptynitique de Koubri (Fig. 7) dans une carrière d'exploitation de matériaux pour bitumage de l'axe routier Ouagadougou – Kombissiri – Pô, cartographiée et décrite par Castaing *et al.* (2003b). L'environnement géologique est dominé par des intrusions de granites alcalins et calco-alcalins paléoprotérozoïques dans les formations volcano-

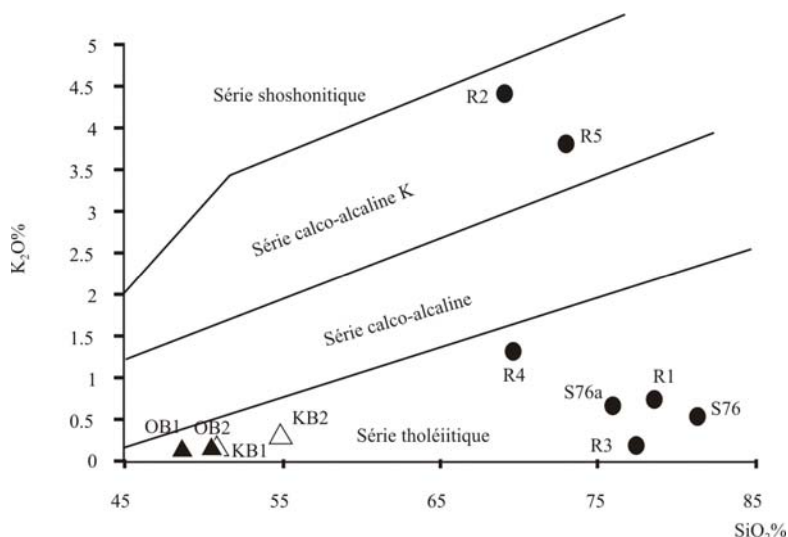


Figure 4. Affinités géochimiques des formations leptynitiques et des laves basaltiques birimiennes dans le diagramme $\text{SiO}_2\%$ versus $\text{K}_2\text{O}\%$ (Peccerillo & Taylor 1976). Même légende que la Figure 3 pour R1 à R5 et S76, S76a. OB1, OB2, basalte (Ouagadougou) ; KB1, KB2, basalte (Koudougou).

Figure 4. Geochemical affinities of Birimian basaltic lavas and leptynitic formations in the $\text{SiO}_2\%$ versus $\text{K}_2\text{O}\%$ diagram (Peccerillo & Taylor 1976). Same symbols as Figure 3 for R1 to R5 and S76, S76a. OB1, OB2, basalt (Ouagadougou area); KB1, KB2, basalt (Koudougou area).

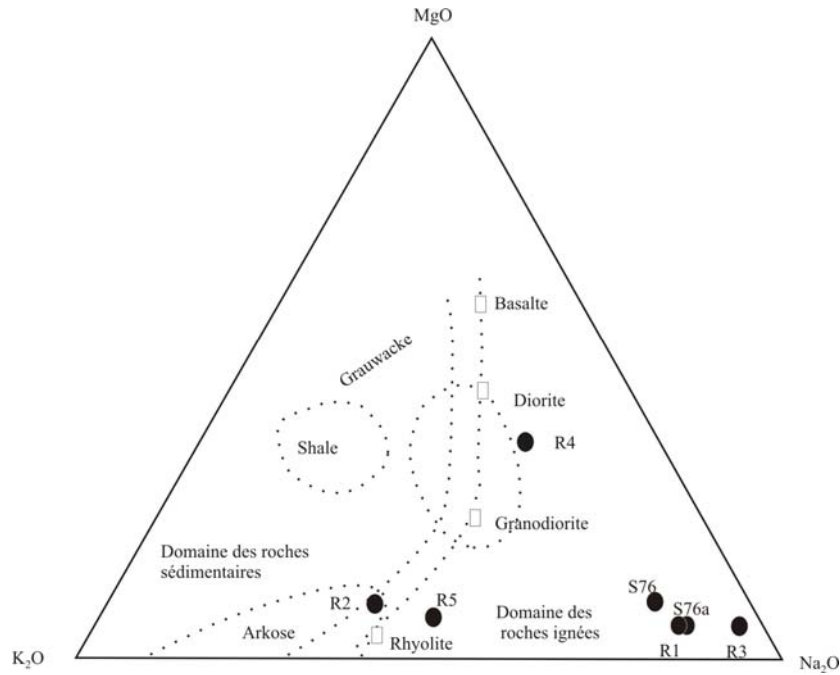


Figure 5. Diagramme MgO-K₂O-Na₂O (De la Roche 1965) indiquant une source ignée des formations leptynitiques. Même légende que la Figure 3.

Figure 5. MgO-K₂O-Na₂O (De la Roche 1965) diagram showing igneous origin of leptynitic formations. Same symbols as Figure 3.

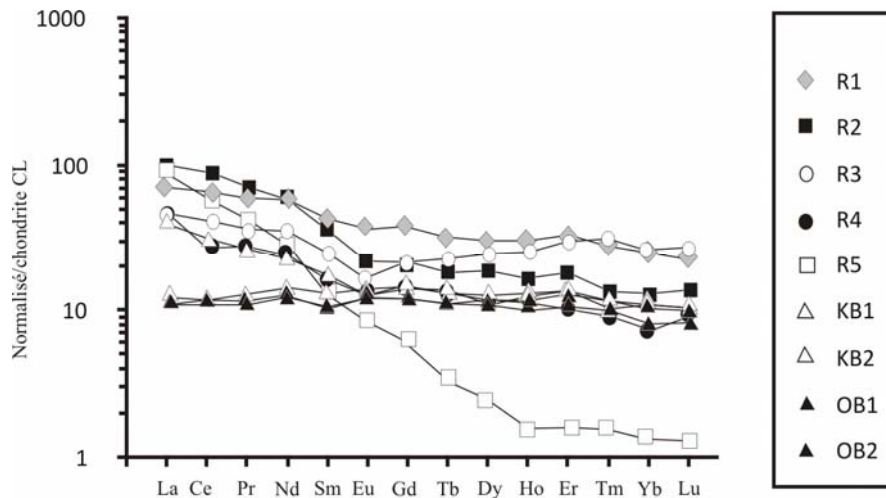


Figure 6. Spectres des terres rares des formations leptynitiques et des laves basaltiques birimiennes normalisées aux chondrites (Sun & McDonough 1989). Même légende que les figures 3 et 4.

Figure 6. Chondrites normalized REE diagram of birimian basaltic lavas and leptynitic formations (Sun & McDonough 1989). Same symbols as figures 3 and 4.

sédimentaires et volcaniques (rhyolite, rhyodacite, dacite) épimétamorphiques birimiennes et de rares occurrences d'amphibolites parfois gneissiques. Elles sont recoupées par des dykes doléritiques fini-Eburnéens à méso-protérozoïques orientés NW-SE et par de grands accidents tardi-éburnéens de direction NE-SW. Cet indice a une extension limitée en surface (250 m²) mais faute de sondages miniers, son enracinement reste à évaluer au sein de ces formations leptynitiques qui sont affectées par une intense fracturation orientée N-S et NW-SE. Le faciès

dominant est une leptynite grise ou rose à biotite, rubanée (Pl. I-1) à texture grenue à grain fin à moyen. Elles sont recoupées par des filonnets aplo-pegmatitiques ou par des filons massifs de microdiorite porphyrique (Pl. I-2). Localement, on rencontre des faciès gneissiques mésocrates à biotite à texture ocellée, marqués par une nette foliation et une linéation des porphyroblastes de plagioclase et parcourus par des veinules (Pl. I-3). Les filons de microdiorite sont en règle générale bréchifiés et cimentés par des venues leucogranitiques tardives (Pl. I-4).

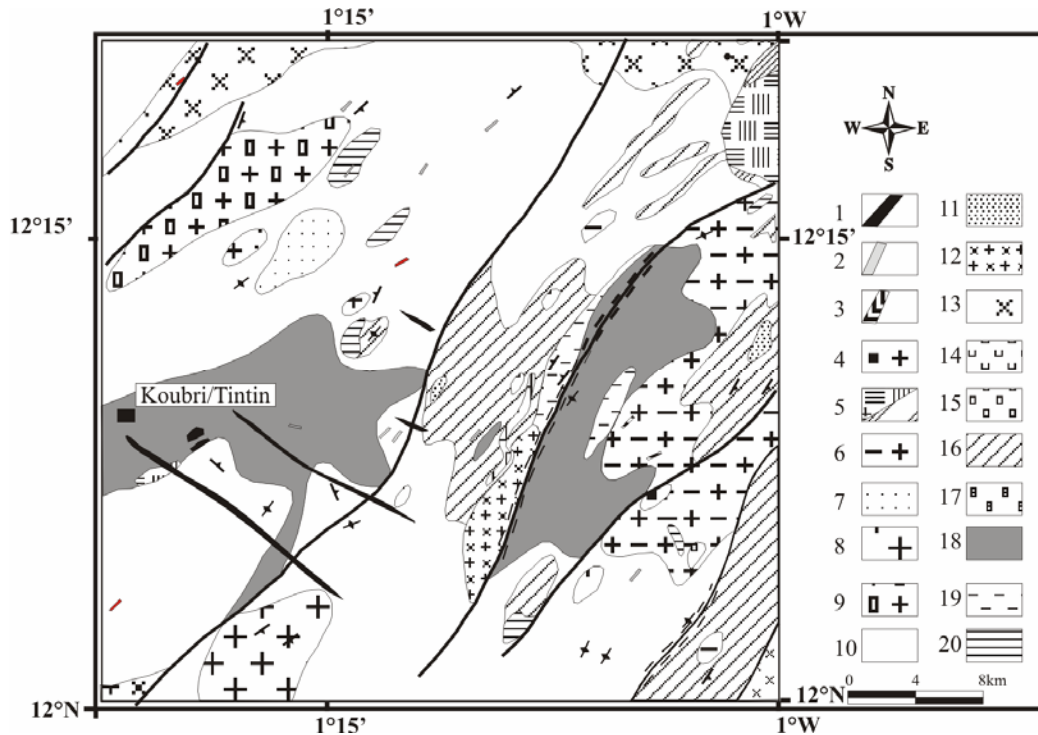


Figure 7. Carte géologique de la zone d'étude extraite de la carte géologique de Ouagadougou à 1 / 200 000 (Castaing *et al.* 2003b). 1, dyke de dolérite ; 2, filon de quartz ; 3, pegmatite et aplitite ; 4, granite porphyroïde à augite aegyrinique et riebeckite ; 5, syénite quartzifère à aegyrine et arfvedsonite ; 6, granite subleucocrate à biotite et muscovite ; 7, granite à grain fin à moyen à biotite ; 8, granite à biotite et amphibole ; 9, granite porphyroïde à biotite et rare amphibole ; 10, granite à grain moyen à biotite et rare amphibole ; 11, microgranodiorite ; 12, granodiorite, tonalite et diorite quartzifère à biotite et amphibole ; 13, granodiorite, tonalite et diorite quartzifère foliée ; 14, rhyolite et rhyodacite ; 15, tuf dacitique ; 16, formations volcano-sédimentaires birimiennes ; 17, gabbro et microgabbro ; 18, complexe de leptynite et granodiorite ; 19, gneiss amphibolitique ; 20, amphibolite à pyroxène et ultrabasite.

Figure 7. Geological map of the study area extract from geological map of Ouagadougou (Castaing *et al.* 2003b). 1, dolerite dyke; 2, quartz vein; 3, aplite and pegmatite; 4, riebeckite and aegirine augite porphyroid granite; 5, arfvedsonite and aegirine quartziferous syenite; 6, muscovite and biotite subleucocratic granite; 7, medium to fine grained biotite granite; 8, amphibole and biotite granite; 9, biotite and scarce amphibole granite; 10, biotite and scarce amphibole medium grained granite; 11, microgranodiorite; 12, amphibole and biotite quartziferous diorite, tonalite and granodiorite; 13, foliated quartziferous diorite, tonalite and granodiorite; 14, rhyodacite and rhyolite; 15, dacitic tuff; 16, Birimian volcano-sedimentary rocks; 17, microgabbro and gabbro; 18, granodiorite and leptynite complex; 19, amphibolitic gneiss; 20, pyroxene amphibolite and ultrabasite.

Pétrographie

Il existe une hétérogénéité de faciès dans cette carrière caractérisée par une importante variation de texture et de structure ainsi que la nature et la répartition des phases minérales majeures. Les leptynites et les gneiss ocellés indiquent une composition de tonalite à monzotonalite marquée par une forte quantité de quartz, de plagioclase (oligoclase) et des proportions variables de la biotite (10-35%) et des feldspaths potassiques (5-20%). Cette composition apparaît également dans les termes granitiques non rubanés correspondant aux variations locales de faciès au sein de ces formations métamorphiques. Les filons basiques correspondent à des micro-monzodiorites porphyriques à biotite et amphibole abondante (40%), à quartz rare, feldspath potassique (microcline, orthose) accessoire et plagioclase aussi important que dans les faciès encaissants.

Types d'altération

Les études de terrain soutenues par les observations macroscopiques et microscopiques ont permis de distinguer

deux types d'altération associés à la zone minéralisée : d'une part, l'altération supergène et d'autre part, l'altération hydrothermale.

L'altération supergène

A l'affleurement, des enduits superficiels de couleur jaunâtre à verdâtre (Pl. II-1) ou blanchâtre (Pl. II-2) signalent par leur odeur fétide l'existence de la minéralisation sulfurée. Les dépôts de phases minérales tendres et de couleur blanchâtre entre les plans de fissure des leptynites ont été identifiés en diffractométrie des rayons X comme une halotrichite dont les caractéristiques cristallographiques sont a : 6,1878 ; b : 24,255 ; c : 21,2313 ; d : 15,82512 ; 12,12749 ; 9,59022 ; 7,91256. Le remplacement pseudomorphique des sulfures par des oxydes de type magnétite, hématite/goethite est un mode d'altération remarquable dans cet indice.

L'altération hydrothermale

Elle se manifeste à l'échelle de l'échantillon macroscopique ou microscopique et l'on distingue par ordre d'importance cinq types : l'altération potassique,

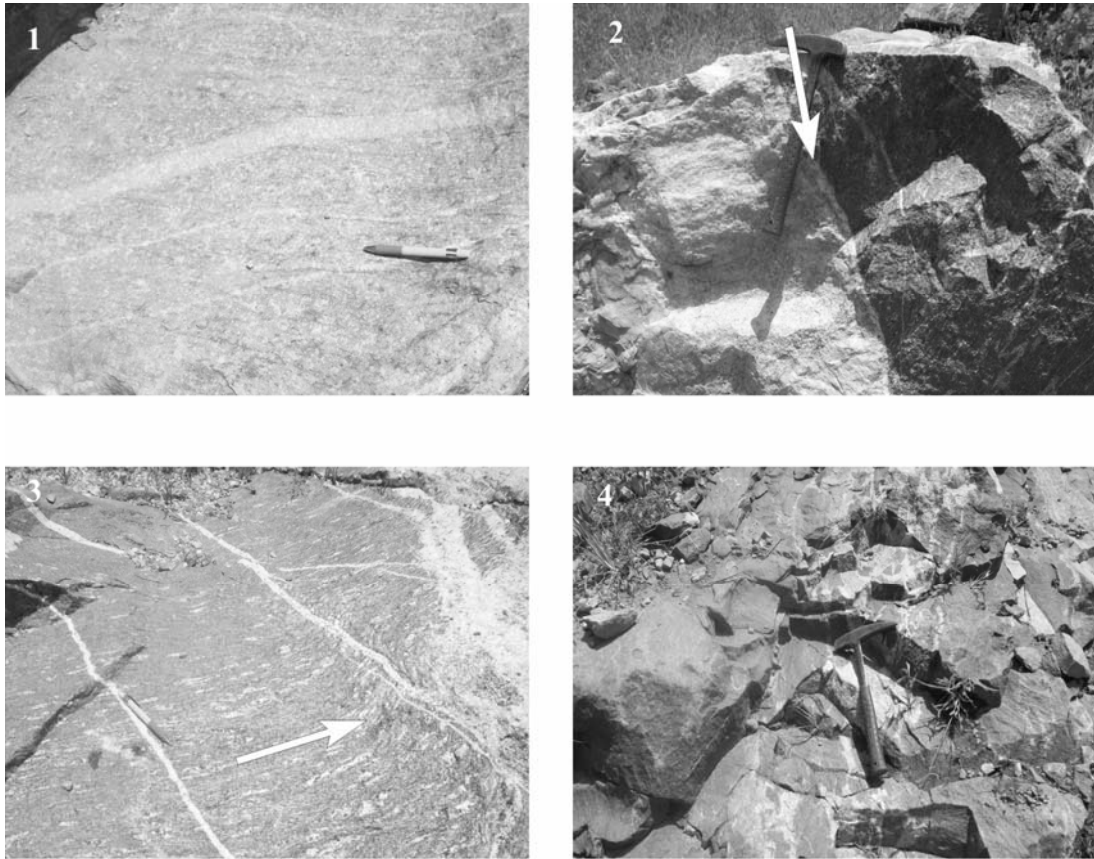


Planche I. Formations leptynitiques de la carrière de Tintin. 1, foliation discrète dans une leptynite à biotite traversée par des filonnets d'aplite ; 2, contact entre la leptynite et un filon de micro-monzodiorite porphyrique ; 3, gneiss mésocrate œillé montrant une foliation et linéation de porphyroblastes de feldspath et recoupé par des filonnets de leucogranite ; 4, bréchification des filons de microdiorite par des liquides granitiques tardifs.

Plate I. Leptynitic formations of "Tintin" quarry. 1, biotite leptynite showing discrete foliation and crosscut by aplite veinlets; 2, contact between leptynite and porphyritic micro-monzodiorite; 3, mesocratic augen gneiss showing distinct feldspar porphyroblast lineation and foliation cut by leucogranitic veinlets; 4, brecciation of microdiorite dyke by latest granitic liquids.

l'altération phylliteuse, l'altération siliceuse, l'altération propylitique et l'altération argileuse. L'altération potassique s'exprime par un remplissage systématique des fissures par de la biotite brune (biotitisation) et par la perthitisation des plagioclases dans les faciès leptynitiques. L'altération phylliteuse consiste à un dépôt d'amas de muscovite / séricite dans les plans de fractures issues de la déstabilisation de la biotite primaire et/ou des feldspaths

aussi bien dans les termes rubanés que granitiques. La silicification de ces roches génère des veinules de quartz à sulfures ou des dépôts de concrétion de calcédoine dans les boxwerks. La propylitisation bien que légère (chlorite ± séricite ± carbonate) affecte spécifiquement les filons de micro-monzodiorite. L'altération argileuse type kaolinique apparaît à l'état de trace dans les formations leptynitiques aux dépens des feldspaths.

Planche II. Minéralisations sulfurées de la carrière de "Tintin". 1, dépôt de produits minéraux supergènes jaunâtres à verdâtres sur un bloc de leptynite à biotite riche en sulfures ; 2, les enduits blanchâtres correspondent à des produits minéraux supergènes de nature sulfatée (halotrichite) ; 3, association pyrite (Py) subautomorphe et chalcopyrite (Cpy) xénomorphe (TT5A) ; 4, association de cristaux de pyrite automorphes grossiers, de chalcopyrite et pyrrotite (Po) xénomorphe (TT3) ; 5, inclusions de pyrite dans la chalcopyrite xénomorphe (TT5B) ; 6, chalcopyrite de forme amiboïde déstabilisée en covellite (Cov) (T9) ; 7, fractures remplies par de la chalcopyrite allongée (T6) ; 8, large plage de chalcopyrite avec de petites inclusions disséminées de chalcopyrite (TT5B).

Plate II. Sulfide deposit of Tintin quarry. 1, greenish and yellowish secondary minerals varnish resulting from supergene alteration of biotite leptynite block rich sulfide; 2, whitish coating on the same facies corresponding to supergene sulfate minerals deposits (halotrichite); 3, anhedral chalcopyrite and subhedral pyrite crystal association (TT5A); 4, anhedral pyrrotite and chalcopyrite in association with large euhedral pyrite crystal (TT3); 5, pyrite inclusions in anhedral chalcopyrite crystal (TT5B); 6, amiboid like shape chalcopyrite showing replacing covellite rim (T9); 7, elongated chalcopyrite filling fractures (T6); 8, wide chalcopyrite crystal including very small disseminated chalcopyrite inclusions (TT5B).

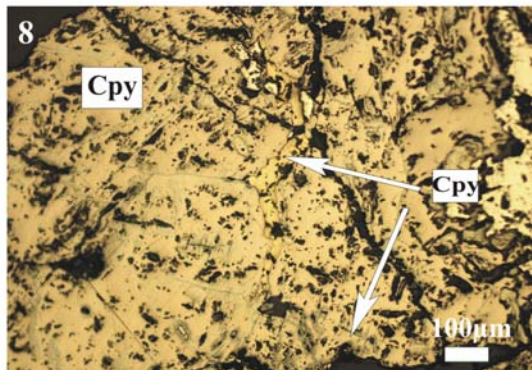
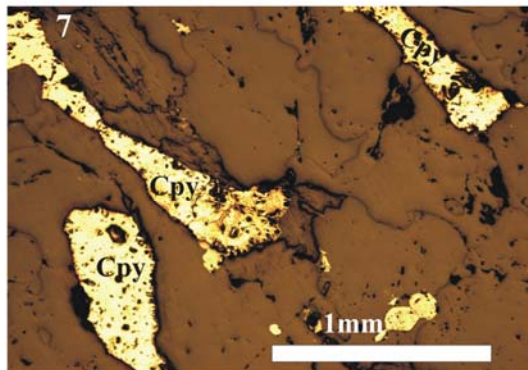
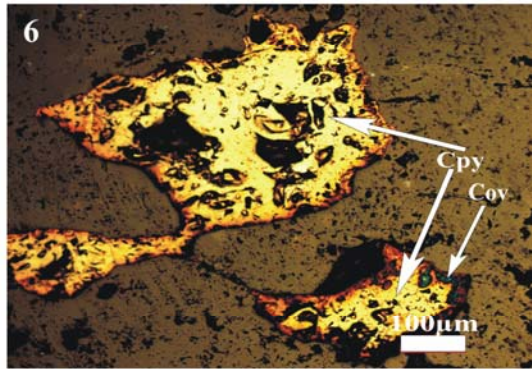
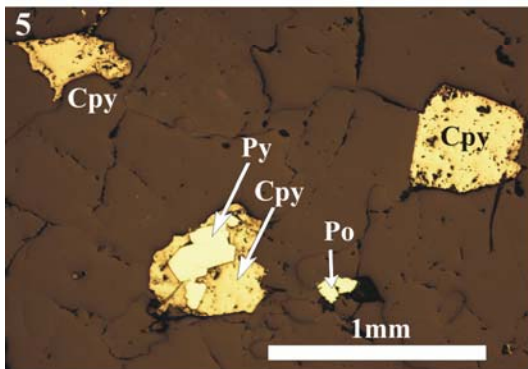
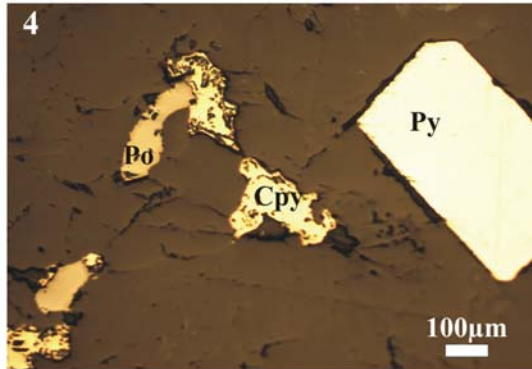
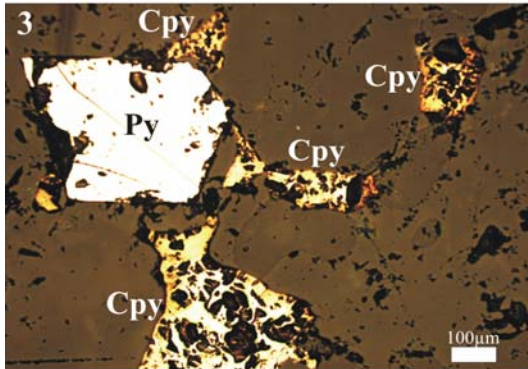
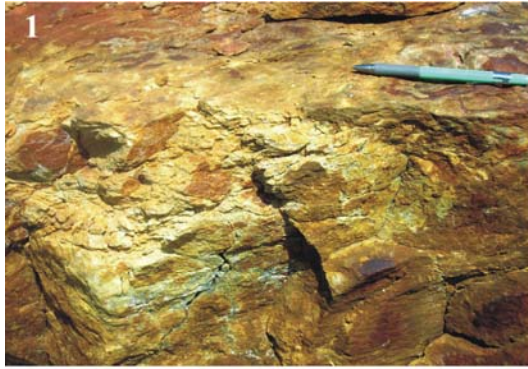


Planche II

Type de minéralisation

La minéralisation essentiellement sulfurée est systématiquement présente dans les formations gneissiques et granitiques de la carrière de Tintin, ainsi que dans leur cortège filonien aplo-pegmatitique et basique. L'assemblage minéralogique est marqué par la prédominance de la pyrite, la subordination de la chalcopyrite et la pyrrhotite. Ces sulfures se trouvent à l'état disséminé ou sous forme de remplissage des fissures ou de rubanement ou de trainée. Leur habitus et leur dimension et relations texturales sont variables. La pyrite (Py) est en cristaux subautomorphes disséminés (Pl. II-3) ou automorphes grossiers ($\approx 0,5$ mm) (Pl. II-4) ou à l'état d'inclusions dans la chalcopyrite (Pl. II-5). La chalcopyrite (Cpy) forme des cristaux fins, xénomorphes allongés (Pl. II-3) ou grossiers amiboïdes (Pl. II-6) rarement subautomorphes (Pl. II-5). Elle remplit les fractures des formations leptynitiques ou s'étire suivant elles (Pl. II-7). Elle développe par déstabilisation des bourgeons de pyrrhotite (Pl. II-4) ou des couronnes minces de phases minérales bleutées qui rappellent la covellite (Cov) (Pl. II-6). De petites inclusions de chalcopyrite au sein de larges cristaux de même nature, plaident pour l'existence de deux générations pour ce type de sulfure (Pl. II-8). La pyrrhotite forme également de fins cristaux (0,09 mm) disséminés ou juxtaposés à la pyrite dont elle proviendrait par rétro-morphose.

DISTRIBUTION DES METAUX

Six éléments métalliques ont été mesurés par absorption atomique, technique analytique dont les performances de détection sont limitées ; en effet, elle ne révèle ni la présence de l'argent, ni du molybdène ou du plomb (Tabl. II) mais des traces de Cu (2 à 13 ppm), de Zn (2 à 88 ppm) et d'au (40 à 230 ppb) dont les plus fortes teneurs sont associées aux faciès leptynitiques affectés par la silicification. Ces investigations sont certes sommaires et appellent à des analyses plus détaillées, plus approfondies et précises. A titre de comparaison, les gîtes de porphyre cuprifère de la région de Gaoua fournissent des teneurs de 0,8% de Cu et 0,5 g/t de Au, tandis que celui de Goren montre des valeurs Cu+Mo plus faibles (0,35%) encore moindres au niveau du gîte de Wayen à 0,25% de Cu. Le tonnage de ces gîtes varie entre 24 Mt et 45 Mt de minerai (Satran & Wenmenga 2002, Castaing *et al.* 2003a).

DISCUSSION

Les faciès cartographiés comme leptynites selon Castaing *et al.* (2003b) présentent un spectre de composition variant des tonalites/trondhjémites aux granites et constituent des bandes d'extension réduite entre les ceintures de roches vertes et les masses granitiques birimiennes. A l'image de la diversité des faciès pétrographiques au sein de ces formations, qui rappelle les TTG birimiens, deux affinités géochimiques majeures apparaissent : tholéitique d'une part et calco-alkaline franche à calco-alkaline modérée adakitique d'autre part (Castaing *et al.* 2003a et 2003b). Exception faite du faciès R5 dont le profil est différencié ($LaN/YbN=64$), les autres

types de roches montrent des spectres peu fractionnés ($LaN/YbN=2 - 8$) comparés à ceux des gneiss archéens des TTG de Finlande orientale (54 à 82 d'après Martin 1985) ou dabakaliens (22 à 26 selon Lemoine 1988) et enfin aux spectres des plutons trondhjémiques de Katiola-Marabadiassa ($LaN/YbN=17-37$) étudiés par Doumbia (1998). La similitude de leur signature géochimique avec les laves birimiennes tholéitiques, dont les spectres sont également peu fractionnés ($LaN/YbN=1 - 4$) et émises en contexte de subduction intraocéanique type moderne, a conduit les auteurs précédents à les identifier comme leurs produits de différenciation magmatique. Ce contexte reste jusqu'à présent peu exploré du point de vue de l'évaluation économique des ressources minérales, mais avec la découverte d'un indice de minéralisations sulfurées dans la carrière de Tintin au sein de la bande leptynitique de Koubri, une nouvelle piste d'investigations entre en jeu dans le secteur minier du Burkina Faso. La minéralisation consiste en un assemblage de sulfures où la pyrite et la chalcopyrite sont les phases prédominantes. L'assemblage chalcopyrite-pyrite parfois aurifère est systématique dans les gîtes de porphyre cuprifère du système birimien au Burkina (Satran & Wenmenga 2002). De telles associations ont été décrites par ailleurs dans d'autres gîtes de porphyre cuprifère où on signale en outre la présence de molybdénite (Cheilletz *et al.* 1978, Callier 1989, Minnitt 1986, Castaing *et al.* 2002), de la bornite (Cheilletz *et al.* 1978, Minnitt 1986), de la covellite (Minnitt 1986), de la galène et de la blende (Callier 1989) ou quelquefois de la tourmaline (Pintea & Udubasa 1999). Cette minéralisation est encaissée par un complexe de leptynite de composition tonalitique à monzotonalitique, de monzotonalite non métamorphique et de monzodiorite affectée par une variété d'altération hydrothermale légère (potassique, phylliteuse, siliceuse, argileuse). Ce contexte de granitoïde métamorphique à minéralisation sulfurée type cuprifère est inédit au Burkina Faso, mais on trouve des gîtes équivalents à travers certaines régions du monde (Cheilletz *et al.* 1978, Pintea & Udubasa 1999). La majorité des gîtes de porphyre cuprifère se trouve encaissée au Burkina Faso par des intrusions subvolcaniques (microdiorite, diorite quartzifère, microdiorite quartzifère parfois silicifiée, granophyre) ou extrusions (dacite, rhyolite) affectées par l'altération propylitique (Castaing *et al.* 2003a), ce qui paraît par ailleurs classique dans le monde. Le contexte géodynamique de ces types de minéralisation est celui des arcs insulaires associés aux zones de subduction (Cheilletz *et al.* 1978, Callier 1989, Sillitoe 1999, Castaing *et al.* 2003).

CONCLUSION

Les formations leptynitiques ou leptyno-amphibolitiques constituent des bandes étroites associées aux ceintures de roches vertes birimiennes et recoupées par des masses de granites éburnéens polycycliques. La diversité des faciès pétrographiques au sein des TTG est également mise en évidence dans le système birimien de la sous-région. Leur particularité réside dans le faible fractionnement des spectres REE comparés aux TTG archéens. Ces formations d'âge paléoproterozoïque d'après les mesures radiométriques montrent des signatures

géochimiques quasi-analogues aux coulées andésito-basaltiques birimiennes caractéristiques des zones de subduction moderne. Contrairement aux ceintures de roches vertes, ces formations leptynitiques restent sous-évaluées du point de vue des ressources minérales. Dans la bande de Koubri au sein de la carrière de Tintin, un indice de minéralisations sulfurées a été identifié dans un environnement constitué de gneiss leucocrate à mésocrate à biotite de composition tonalitique et un système filonien de nature microdioritique. Ces formations sont affectées par une altération hydrothermale observée à l'échelle de l'échantillon, marquée par la biotitisation, la séricitisation, la silicification et le type propylitique chlorito-carbonatée. Les sulfures qui définissent cet indice consistent en un assemblage à pyrite dominante, chalcopyrite subordonnée, pyrrhotite et covellite secondaire. Ils sont encaissés principalement par les leucogneiss et les gneiss mésocrates plus ou moins granitisés de composition variant des tonalites/trondhjémites aux granites. La nature de cet encaissant diffère des intrusions subvolcaniques et des extrusions neutres à acides (microdiorite, granophyre, dacite, rhyolite) birimiennes porteurs des gîtes de porphyre cuprifère à Cu, Mo, Au, identifiés dans plusieurs sites dans les ceintures de roches vertes du Burkina Faso.

Remerciements. Les auteurs remercient Dr J.L. DEVIDAL du Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) à Clermont Ferrand (France) pour les analyses diffractométriques des échantillons fournis à titre gracieux, de même que les autorités compétentes du BUMIGEB et technique du laboratoire de chimie pour les analyses chimiques des métaux. Nous remercions vivement les reviewers de l'article pour leur évaluation pertinente. Ce travail a bénéficié de l'appui du projet RAMSES/EDULINK financé par l'Union Européenne à qui nous exprimons notre profonde gratitude.

Références

- Bessoles B. 1977. *Géologie de l'Afrique : le craton Ouest Africain*. Mém. B.R.G.M., Orléans, 88, 403 p.
- Boher M., Abouchami W., Michard A., Albarède F. & Arndt T-N. 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *J. Geophys. Res.*, 97, 345-369.
- Bonnard F. 1967. *Carte géologique du degré carré de Pô*. Edition D.G.M., Ouagadougou, Burkina Faso.
- Callier L. 1989. Le porphyre à molybdène d'âge hercynien de Beauvais en Basse Normandie. *Chron. Rech. Min.*, 496, 3-23.
- Castaing C., Bila M., Milési J-P., Thiéblemont D., Le Metour J., Egal E., Donzeau M., Guerrot 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. 2003a. *Notice explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1000 000*. 3^{ème} édition, BRGM, Orléans, France, 148 p.
- Castaing C., Chevremont P., Donzeau M., Egal E., Le Metour J., Thiéblemont D., Teygey M., Guerrot C., Billa M., Itard Y., Delpont G., Ki J-C & Zunino C. 2003 b. *Notice explicative de la carte géologique du Burkina Faso à 1/200000*. Feuille Ouagadougou, 3^{ème} édition, BRGM, Orléans, France, 80 p.
- Cheilletz A., Kachrillo J.-J., Sonet J. & Zimmermann J.-L. 1978. *Pétrographie et géochronologie de deux complexes intrusifs à porphyre cuprifère d'Haïti*. Contribution à la connaissance de la province cuprifère laramienne de l'arc insulaire des grandes antilles. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7, XX, 6, 907-914.
- Daouda Yao B. 1998. *Lithostratigraphie et pétrologie des formations birimiennes de Toumodi-Fettékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du Paléoprotérozoïque du craton Ouest-Africain*. Thèse, Univ. Orléans, France, 191 p.
- De la Roche H. 1965. *Sur l'existence de plusieurs faciès géochimiques dans les schistes paléozoïques des pyrenées luchonnaises*. *Géol. Rundsch*, 55, 275 p.
- Doumbia S. 1998. *Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de Katiola-Marabadiassa (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoprotérozoïque*. Doc. B.R.G.M., N°276, Thèse, Univ. Orléans (1997), 251 p.
- Ducellier J. 1956. Rapport de fin de campagne (Janvier-Avril 1956). *Géologie de la région de Ouagadougou-Boulsa (Haute-Volta)*. Rapport D. F. M. G-D.K.R., Ouagadougou, Burkina Faso, 72 p.
- Harpum J- R. 1963. Petrographic classification of granitic rocks by partial chemical analysis. *Tanganyka Geol. Surv.*, 10, 80-88.
- Hottin G. & Ouédraogo O- F. 1975. *Notice explicative de la carte géologique à 1/1 000 000 de la République de Haute Volta*. Edition. B.R.G.M., Arch. D.G.M., 58 p.
- Kagambèga N. 2005. *Typologie des granitoïdes paléoprotérozoïques du Burkina : cas des granitoïdes de Pô*. Thèse 3^{ème} cycle, UCAD, Dakar, Sénégal, 200 p.
- Kagambèga N., Lompo M., Naba S., Diallo P-D & Debat P. 2006. Caractère magmatique des granitoïdes rubanés de Pô (Burkina Faso-Afrique de l'Ouest) : problème des migmatites paléoprotérozoïques. *Ann. Univ. Ouagadougou*, série C, 004, 1-24.
- Kouamélan A.N. 1996. *Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implication dans la transition Archéen-Protérozoïque*. Thèse de Doctorat, Univ. Rennes I, N°73, 289 p.
- Lemoine S. 1988. *Evolution géologique de la région de Dabakala (NE de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur*. Thèse d'Etat, E293, Univ. Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 334 p.
- Martin H. 1985. *Nature, origine et évolution d'un segment de croûte continentale archéenne : contraintes chimiques et isotopiques. Exemple de la Finlande orientale*. Mémoire CAESS, 1, Rennes, France.
- Minnitt R.C.A. 1986. Porphyry copper - Molybdenum mineralization at Haib River, South West Africa/Namibia. In: Anhaeusser C.R. & Maske M.S. (eds) - Mineral deposits of Southern Africa, Vols I & II. *Geol. Soc. S. Afr.*, Johannesburg, 1567-1585.
- Naba S. 1999. *Structure et mode de mise en place de pluton granitique emboîté : Exemple de l'alignement plutonique Tenkodogo-Yamba dans l'Est du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Dakar, Sénégal, 209 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, 41-57.
- Napon S. 1988. *Le gisement d'amas sulfurés (Zn-Ag) de Perkoa dans la province du Sangyé (Burkina Faso - Afrique de l'Ouest)*. Cartographie, étude pétrographique, géochimique et métallogénique. Thèse Univ. Franche-Comté, Besançon, 310 p.
- Peccerillo A. & Taylor S-R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- Pintea I. & Udubasa G. 1999. Evolution of fluid phases related to a new porphyry copper deposit in Romania: The Tibbles massif. In Stanley et al. (eds), *Mineral deposit Processes to Processing*, Balkema, Rotterdam, pp. 83-85.

- Satran V. & Wenmenga U. 2002. *Géologie du Burkina Faso/Geology of Burkina Faso*. Czech Geol. Survey, 136 p.
- Sawadogo J. 1983. *Etude géologique du sillon birimien de Yalogo dans la région de Gangaol (Nord de Haute Volta)*. Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. Franche-Comté, Besançon, France, 414, 155 p.
- Sillitoe R.H. 1999. VMS and porphyry copper deposits: Products of discrete tectono-magmatic settings. In Stanley *et al.* (eds), Balkema, Rotterdam, 7-10.
- Sun S.S. & Mc Donough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. & Norry M.J. (eds) - Magmatism in the Ocean Basins. *Geol. Soc. London, Sp. Publ.*, 42, pp. 313–345.
- Wenmenga U. & Affaton P. 2003. Origine du complexe gneissique paléoprotérozoïque du domaine Baoulé Mossi de la région de Kaya (Burkina Faso). *J. Min. Geol.*, 39, 1, 11-20.
- Zonou S. 1987. *Les formations leptyno-amphibolitiques et le complexe volcanique et volcano-sédimentaire du Protérozoïque inférieur de Bouroum-nord (Burkina Faso-Afrique de l'Ouest)*. Etude pétrographique, géochimique, approche pétrogénétique et évolution géodynamique. Thèse, Univ. Nancy, France, 299 p.

Manuscrit reçu le 14 septembre 2009

Version modifiée acceptée le 16 décembre 2009