

***Méthodologie de la prospection minière en
milieu latéritique et diversification des
ressources - Programme 1998-2002***

Objectifs, méthodes, résultats et perspectives

Alain BLOT

ORSTOM (IRD) - Université de Ouagadougou - BUMIGEB

- 2002 -

***Méthodologie de la prospection minière en milieu
latéritique et diversification des ressources
Objectifs, méthodes, résultats et perspectives, 1998 - 2002***

ORSTOM (IRD) - Université de Ouagadougou - BUMIGEB

Alain BLOT
Directeur de recherche à l'IRD (ex ORSTOM)

avec la participation de

Mariette MININGOU	UNIVERSITE
Seye KOTE	BUMIGEB
Alain Georges NEBIE	géologue indépendant
Thomas LAVAUD	UNIVERSITE

de

Issouf OUEDRAOGO	BUMIGEB
Benjamin YANOGO	BUMIGEB
Clément YAGUIBOU	BUMIGEB
Daouda TRAORE	UNIVERSITE
Pascal AFFATON	UNIVERSITE
Patrick FORWARD	SEMAFO
Marc DESCLOITRES	IRD
Yann LE TROQUER	IRD
Georges GRANDIN	IRD
Martine GERARD	IRD
Sandrine CAQUINEAU	IRD

et de

Mariam QUANGRAOUA	UNIVERSITE
Martin LOMPO	UNIVERSITE
Didier BEZIAT	UNIVERSITE
Francis TOLLON	UNIVERSITE

SOMMAIRE

I - OBJECTIFS	3
II - PRINCIPES	6
1 - L'altération météorique des roches et la spécificité endogène des formations de petite dimension	6
2 - Cuirasses latéritiques et roches ferrugineuses	7
3 - Les chapeaux de fer	9
4 - Les autres types d'affleurements ferrugineux	13
III - MATERIELS ET METHODES	18
1 - Morphologie des affleurements	18
2 - Faciès macroscopiques	19
3 - Microstructures	20
4 - Constitution minéralogique	21
5 - Cortège d'altération spécifique	23
6 - Composition chimique	25
7 - Composition de la goëthite	29
En conclusion	
IV - RESULTATS	32
1 - Observations et travaux d'orientation à Perkoa	32
2 - Observations et analyses d'orientation à Kwademen	33
3 - Recherche sur le gîte de Ni latéritique de Bonga	37
4 - Les recherches sur les ferruginisations du Bassin de Taoudéni	38
Conclusions	
V - RESULTATS OBTENUS DANS UNE PARTIE DU BASSIN DE TAOUDENI, LA PARTIE NORD DU BURKINA	40
1 - Les prospections antérieures de la partie sédimentaire septentrionale du Burkina	40
2 - Les petits corps ferrugineux du Nord Burkina	43
2 - 1 - Le cadre	43
2 - 2 - Caractérisation d'ensemble	44
2 - 3 - Contribution d'une approche en géologie des altérations	46
3 - Vrais ou faux chapeaux de fer	48
4 - Doutes et certitudes	49
5 - Choix de l'échantillonnage d'orientation	50
6 - Les domaines de confusion possibles	51
7 - La géochimie des ferruginisations du Bassin de Taoudéni	53
8 - Les associations métallogéniques remarquables	61
9 - Conclusions	63
VI - ENSEIGNEMENTS ET PROPOSITIONS POUR LA SUITE	66
1 - Géologie supergène	66
2 - Méthodologies de la prospection	69
3 - Perspectives métallogéniques	72
BIBLIOGRAPHIE	80
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	85
ANNEXES 13 P	

minéralisations, combinée à un certain formalisme et à une absence d'approche critique des méthodes utilisées.

Les roches superficielles à oxyhydroxydes de fer ont été au centre de cette préoccupation, car les minéraux secondaires de fer sont en quelque sorte l'étape ultime des altérations des minéraux et des roches et prennent une signification à la fois simple et complexe quand le milieu primaire est préconcentré en éléments métalliques ; ceci est notamment le cas avec les chapeaux de fer *sl*. La signature de chaque type d'altération affecte différentes échelles, comme la morphologie des affleurements ferrugineux ou leur nature (association minéralogique spécifique), elle affecte aussi la micro-organisation (par exemple avec les boxworks ou figures de réplique pour l'altération de minerais), et, enfin le contenu des minéraux.

J'ai ainsi privilégié l'approche naturaliste sur le terrain comme alternative active aux prospections aveugles en géochimie des sols et des sédiments.

Par ailleurs les parcours effectués hors des formations volcano-sédimentaires du Birimien, zones privilégiées par la prospection depuis plus de cinquante ans, peuvent raisonnablement permettre de poser des objectifs nouveaux dans les séries du Précambrien supérieur.

oo oo oo oo oo oo oo oo oo oo

Le plan de ce rapport témoigne de la démarche d'approfondissement de l'utilisation de la géologie de surface pour créer des informations nouvelles devant mieux situer différents contextes à possibilité de développements métallogéniques.

- Principes = rappel de ce qui est connu sur les altérations tropicales, sur la signification des chapeaux de fer et introduction de la notion de chapeau de fer en milieu cuirassé latéritique
- Matériels et méthodes = les éléments de diagnostic de la distinction entre un chapeau de fer et une cuirasse latéritique
- Résultats = recherches et applications dans les formations du Birimien
- Résultats obtenus dans une partie du Bassin de Taoudéni, la partie Nord du Burkina
- Enseignements et propositions pour la suite

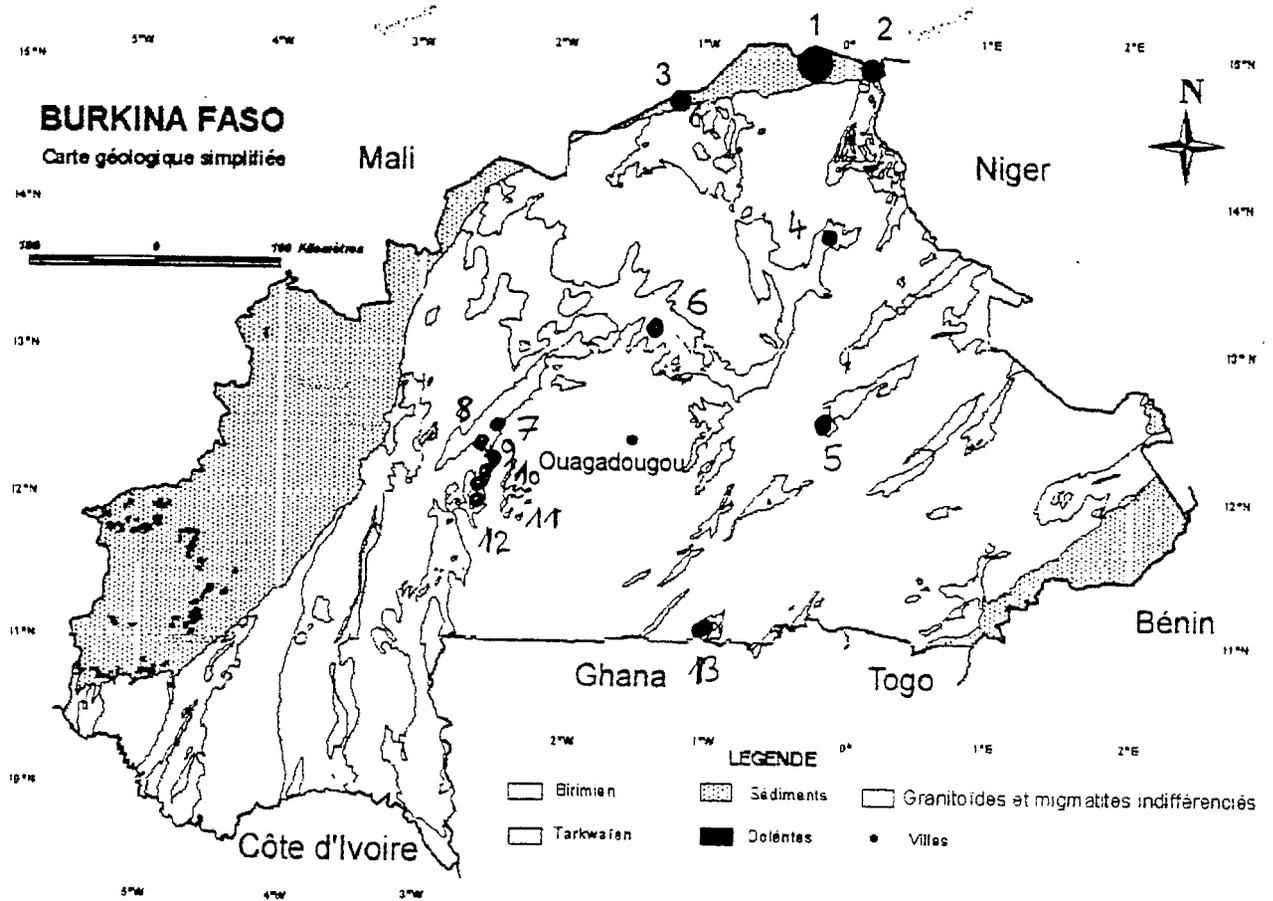


Figure 1-1 - Situation des observations dans la carte géologique générale du Burkina Faso : 1 Tin Akof, 2 Kabia, 3 Toussougou (mare de Soum), 4 Gangaol, 5 Piéla, 6 Rissian (Kongoussi), 7 Diana, 8 Perkoa, 9 Goundi, 10 Bavila, 11 Kwademen, 12 Bonga, 13 Tiébélé

II - PRINCIPES

1 - L'altération météorique des roches et la spécificité endogène des formations de petite dimension

Toutes les roches, tous les minéraux subissent un rééquilibrage au contact des conditions physico-chimiques de la surface et de nouveaux minéraux, de nouvelles roches, apparaissent. Banalement les arènes, les sols et les cuirassements succèdent aux roches dans un nouvel équilibre, et les minéraux typiques sont alors des minéraux oxydés, hydroxylés et hydratés.

L'altération climatique, comme d'autres formes d'agression, apparaît, se développe et s'exprime en fonction des facteurs d'agression et du caractère propre de la roche.

Les facteurs d'agression sont définis par l'ensemble des conditions physico-chimiques de la surface : températures faibles, abondance d'oxygène et de gaz carbonique, activités biologiques, faibles pressions et présence d'eau météorique ayant sa propre dynamique. Les facteurs exogènes sont donc à composantes multiples dont la zonéographie climatique des altérations est une illustration classique et le *cuirassement latéritique*, l'exemple type. Par différence avec d'autres types d'altération il est important de noter que les intrants sont exclusivement des éléments légers, dont les principaux sont CO_2 , H_2O et O_2 .

Le deuxième facteur est ce qui peut être défini comme le caractère propre de la roche, avec ses multiples composantes issues des conditions de mise en place. La variété des espèces pétrographiques définies témoigne de la variété des contraintes et des stocks minéraux juvéniles ou recyclés : de manière générale les températures de formation et les pressions sont variables et peuvent être élevées, l'eau n'est pas toujours indispensable. Une roche se définit par ses conditions de genèse, sa composition géochimique, sa constitution minéralogique, sa structure, sa texture ... Ici les échelles sont plus régionales et même locales induisant des spécificités au comportement à l'altération. Pratiquement toutes les roches s'altèrent sous la contrainte climatique, mais les réponses sont contrastées suivant une même contrainte pour des roches différentes. Les petits corps conservent une individualité dans l'altération, particulièrement exacerbée avec les corps sulfurés du fait de l'extrême réactivité des sulfures à l'altération. Le produit final typique est notamment *le chapeau de fer*.

En final, le résultat de l'altération météorique est une formation, une roche, de nature supergène issue de la transformation d'une roche à laquelle elle se substitue ayant des caractéristiques héritées, minéralogiques et géochimiques, et des apports exclusifs d'éléments légers accompagnant les transformations minérales et les néogenèses. L'altération est soustractive à l'égard de la majorité des éléments qui restent sur place ou sont évacués suivant la nature et l'intensité des vecteurs, essentiellement l'eau d'origine météorique, au contact des éléments de l'atmosphère et des éléments existants plus ou moins réactifs. Soulignons que

littéralement la roche parentale n'existe plus et qu'il est fait recours à des équivalences pour définir évolutions et bilans.

2 - Cuirasses latéritiques et roches ferrugineuses

Dans les régions tropicales où la cuirasse latéritique, produit typique de l'altération climatique, est un des éléments importants des surfaces et des paysages, les autres formations ferrugineuses affleurantes sont bien souvent ignorées. Les confusions cuirasses - chapeaux de fer ne semblent pas exceptionnelles et il n'a pas été facile par exemple de faire accepter les carrières de latérite de Pagala (Togo) comme des chapeaux de fer, alors que les géologues de prospection ne reconnaissaient tout au plus que des brèches ferrugineuses (Lasserre).

Tout d'abord comme il y a une forte tendance à assimiler tout ce qui est ferrugineux à la cuirasse latéritique, elle est rarement considérée comme une roche mais plutôt tel un matériau particulier, dont la connaissance est subordonnée aux travaux et investigations d'autres disciplines (pédologie, géographie, géomorphologie). Cette carence fréquente de l'approche spécifique des géologues qui ont à résoudre des problèmes plus profonds devrait être un souci dans la valorisation de l'information portée par la cuirasse latéritique en direction de ceux qui ont pour objectifs d'inventorier et hiérarchiser les formations géologiques, de préciser les domaines de géodynamique locaux et régionaux et enfin de mettre en évidence des pistes pour la recherche des métaux et autres substances minérales utiles. Dans leur ensemble les cartes géologiques rendent bien compte de la marginalisation de l'objet « cuirasse » ou « latérite » dans la place qui lui est réservée au même niveau que les formations alluviales. Les informations complémentaires sur la nature génétique de la cuirasse, par exemple la différenciation de cuirasses granitiques, sont exceptionnelles sur les cartes géologiques.

S'il est vrai que la cuirasse latéritique peut sembler uniforme, il est essentiel de retenir qu'elle est issue de l'altération hydrolytique des roches, de presque toutes les roches, quels que soient les facteurs réels de cette altération qui est globalement climatique. À ce niveau, on peut dire que la cuirasse latéritique est une roche supergène ferrugineuse, ou alumino-ferrugineuse, issue de la transformation d'une roche parentale, qui, de ce fait, n'existe plus. Pour les formations parentales de grande dimension, cette réserve n'est pas importante, mais elle devient un vrai problème pour les formations parentales de très petites dimensions, comme les enclaves, sans aller plus avant dans la définition. Les processus de formation de la cuirasse latéritique sont uniformisant et simplificateurs puisque toute roche peut aboutir à la formation d'une cuirasse, peu différente d'une autre cuirasse issue d'une autre roche. Peu d'éléments et peu de minéraux sont la règle, où Si, Al, Fe et H sous forme oxydée représentent presque toujours plus de 98 % de la cuirasse, exprimés en quelques minéraux cardinaux, quartz, oxyhydroxydes de fer, silicate d'alumine hydraté, plus, éventuellement hydroxydes d'aluminium.

Les débats entre ceux qui sont considérés comme spécialisés dans l'étude des cuirasses latéritiques obscurcissent nettement les enseignements et donc les besoins que pourraient en ressentir les autres géologues, notamment cartographes ou prospecteurs.

La hiérarchisation de ces formations, relativement récentes par rapport aux formations qui composent le socle protérozoïque, ont eu pour but de fixer des événements chronologiques et a grandement influencé la démarche géomorphologique. Dans ces approches, la nature des matériaux est minorée à l'extrême et n'est jamais la préoccupation principale. Ici chaque type de cuirasse correspondrait à une époque de mise en place dans une chronologie événementielle, avec éventuellement des formations alluviales simultanées non cuirassées (Michel). Corrélativement les composants originaux, parentaux, de la cuirasse sont fréquemment considérés de la même manière que les alluvions, comme venant d'ailleurs. La typologie est essentiellement définie en fonction de critères topographiques, avec des cuirassements alumineux dominant les cuirassements alumino-ferreux.

Par contre les approches sur la nature des cuirassements, et plus généralement des altérations, apportent une caractérisation plus réellement typologique des cuirasses latéritiques. Schématiquement chaque type de cuirasse correspondrait à une roche parentale connue, qu'elle soit visible ou non, avec des propriétés spécifiques morphologiques, minéralogiques et géochimiques. La hiérarchisation chronologique est ici fortement tempérée par la mise en avant de l'altérabilité des roches et à leur aptitude à fournir du fer au cours de l'altération. Au-delà, la notion typologique peut être extrapolée aux autres formations ferrugineuses affleurantes, quelles qu'en soient l'origine et la nature, et compléter ainsi les schémas de Butt et Smith sur la nature des affleurements ferrugineux dans le domaine tropical (figure 2-1). En principe, tout cela est simple et si les définitions suivant leur origine est claire, la proposition typologique des cuirasses de Leprun reste plus théorique que pratique (figure 2-2). Les limites de la pratique sont bien entendu de diverses origines et l'application diagnostique n'a jamais été vraiment tentée sur les affleurements ferrugineux de la zone tropicale Ouest africaine, où les cuirasses ont une extension considérable, qu'elles soient apparentes ou masquées dans un sol.

Le déséquilibre quantitatif est tellement évident que tout affleurement ferrugineux est " a priori " considéré comme latéritique, ce qui couvre effectivement la plus grande partie des cas rencontrés.

Au-delà, l'hypothèse d'un autre diagnostic est rarement posée. Et pourtant cette entreprise de reconnaissance typologique aurait pu devenir un guide essentiel dans le diagnostic du prospecteur et du cartographe au-delà du schéma théorique de Butt et Smith, au-delà des tentatives peu exploitées de Leprun.

Il est évident que l'effet climatique tropical génère des confusions quand les besoins sont d'amélioration du diagnostic, mais les biais tiennent tant à la non-formation des acteurs de terrain qu'à l'introduction de méthodes de prospection insuffisamment justifiées à l'égard de ce qui est connu des altérations tropicales. C'est ainsi que pour éviter de s'attaquer de front à la grande extension des formations ferrugineuses de surface, les méthodes de prospections

géochimiques sur prise de sols ou de sédiments de cours d'eau ont pris une grande importance en Afrique de l'Ouest. Cette méfiance vis-à-vis du fer et des formations ferrugineuses se traduit également par des techniques de prospection géochimiques qui, par tris et tamisages, se doivent d'exclure nodules et gravillons ferrugineux.

Bien entendu la contribution des argiles à la rétention des métaux et autres éléments utiles ou diagnostics a souvent été démontrée (Mosser par exemple), mais il y a en même temps exclusion des mêmes éléments, ou d'autres éléments, qui sont retenus prioritairement par les oxyhydroxydes de fer. Ce choix de la prise en compte prioritaire des argiles par rapport aux oxyhydroxydes induit un risque important d'aliénation de l'information, surtout quand l'objectif est d'atteindre le plus directement possible une minéralisation sulfurée.

Cette méfiance vis à vis du fer s'explique par l'histoire des recherches sur les latérites ou curieusement le fer est devenu un élément mobile descendant "en cascade" des sommets pour aller conquérir l'aval, ce qui donnait des images d'itinéraires de l'élément sur plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, et Maignien, puis Michel, dans leur spécialité respective, ont ainsi fortement influencé la réserve ultérieure sur tous les matériaux ferrugineux.

Ce paradoxe de mobilité du fer, quand la présence aussi spectaculaire des roches ferrugineuses signifie d'abord l'immobilisation du fer oxyhydroxydé dans la "fossilisation" des paysages, reste un frein au développement de la valorisation de l'information. Evidemment, ceci pourrait être dit aussi, d'une autre manière, de l'aluminium, dont les formes de maintien sur place, dans les paysages, sont hydroxydées et silicatées.

Les domaines respectifs, fixant les conditions physico-chimiques de maintien et de départ de ces deux éléments, sont bien établis (figure 2-3), s'appliquant tant à l'observation qu'au constat où les éléments Al et Fe marquent les paysages par immobilisation.

3 - Les chapeaux de fer

Il est de notoriété dans le monde des mineurs et des prospecteurs, au moins depuis le XIX^{ème} siècle, que les chapeaux de fer sont des indicateurs de minéralisation, après avoir été une des ressources minérales essentielles, et cela depuis l'Antiquité jusqu'à une époque récente. Von Groddeck rappelle en 1879, un vieil adage des mineurs allemands "nul filon n'est meilleur, il a un chapeau de fer", notion appliquée aux sulfures et aux carbonates de fer, et pas forcément limitée aux filons, ayant des synonymes dans tous les pays miniers. Les mises au point de Blain et Andrew (1977), de Kosakevitch (1979), tant pour l'histoire de l'importance de la notion, que pour les définitions sont à rappeler.

Dans son principe, lorsqu'il n'y a pas de cuirasses, la reconnaissance d'un chapeau de fer est relativement facile, d'autant que ce fut un matériau recherché comme minerai pour le fer, le cuivre et l'argent notamment, mais à partir de sa marginalisation comme minerai, avec les besoins de l'ère industrielle, il a été nécessaire d'introduire des notions complémentaires

indicatrices qualitatives ("bons", "mauvais", "pseudo", "vrais", "faux") d'après les travaux ultérieurs éventuels, mais rarement au stade de la prospection malgré toutes les recherches dans ce sens.

Les prospecteurs de ressources minérales ont porté une attention particulière vis à vis de la présence de chapeaux de fer comme indice d'une minéralisation sulfurée. Leur étude débute aux USA, en Europe et en Australie avec Locke (1926), Blanchard et Boswell (entre 1920 et 1926), Schneiderhohn (1924), Smirnov (1936) et la synthèse posthume de Blanchard (1968) a fortement contribué à formaliser ce qui était d'abord une démarche pragmatique de diagnostic : estimer la nature de la minéralisation d'après les microfaciès des chapeaux de fer (morphologie des textures). Sur l'exemple de 52 mines australiennes (Butt et Smith, 1980), 32 portent des ferruginisations secondaires concernant des ressources en Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Sn, (Au) suivant différentes associations, comme gossans, pseudogossans ou ironstones.

∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞∞

Au Burkina seuls quatre diagnostics plus ou moins établis sont connus mais sans une connaissance approfondie. Le chapeau de fer de Perkoa est l'affleurement attribué à la trace du gîte minéralisé à sulfures de zinc, ceux de Kwademen, de Diana et de Tiébélé ont été établis ou posés au cours des prospections. A Diana, le diagnostic reste cependant très ténu, les investigations étant restées sommaires. Le trait commun de ces chapeaux de fer est de présenter une morphologie d'affleurement allongé sur quelques dizaines ou centaines de mètres et de porter des faciès variés, notamment riches en recristallisation de goëthite et d'hydroxydes de manganèse et avec des boxworks fréquents ou abondants. Ces chapeaux de fer apparaissent en périphérie des cuirasses latéritiques ou en fenêtre, et se situent dans les altérations modernes des roches encaissantes. Les principaux minéraux sont le quartz, la goëthite associée ou non à l'hématite, elle même pouvant être le minéral principal. Les éléments en trace principaux sont portés par la goëthite (Zn et Pb à Perkoa, Ni et Cu à Kwademen) mais des minéraux mineurs comme la barytine et des sulfophosphates contiennent aussi Ba et Pb à Perkoa. Les éléments significatifs des 3 sites sont représentés par le tableau 2-1. Je ne connais pas encore sur le terrain le chapeau de fer mis en évidence récemment par la société Anglo-american.

	Ag	As	Ba	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Te	Zn
BL1	1,7	704	16800	6	59	96	7	7	3035	150	-	1623
BL2	1,2	1552	1777	30	217	100	31	13	3744	531	-	1054
SA-1	>50	1071	>2000	47	25	184	7	17	1276	64	-	2009
BL4	-	88	74	116	212	945	4	1961	-	-	33	200
BL5	-	29	202	18	89	2605	-	279	-	-	30	162
BL45	-	71	128	22	83	89	15	14	-	-	50	99
BL21	-	80	120	66	28	354	-	274	13	-	-	399
BL26	-	63	402	92	83	483	-	188	-	-	-	196

Tableau 2-1 - Teneurs en quelques éléments des chapeaux de fer de Perkoa (BL 1, BL2 et SA1), de Kwademen (BL4, BL5 et BL45) et Diana (BL21 et BL26)

Les études ont été étendues à d'autres secteurs par l'observation de faciès ferrugineux d'affleurement distincts des cuirasses latéritiques, ou de blocs inclus dans la cuirasse et ayant des caractères non conformes aux cuirasses. Il s'agissait avant tout de tester la méthode d'accès la plus aisée, directe, à l'affleurement et au marteau, d'éventuels signaux d'altération de formations sulfurées. Bien entendu il n'y a ici aucun souci d'exhaustivité, puisque des secteurs sont bien connus et d'autres à peine parcourus par les prospections. Les analyses minéralogiques et géochimiques nous ont permis de valider le fait que ces diverses ferruginisations de surface représentaient autre chose que de simples cuirasses latéritiques : une certaine spécialisation apparaît par secteur comme l'illustre le tableau 2-2.

PERKOA	Ag, As, Ba, Cd, Mo, Pb, Sb, Se, Zn, Co, Cr, Cu, Ta, V
BAVILA	Cd, Cu, Zn, As, Co, Cr
KWADEMEN	Cu, Mo, Ni, Te, V, As, Au, Ba, Cd, Co, Cr, La, Nb, Pt, Sc, Zn
PERKOA SE1	As, Mo
PIELA BL14	Co, Cu, Mo
DIANA	As, Co, Cu, Ni, Zn, Sc
PIELA BL13	As, Te, Mo, Nb, V
RISSIAN	As, Cr, Cu, Mo, V
BONGA	As, Au, Co, Cr, Mo, Ni, Ta, Cd, Zn
GOUNDI	As, Cd, Co, Cu, Mo, Pb, Sc, V, Zn
GANGAOL	Ag, As, Au, Ba, Cd, Co, Mo, Os, Pb, Pt, Ru, Ta, Nb, Sc, V, Zn
TIN AKOF	As, Sb, Se, Te, U, Pb, Zn, Au, Pt, Pd, Mo, Be, V, Y, Bi, Co, Cd, Cu

Tableau 2-2 - Spécialisations géochimiques des ferruginisations de divers sites du Burkina

Dans les cuirasses de proximité des chapeaux de fer établis (Perkoa et Kwademen), des éléments centimétriques à décimétriques de même facture que ceux observés à l'affleurement sont enchâssés ou peuvent être libérés là où la cuirasse apparaît démantelée. L'antériorité de genèse par rapport à la cuirasse semble probable mais ces blocs peuvent être aussi bien contemporains des chapeaux de fer cartographiables, qu'antérieurs et être alors acceptés comme trace résiduelle d'ancien chapeau de fer issu de la même minéralisation que celle exprimée par l'affleurement, ou encore d'un corps minéralisé voisin ou satellite. En tout état de cause ces éléments dans la cuirasse ou ces blocs dispersés par son démantèlement, sont des traces de la mémoire d'une minéralisation sulfurée et auraient pu être utilisés comme signe d'appel dans la prospection au marteau à Perkoa et à Kwademen.

Nous avons cherché ailleurs à retrouver ces blocs très riches en fer, quasi holo-hématitiques et surtout goëthitiques, dans les cuirasses et dans les résistats du démantèlement des cuirasses. Deux sites correspondent assez bien à cet objectif, Bonga sur un petit gîte de nickel latéritique défini au début des années 80 (PNUD) et Rissian, près de Kongoussi, où les conclusions géomorphologiques s'appuyaient sur l'aspect conglomératique de la cuirasse dans

les relations entre les cuirasses alumineuses et ferreuses, pour en faire des terrains de transport (livret guide de G. Grandin).

A partir des sites de Perkoa, Kwademen, Piéla, Kongoussi (Rissian) et Bonga se sont posées des questions sur la présence des faciès de type "chapeau de fer" qui sont observés en éléments dans la cuirasse. Ceux-ci cohabitent éventuellement avec des éléments bauxitiques en général plus gros (centimétriques à métriques) et confèrent de ce fait un faciès conglomératique à la cuirasse tout en restant très loin d'un conglomérat car les éléments de bauxite (blanche en général) et de chapeaux de fer (gris noir, brun violacé, rouille) sont très dilués dans l'ensemble de la cuirasse. Les faciès bauxitiques et holo-goëthitiques se sont manifestement constitués préalablement au cuirassement qui les englobe, et sont des témoins de paléo-altérations et leur équivalence peut être envisagée quelque soit le modèle utilisé pour expliquer la formation de la cuirasse, autochtone par intégration à l'altération des roches silicatées volcano sédimentaires de blocs résiduels d'altérations antérieures ou allochtone par cuirassement d'une étape intermédiaire de transport de détritique.

La composition de ces éléments ferruginisés est voisine de ce qui est rencontré dans les chapeaux de fer en affleurement et les teneurs sont plus ou moins anormales en divers éléments.

En toute logique d'observation on peut distinguer des étapes distinctes dans la constitution du chapeau de fer, une étape ancienne - peut être contemporaine de la bauxitisation - conservée par des blocs (éléments) à faciès très ferruginisés de certaines cuirasses "conglomératiques" et une étape plus récente relativement actuelle conservant les traits morphologiques de la minéralisation tout en développant ses traits faciologiques propres (figure 2-4). L'étape ancienne serait ainsi représentée à Perkoa, Kwademen, Piéla, Kongoussi (Rissian) et Bonga alors que le chapeau de fer contemporain, dans ce système de hiérarchisation chronologique, n'est certain qu'à Perkoa et Kwademen.

Quelles sont les informations caractéristiques des restes de paléo-chapeaux de fer ?

Leur minéralogie est d'une grande simplicité, ils sont principalement holo-goëthitiques ou hématitiques, éventuellement avec de fortes concentration d'oxyhydroxydes de manganèse.

Leur texture est à la fois héritée et néoformée, avec des organisations guidées par des traits conservés de la minéralisation parentale : boxworks, faciès scoriacés, microscoriacés, orientations héritées, recristallisations de la goëthite soit microcristalline soit en peignes millimétriques à centimétriques ; il y a là une piste à l'approfondissement de l'étude des textures héritées et néoformées.

La composition chimique montre l'extrême prédominance du fer suivi de la silice, alors que l'alumine est très basse. Le contenu métallique de ces corps de goëthite présente de fréquentes fortes teneurs, voire très forte comme à Bonga où le nickel est fortement piégé dans la goëthite, alors que le chrome provient d'un héritage détritique de la chromite de la roche d'origine. A Rissian et à Piéla on note des teneurs élevées en certains élément mais aucun rattachement à une source n'est possible actuellement.

La mise en évidence de l'enracinement de ces faciès est bien entendu une gageure, pour en faire un indicateur précis dans la localisation de la minéralisation, car il est peu probable que les horizons carbonatés et sulfatés aient pu se maintenir au cours des puissantes altérations généralisées. Tout au plus il reste possible qu'il puisse subsister une distribution particulière des oxyhydroxydes de fer dans la masse du manteau d'altération, comme les "chevelus" goëthitiques de Diouga et de Gangaol, que j'avais baptisés "crypto-chapeau de fer", en 1984.

Ainsi il semblerait que les altérations des minéralisations sulfurées aient subi, comme les autres roches des étapes successives d'altération et de formation de chapeau de fer, mais qui ne peuvent *in fine* qu'aboutir à la constitution d'une roche holo-ferrugineuse.

Les paléo-altérations de ces minéralisations sulfurées n'apparaissent qu'en blocs détachés de leur profil d'altération certainement vidés de leur substance face aux énormes contraintes climatiques présentes mais surtout passées. Il s'agit là de *paléo-chapeaux de fer* dont les racines ont été inévitablement hydrolysées et probablement effacées du paysage.

Les *chapeaux de fer contemporains* affleurants ou sub-affleurants sont structurés et devraient par contre conserver les typiques zonations d'altération supergène des sulfures que sont les horizons sulfo-phosphatés, carbonatés et autres, mais ceci n'a été exploré dans aucun des sites burkinabé. Mais dans les conditions climatiques de l'Afrique de l'Ouest il n'a pas encore été rencontré des faciès peu matures, comme en Arabie, en Australie ou au Brésil et les minéraux autres que les oxydes et hydroxydes ne sont que des traces quand ils peuvent être mis en évidence. Par exemple les sulfophosphates supergènes (alunite et jarosite) qui ont été souvent utilisés en datation sont totalement absents ou sont issus d'une altération hydrothermale (gorceixite observée à Pagala au Togo et détectée à Perkoa au Burkina).

4 - Les autres types d'affleurements ferrugineux

Les formations ferrifères oxydées primaires, qu'elles soient magmatiques, volcano sédimentaires ou sédimentaires se présentent avec des affleurements pouvant présenter un certain nombre de similitudes avec les ferruginisations secondaires, d'autant que ces affleurements sont aussi soumis à l'altération supergène. Aussi en climat tropical plus qu'ailleurs, il est important de faire une première approche diagnostique des roches ferrugineuses vis à vis de la cuirasse, avec des questions qui peuvent apparaître naïves : s'agit-il de l'affleurement d'une roche ferrugineuse sédimentaire ou magmatique, du témoin d'une remobilisation marquant une faille, de chapeaux de fer signant l'altération de carbonates ou de sulfures de fer, d'une cuirasse latéritique ? Il y a donc avec des ambiguïtés, des probabilités de confusion non négligeables et un diagnostic qui peut avoir des conséquences importantes : cf le cas de Tambo Grande au Pérou, minerai de fer métasomatique de substitution, réévalué en chapeau de fer d'un gîte sulfuré dont la réserve économique tient à l'or (G. Pouit, 1987). Butt et Smith (1980), ainsi que toute l'école australienne définissent particulièrement bien l'ensemble

des diagnostics possibles des affleurements ferrugineux d'après les diverses situations rencontrées en Australie (figure 2-1).

Sans entrer dans le détail diverses manifestations secondaires sont connues sous le nom de "ironstones", "ferricrusts", sans une connotation génétique précise, pouvant éventuellement recouvrir les domaines chapeaux de fer ou cuirasses latéritiques.

Comme pour l'exemple des ferrières de Belle Isle en Terre (Chauris et Garreau), il serait certainement utile d'établir une typologie de tous ces cas de figures sur des bases pétrologiques, minéralogiques, géochimiques et gîtologiques.

Les modifications de diagnostic relativement fréquentes prouvent que le questionnement sur un affleurement ferrugineux peut déboucher sur n'importe quel domaine. Ceci donne la mesure de la spécificité tropicale et de la difficulté supplémentaire que représente l'abondance de roches ferrugineuses, notamment en Afrique de l'Ouest. N'oublions pas que les grès et conglomérats ferrugineux horizontaux étaient si fréquents dans les descriptions des voyageurs du début du XX^{ème} siècle qu'il s'agissait pour l'essentiel de cuirasses, et que la tendance actuelle à assimiler tout ce qui est ferrugineux à une cuirasse est, au même titre, une démarche simplificatrice réductrice, notamment pour les géologues.

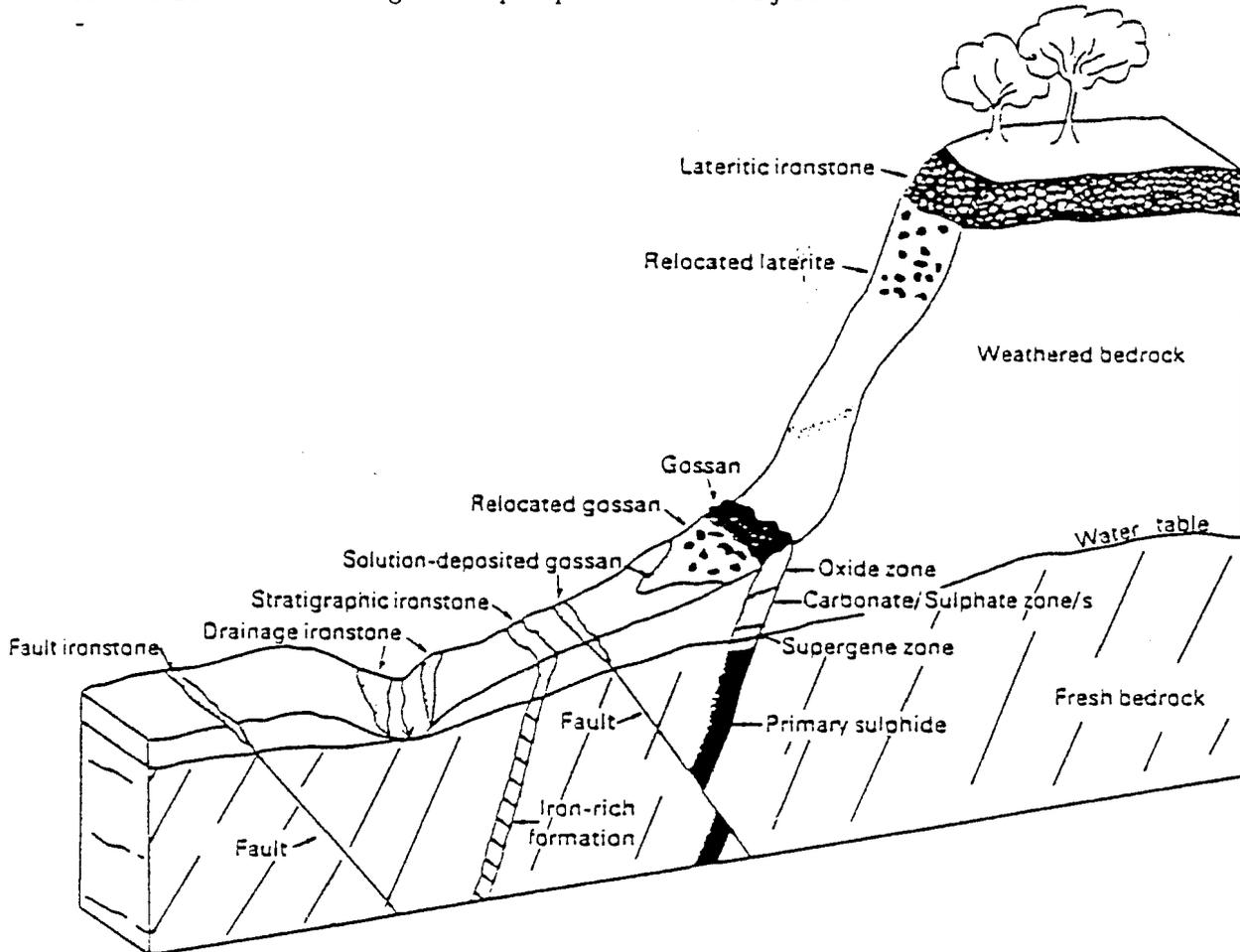


Figure 2-1 - Typologie des affleurements ferrugineux établie par Butt, Smith, Ryall, Taylor ...

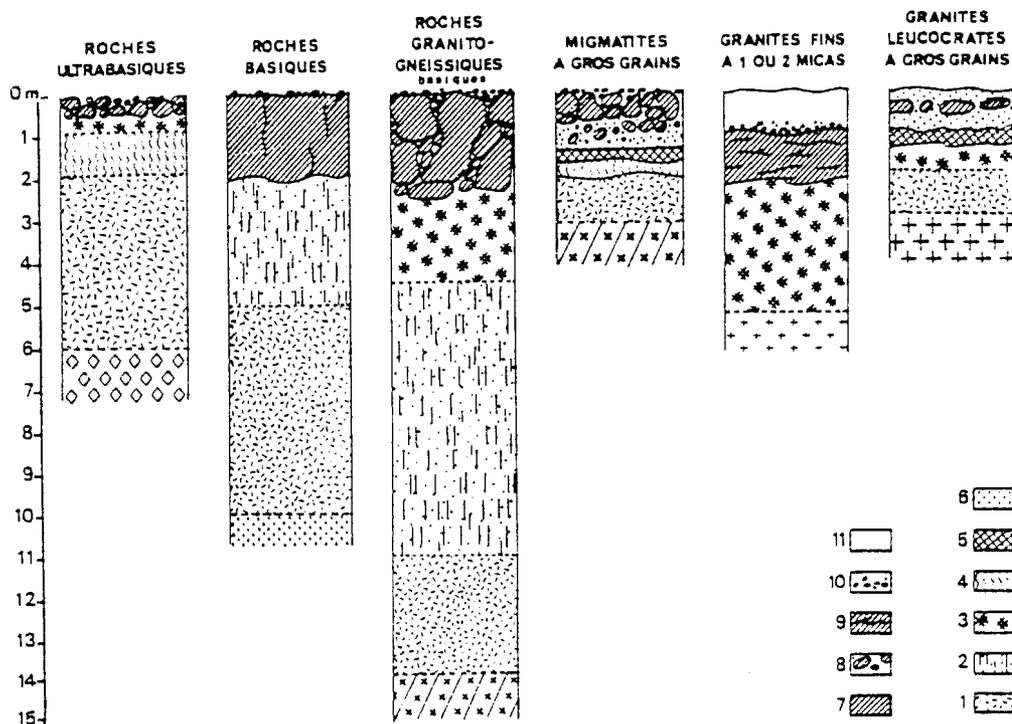


Figure 2-2 - Différenciation des profils cuirassés suivant la roche-mère s établie par Leprun (1- altération pistache, 2- argiles bariolées, 3- argiles tachetées, 4- horizon verticale, 5- horizon illuvial, 6- horizon éluvia, 7-8-9- cuirasse, 10- nodules de surface, 10- sol de recouvrement)

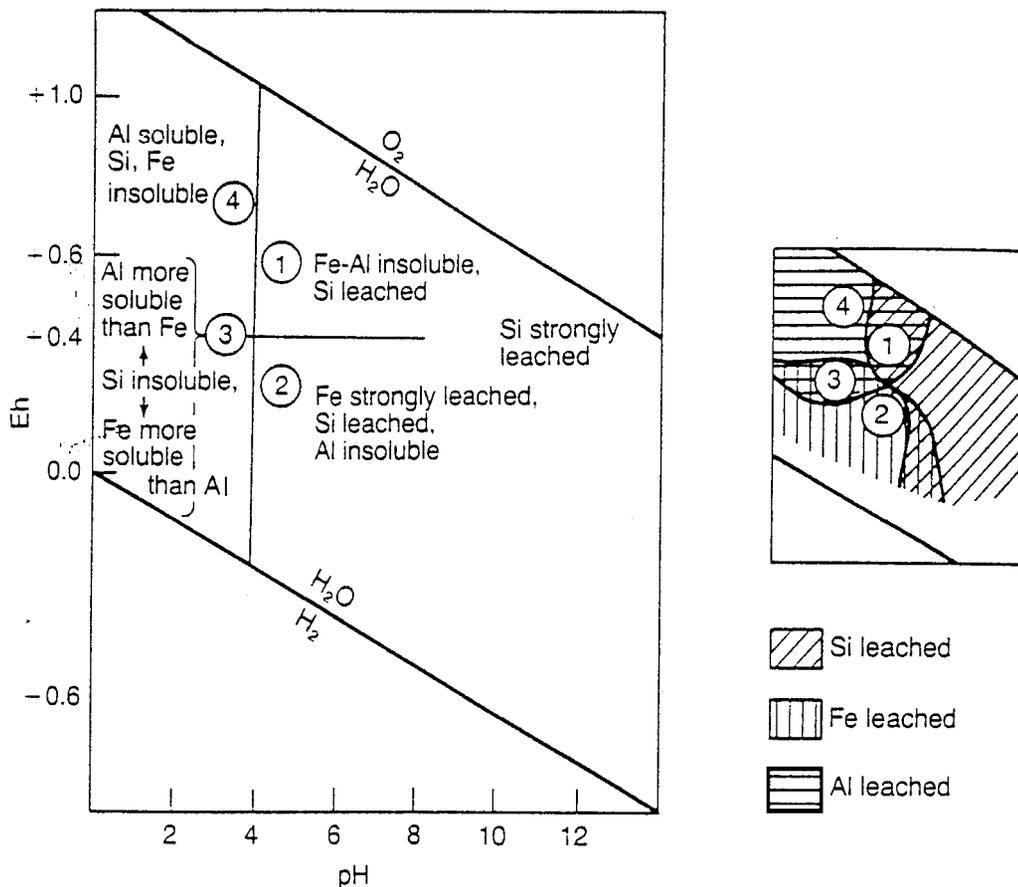


Figure 2-3 - Les conditions pH et rH de la formation de la bauxite et de la latérite établies par Norton (in Guilbert et Park) : 1- domaine de formation de la latérite, 2- de la bauxite, 3- des podzols, 4- des latérites riches en fer

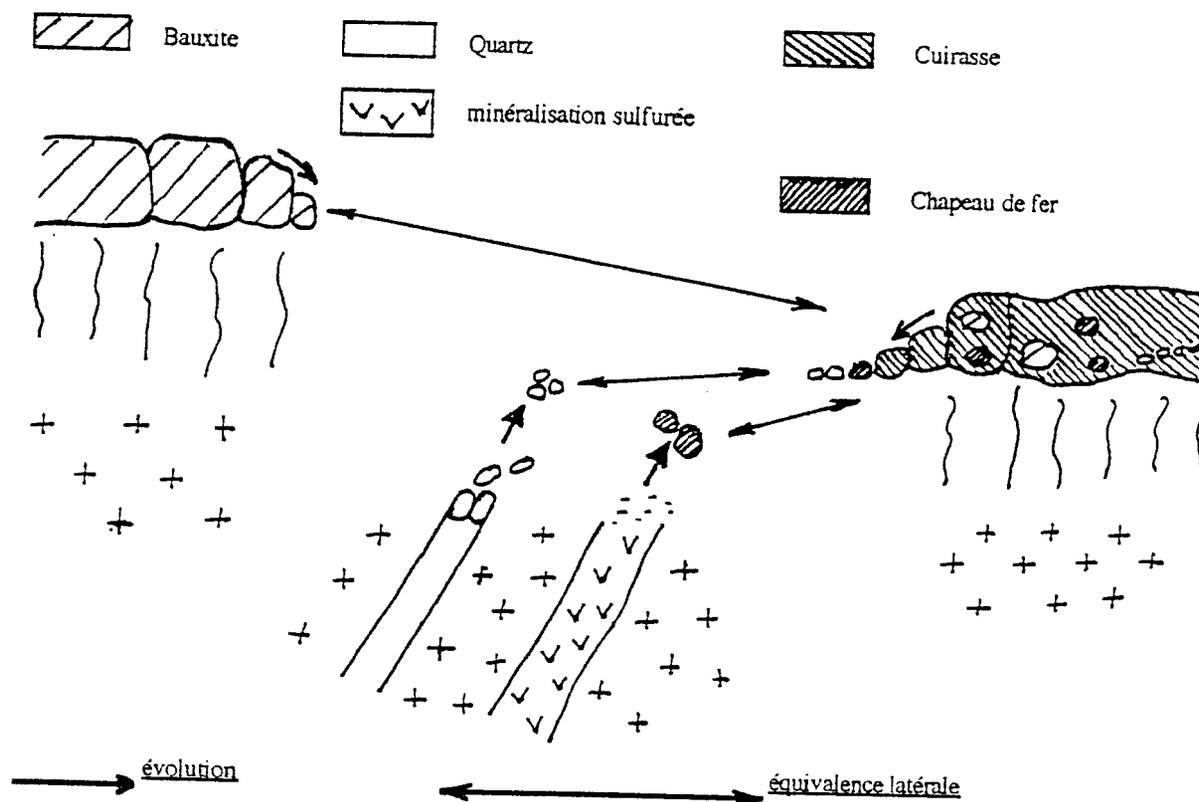


Figure 2-4 - Schéma des évolutions des roches endogènes et exogènes et des équivalences latérales des éléments des cuirasses à blocs (faciès conglomératique) établi par Blot

ALTÉRATION MÉTÉORIQUE

Toutes roches

Roches minéralisées en sulfures ou carbonates

Climat tropical

Tous climats

cuirasse latéritique

chapeau de fer

Concentrations à valeur économique forte

Concentrations à valeur économique marginale

Al (bauxite)

Ni latéritique

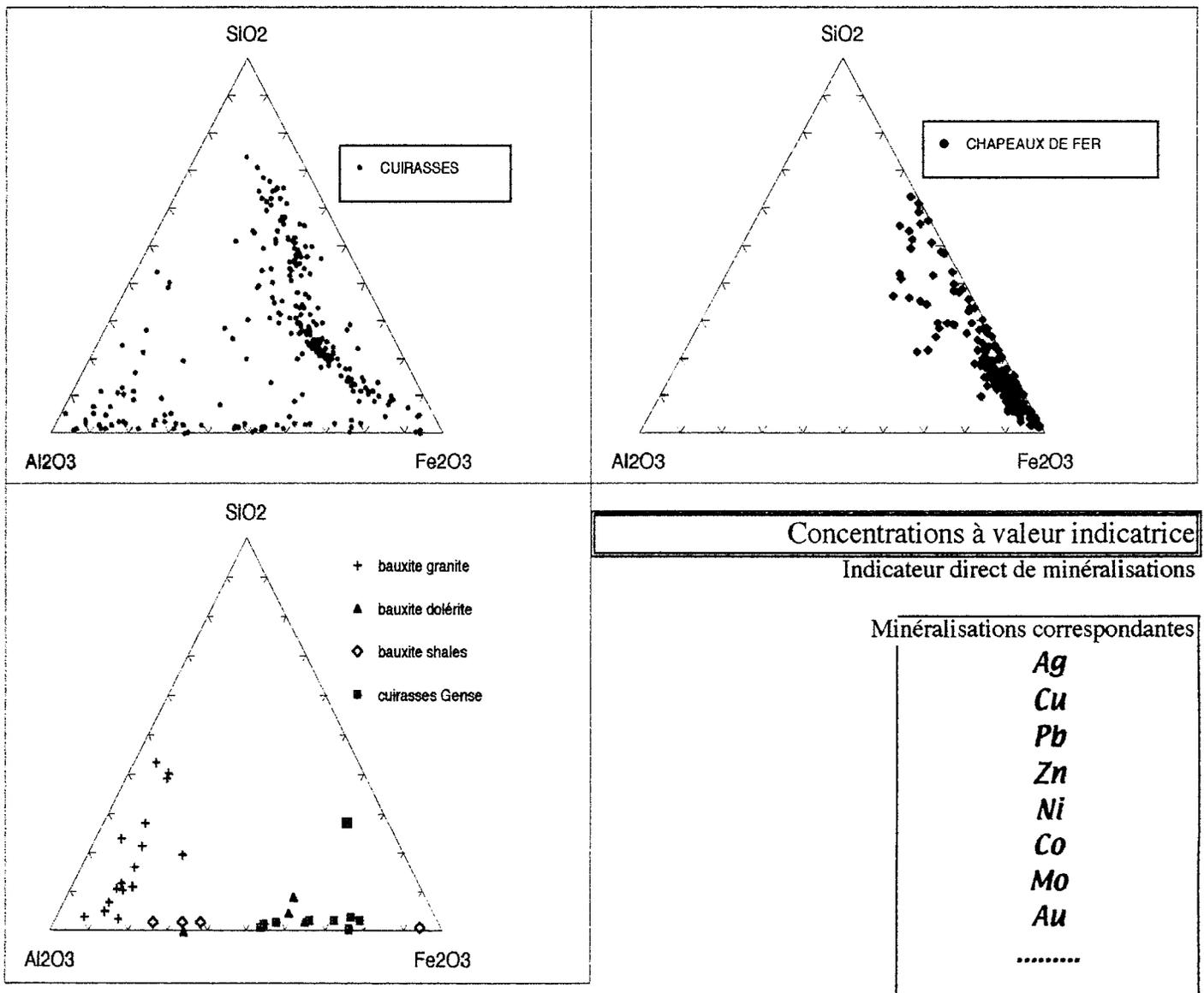
Fe résiduel et concentration

Mn résiduel et concentration

Cr résiduel

ancien minéral de Fe

ancien minéral de Cu, Ag, Pb ...



Les enjeux pour la ressource minière sont fort différenciés

Figures 2-5 - Les enjeux des formations ferrugineuses pour la ressource minière

III - MATRIELS ET METHODES

Les roches cibles sont les roches ferrugineuses, avec en priorité celles qui sont distinctes des cuirasses latéritiques et dont il est important de définir l'origine au plus proche du terrain, en orientant vers la qualification de l'origine probable : sédimentaire, magmatique ou transformée par les phénomènes superficiels.

La particularité dans la mise en évidence de chapeaux de fer dans la zone tropicale tient au fait que ceux ci sont très peu contrastés par rapport à la banalisation des autres formations ferrugineuses supergènes que sont les cuirasses latéritiques.

La méthode d'approche privilégiée a été l'observation et l'analyse des roches ferrugineuse superficielles dans les régions connues par leurs minéralisations, puis étendue à d'autres régions.

Les sites de références sûrs restent ce qui était défini précédemment, mais pas toujours bien établi, avec les affleurements de Perkoa et Kwademen. Là, le diagnostic de "chapeau de fer" était déjà posé ou simplement évoqué depuis le début des travaux de prospection. Comme aucun travail spécifique n'a été effectué sur la zone d'altération météorique de ces sites, la connaissance en reste très limitée. Il est d'ailleurs utile de préciser que tout ce qui est connu sur les chapeaux de fer, toutes les recherches et études, ont lieu *a posteriori*, quand il y a eu un gîte exploré voire exploité et les investigations précoces sont rares, voire exceptionnelles.

Pour d'autres sites d'observation a été utilisé un canevas d'approche, principalement défini au cours des travaux précédents au Togo par l'invention du sujet "chapeau de fer" et son développement, et au Brésil par l'étude de l'altération de minéralisations connues.

A la question posée des critères de la reconnaissance et de l'identification des chapeaux de fer en milieu cuirassé notamment, peut être proposé un ensemble de 7 catégories de critères autorisant l'accès par différentes techniques de mise en évidence et ayant chacune une signification génétique bien définie : morphologie des affleurements, faciès macroscopiques, microstructures, constitution minéralogique, cortège d'altération spécifique, composition chimique, composition de la goëthite.

1 - Morphologie des affleurements

a - Des chapeaux de fer :

Les chapeaux de fer apparaissent le plus souvent en "lentilles" plus ou moins bien délimitées, continues ou non, présentant fréquemment des orientations à différentes échelles. Leur forme est une image plus ou moins déformée de la trace superficielle de la concentration dont il est issu.

A Woodcutters (Australie) le corps minéralisé Pb-Zn est de 180m x 3,75, et le chapeau de fer correspondant est de 150 x 1 à 7 m. A Mary River (Australie) au corps

minéralisé Zn-Pb de 140 m x 19 correspond un chapeau de fer de 150 m, avec des extensions suivant la même direction, sur plus de 300 m. La lentille Cu de Esperanza (Australie) de 450 m x 10, se traduit en surface par de nombreux blocs ferrugineux disséminés, sans que les auteurs aillent jusqu'au diagnostic de chapeau de fer. A Ti Tree Well (Australie) sont évoqués des pseudogossans s'étendant sur 3 km, sur la minéralisation Pb-Zn. A Canoas (Brésil) sur Pb-Zn-Ag-Ba un chapeau de fer correspond à une trace plurimétrique de la lentille de minerai, alors que deux autres sont des blocs disloqués sans orientation nette. A Pagala (Togo), tous les chapeaux de fer, et il y en a 150 au moins sur 30 km², sont des bancs disloqués ou continus de 50 à 500 m de long sur 2 à 30 m.

La cartographie de ces formations s'effectue d'une échelle 1 / 1000 à 1 / 10000.

b - Des cuirasses latéritiques :

Par comparaison les cuirasses latéritiques permettent d'évoquer les images de plateaux, de buttes, de bowé, voire de glacis, avec fréquemment des ondulations, des rebords nets (cuesta). Les dimensions sont très variées, et par exemple à la latitude de Pagala, au Togo, les cuirasses latéritiques cartographiées sont de plusieurs km². Au Sénégal Oriental, sur le socle protérozoïque, la carte géologique à 1/200000, présente des plateaux de plusieurs dizaines de km². Il s'agit donc de notion de surface autorisant notamment la cartographie de 1/50000 à 1/200000.

En même temps la morphologie de la cuirasse est dépendante de la nature de la roche et ainsi si sur les granites alcalins la cuirasse est rarement épaisse, elle est fréquemment très puissante quand elle correspond aux granodiorites, différenciant les paysages. A une autre échelle l'altitude des paysages dépend pour une grande part de la nature des roches, notamment quand elles sont cuirassées.

2 - Faciès macroscopiques

a - Des chapeaux de fer :

Les chapeaux de fer se caractérisent par la concentration d'une grande variété des faciès sur un même affleurement où certains sont des ferruginisations simples de roches conservant éventuellement orientations, textures et structures (roches ferruginisées, ferruginisations schistosées). D'autres faciès évoquent la minéralogie du minerai en conservant plus ou moins sa structure (corps sulfurés ou carbonatés ferruginisés). Enfin d'autres faciès échappent totalement à l'héritage et donnent de vraies remobilisations dirigées entièrement par les contraintes physico chimiques liées à l'hydrolyse d'un corps sulfuré et l'évolution de ces contraintes. Recristallisations et néogénèses ont leur propre dynamique donnant par exemple des faciès

brèchiques où subsistent des éléments primaires disloqués ; massifs, scoriacés, "en pelure d'oignon", où le rattachement à la source peut difficilement être automatique ...

Ces roches ferrugineuses, avec ou sans manganèse, sont accompagnées de roches profondément altérées, décolorées ou avec des teintes vives, vidées de l'essentiel de leurs minéraux primaires, par contamination de l'acidification du milieu d'altération. Cet ensemble donne sur un même site de brutales variations de couleurs, de densité, de porosité et de contenu chimique et minéralogique. Quand l'altération n'est pas trop poussée les couleurs donnent de bonnes indications sur la nature chimique de la minéralisation responsable du chapeau de fer (tab 3-1).

couleur	élément	nature minéralogique
jaune, brun, marron, rougeâtre	fer	oxyhydroxydes, sulfates
noir	manganèse	oxydes, wad
vert, bleu	cuivre	carbonates, silicates, sulfates, oxydes, natif
noir, rose brillant	cobalt	oxydes, erythrine
vert, ocre	nickel	garniérites
jaune clair brillant	molybdène	wulfénite, molybdénite
vert terne	argent	chlorures, natif
orange, jaune	arsenic	oxydes
jaune	bismuth	bismuthine
jaune très clair	cadmium (zinc)	oxydes Cd

Tableau 3-1 - Couleurs observées dans les chapeaux de fer (A. M. Bateman)

b - Des cuirasses latéritiques :

Avec les cuirasses latéritiques les descriptions de faciès, sans être toujours les mêmes, varient relativement peu sur un même affleurement : elles sont alvéolaires, gravillonnaires, nodulaires, pseudo brèchiques, massives ou pisolithiques. Le rattachement direct du faciès à une roche parentale est rarement aisé, sauf quand des traits spécifiques sont conservés ou développés avec des minéraux résiduels ou néogénétiques, des textures ou des colorations typiques (cuirasse granitique, gréseuse, cuirasse sur UB, sur jaspe, sur gondite ...).

3 - Microstructures

a - Des chapeaux de fer

C'est le critère par excellence qui a été développé par les prospecteurs notamment suivant l'impulsion de Blanchard depuis 80 ans, où il a été reconnu que l'altération des sulfures, principalement, laissent dans l'organisation des oxyhydroxydes de fer, l'empreinte spécifique des minéraux, par pseudomorphose. Ces figures de réplique des minéraux concernent soit les minéraux primaires (sulfures métalliques) soit les secondaires (carbonates notamment). Ce critère reste le plus fertile pour le prospecteur et les observateurs attentifs aux signes lisibles

dans les ferruginisations que sont les chapeaux de fer distinguent la pyrite, de la pyrrhotite, de la chalcopryrite ou de la blende, avec différentes formes de maillages liées aux tailles, aux proportions, et au degré d'évolution. Les boxworks sont des indications précieuses dans tous les faciès. Cependant les maturations les plus poussées où les figures de cristallisation propres à la goëthite s'expriment librement, posent plus de problèmes car il n'y a plus de pseudomorphoses nettes et la goëthite développe ses propres formes cristallines orthorhombiques en prismes ou fibres organisés en feutrage, rosettes, sphérules ou mamelons.

b - Des cuirasses latéritiques :

Dans les cuirasses, je n'ai pas connaissance d'un seul cas où ait été évoquée la présence d'une microstructure pseudomorphique de sulfures, voire de carbonates, même si des sulfures conservés ont été quelquefois rencontrés. Par contre sont fréquemment décrits des minéraux silicatés ou oxydés, plus ou moins altérés, d'origine primaire (fantômes de micas ou d'amphiboles, feldspath éventuellement kaolinisé...).

4 - Constitution minéralogique

Toutes les roches ferrugineuses sont de constitution minéralogique simple dans leurs minéraux cardinaux permettant l'appellation de la roche, d'après sa teneur forte en minéraux Fe oxyhydroxylés.

Les chapeaux de fer sont à la fois de composition simple et complexe selon que l'on considère la roche ferrugineuse ou l'ensemble du profil d'altération qui sera abordé plus loin (à Broken Hill Lode, en Australie, la zone d'altération présente une soixantaine de minéraux secondaires différents). En se limitant aux roches ferrugineuses, les chapeaux de fer sont minéralogiquement pauvres lorsqu'ils sont matures avec surtout des oxydes et hydroxydes de Fe, du quartz, éventuellement des oxydes et hydroxydes de manganèse et peu ou pas d'argiles. A moindre degré d'évolution, par exemple sous un climat moins agressif, la complexité s'accroît et par exemple les minéralisations d'Arabie et du Brésil et leur zone d'oxydation présentent un spectre minéralogique beaucoup plus étendu (tableau 3-2). Au delà même le chapeau de fer fut, avant le 20^{ème} siècle, une ressource essentielle, un minerai et de nombreuses descriptions, notamment dans les régions relativement arides font état de nombreux minéraux carbonatés et sulfatés dans les affleurements de chapeaux de fer.

Sur 54 échantillons de divers chapeaux de fer d'Arabie, Ryall et Taylor (1981) notent comme minéraux cardinaux le quartz, l'hématite et la goëthite, alors que les argiles sont rares :

minéraux principaux :

quartz(40) hématite(32) goëthite(29) calcite(17) hemimorphite(13) talc(11) gypse(11)

minéraux accessoires

kaolinite(5) anhydrite(3) bassanite(3) oxydes Mn(2) montmorillonite(1)

Les chapeaux de fer sont rarement riches en argiles, contrairement aux cuirasses latéritiques où l'assemblage kaolinite - goëthite est l'édifice minéral principal. Le tableau 3-2 illustre quelques minéraux secondaires de différents métaux rencontrés dans des chapeaux de fer en Arabie et au Brésil.

	oxyhydroxyde	carbonate	sulfo - phosphate	arséniate	silicate
Cu	(goëthite Cu)*	malachite	chalcantite brochantite	olivenite	chrysocolle
Pb	coronadite (goëthite Pb)*	cérusite*	anglésite plumbojarosite pyromorphite*	beudantite	
Zn	franklinite hydrohétérolite (goëthite Zn)*	smithsonite hydrozincite	goslarite		hémimorphite chlorite*
Ni	(goëthite Ni)*				
Fe	goëthite, hématite	sidérite	jarosite mélanterite corkite*	scorodite	
Mn	pyrolusite psilomélane cryptomélane				braunite
Ag			argentojarosite		

Tableau 3-2 - Minéraux spécifiques des gossans d'Arabie (Ryall & Taylor)

* autres minéraux observés dans nos études brésiliennes

Les cuirasses latéritiques sont quant à elles un mélange intime de minéraux de fer, d'alumine et de silice oxyhydroxylés, avec de rares minéraux résiduels, transformés ou néogénétiques, autres que cette trilogie (tableau 3-3). De fait les composants essentiels, cardinaux, mais pas forcément tous ensemble, sont la goëthite et l'hématite pour le fer, la gibbsite et la kaolinite pour l'aluminium et le quartz et la kaolinite pour le silicium. Il convient aussi de préciser qu'il peut y avoir un mélange d'oxydes et d'hydroxydes de fer. Bien entendu les cuirasses bauxitiques échappent en grande partie au champ des comparaisons car la confusion avec les chapeaux de fer semble peu probable, et dans ces conditions les oxyhydroxydes d'aluminium sont beaucoup plus rares. Les teneurs éventuelles en Ti et Cr peuvent être attribuables aux oxydes (ilménite, anatase, chromite) plutôt considérés comme résiduels au moins pour partie.

Donc, au sens de la comparaison des constitutions minéralogiques la présence d'argile en association intime avec les oxyhydroxydes apparaît comme critère propre au cuirassement latéritique. Par contre il y a alors une convergence entre les chapeaux de fer et certaines

minéralisations ferrifères sédimentaires ou remobilisées. On peut noter que les chapeaux de fer ont été très fréquemment utilisés comme minerai dans la métallurgie pré-industrielle (les ferrières) et, d'après mes observations, dans la métallurgie précoloniale. Je doute en même temps que les cuirasses banales aient tenu longtemps comme minerai car les essais ne devaient pas être très satisfaisants du fait de l'association intime des minéraux de fer avec la kaolinite. Dans de nombreux sites la présence d'une ancienne activité métallurgique est pour moi un bon critère de présence de chapeaux de fer à proximité.

	oxyhydroxyde	silicate
fer	goëthite hématite maghémite lépidocrocite	smectite
alumine	gibbsite hydrargillite boëhmite	kaolinite smectite illite
nickel	goëthite Ni ?	garniérites talc Ni pimélite antigorite Ni
manganèse	pyrolusite psilomélane asbolane cryptomélane	

Tableau 3-3 - Minéraux spécifiques des cuirasses et profils latéritiques.

5 - Cortège d'altération spécifique

a - Des chapeaux de fer :

Les chapeaux de fer sont issus d'un processus hydrolytique supergène se traduisant par un gradient vertical des contraintes physico-chimiques avec une très forte interaction atmosphère-eau à l'égard du minerai et de sa roche hôte. Il en résulte une succession de transformations minéralogiques structurées. On observe des silicates, halogénures, tungstates, molybdates, arsénates, vanadates, carbonates, sulfates, phosphates de Fe, Zn, Pb, Cu ... et des éléments natifs, organisés suivant une zonation de différents stades d'oxydation, succédant éventuellement à une zone de cimentation. Celle-ci est particulièrement reconnue sur les minéralisations sulfurées notamment Fe-Ni-Cu. Dans la zone de cimentation les sulfures sont remplacés par d'autres sulfures supergènes.

Par exemple sur la mine O'Toole (Ni-Cu-platinoïdes, MG, Brésil), la minéralisation de pentlandite-pyrrhotite-chalcopryrite, s'altère suivant les filiations suivantes :

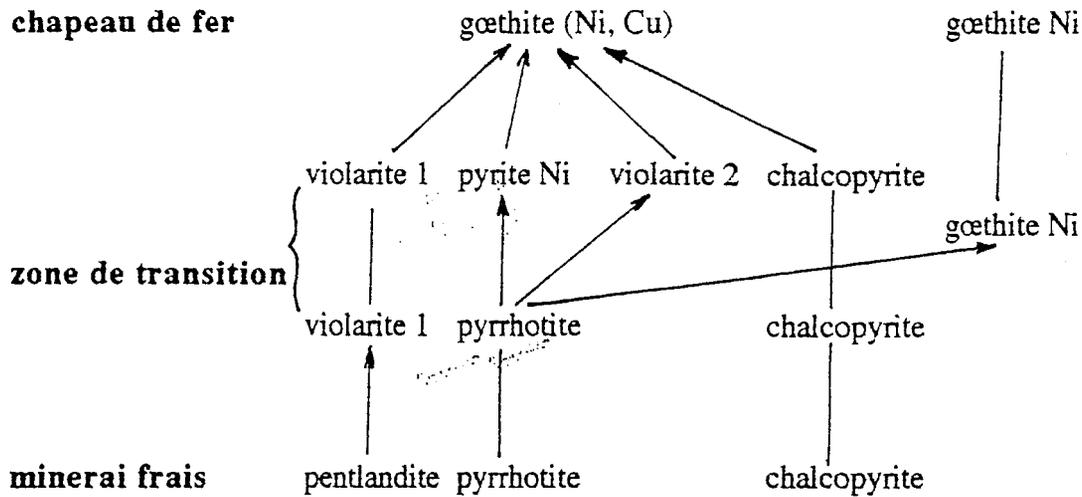


Tableau 3-4 - Les filiations dans la mine de O'Toole établi par Rosely Imbernon

Par exemple encore sur les minéralisations Pb-Zn du Brésil, des pièges originaux ont été mis en évidence, comme la chlorite qui stocke provisoirement le zinc, les sulfophosphates qui ont le plomb comme élément constitutif et les oxyhydroxydes de fer qui retiennent un peu tous les éléments. Ce cortège minéralogique se constitue par un ensemble de filiations de minéraux où les minéraux primaires (sulfures, silicates, carbonates ...) libèrent leurs éléments constitutifs dans la genèse de minéraux secondaires organisés suivant une zonation à la fois minéralogique, géochimique, chronologique et génétique.

L'altération de la mine de Canoas (Pb-Ag-Zn-Ba, PR, Brésil) présente des filiations qui impliquent la participation des éléments des sulfures, des sulfates et des silicates qui constituent la roche hôte du minerai. La goëthite se forme tout au long des procédures d'altération et 6 générations distinctes ont été différenciées avec des significations variées en étant à même de piéger tous les métaux libérés ce qui en final aboutit à des goëthites de diverses compositions avec ou sans Zn et Pb, ensemble ou séparés.

1 - L'ordre d'altération des sulfures est pyrite ---> blende ---> galène
 pyrite + O + CO₂ ---> sidérite ?, goëthite 1, Fe, S
 blende + O + CO₂ ---> smithsonite 1, goëthite 2, Zn, S
 galène + O + CO₂ ---> cérusite, Pb, S

(la blende est ferrifère, la galène ne l'est pas)

2 - L'altération des phyllosilicates est tout à fait originale puisqu'elle implique une transformation minérale en même temps que l'importation (Fe, Zn) et l'exportation (Si, Al, Mg et K) d'éléments :

phlogopite + Fe + Zn ---> chlorite Zn + K + Si + Al + Mg
 (chlorite Zn pseudomorphique ---> chlorite Zn épitaxique)
 chlorite Zn + O + CO₂ ---> smithsonite 2, goëthite 3, Si, Al, Mg

3 - L'altération des feldspath s'effectue avec l'incorporation d'éléments libérés par les sulfures :

feldspath potassique + S + Fe ---> jarosite épitaxique, Si, Al
 jarosite + Pb ---> plumbojarosite pseudomorphique, *gæthite 4*, K
 plumbojarosite ---> *gæthite 5*, S, Pb

4 - Enfin la libération tardive du phosphore des apatites se traduit par la formation épitaxique de phosphates:

plumbojarosite + P ---> pyromorphite, *gæthite 6*, S, Fe

(Ailleurs, à Irece, toujours au Brésil, nous avons noté que c'est une crandallite qui succède pseudomorphiquement à la jarosite).

b - Des cuirasses latéritiques :

Les cuirasses latéritiques s'inscrivent aussi en association avec un profil d'altération ancien qui est surtout hydroxylé silicaté, argileux, quelle que soit la roche parentale. Le profil latéritique type, de la roche vers la surface se décrit en roche saine, roche fracturée ou arénisée, arène argileuse, argiles tachetées ou bariolées, argiles gravillonnaires, carapace et cuirasse. D'autres termes peuvent décrire ces altérations, avec une connotation voisine, comme les saprolites impliquant une certaine reconnaissance de la roche originelle. Les argiles, et surtout la kaolinite, sont omniprésentes, comme produit d'altération des minéraux silicatés constitutifs de la roche ; les ferromagnésiens étant à l'origine de la genèse pseudomorphique ou épitaxique des oxyhydroxydes de fer. Les éventuels carbonates secondaires se rencontrent à la base des profils d'altération en association avec des argiles gonflantes, mais il s'agit surtout de nodules quartz - CaCO₃, de formation tardive, récente.

Les altérations contemporaines qui se trouvent à la base des profils latéritiques, sont définies comme étant des transformations de premier degré par Wackermann (1967, 1975) caractérisées par l'incorporation d'ions (OH)⁻ et l'hydrolyse de certains éléments constitutifs des réseaux cristallins. Ceci correspond à une déstabilisation des silicates constitutifs de la roche où les pyroxènes, les amphiboles, les biotites et les plagioclases sont les premiers minéraux altérés dans les roches basiques, suivant les différentes suites réactionnelles.

6 - Composition chimique

a - Des chapeaux de fer :

Les chapeaux de fer sont, par définition, dominés par le fer, avec une silice le plus souvent libre bien représentée alors que l'alumine est le plus souvent très faible. Le manganèse est relativement fréquent, souvent associé au fer (tableau 3-5).

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	PF
1	17,94	2,00	71,07	0,07	0,06	0,07	<0,01	<0,05	0,22	0,43	7,91
2	20,94	2,08	70,96	0,31	0,19	0,65	0,04	0,09	0,39	0,72	3,53
3	4,38	3,84	72,67	4,37	0,18	0,25	0,16	0,10	0,05	0,67	11,29
4	51,86	0,77	44,16	0,11	0,06	0,10	0,01	<0,05	0,15	0,09	1,73
5	7,39	2,26	80,47	0,10	0,17	0,15	0,01	<0,05	0,76	0,45	6,44
6	12,23	1,86	73,59	0,10	0,05	0,07	<0,01	<0,05	0,84	0,80	7,97
7	2,83	3,72	80,47	0,04	0,16	0,02	<0,01	0,02	0,48	0,57	12,07
8	45,30	1,00	45,10	0,05	0,06	0,05	0,01	0,09	0,07	1,39	6,02
9	30,40	3,00	60,10	0,04	0,24	0,05	0,01	0,64	0,17	0,55	5,22
10	25,10	1,10	62,60	0,06	0,18	0,05	0,01	0,44	0,02	1,46	8,51
11	21,20	2,20	68,00	0,29	0,30	0,05	0,07	0,74	0,09	0,05	5,48
12	16,40	4,00	70,40	1,12	0,11	0,05	0,06	0,29	0,22	0,05	7,09
13	3,90	0,90	78,20	2,84	0,11	0,05	0,07	0,14	0,01	0,64	11,70
14	10,10	2,40	82,30	0,98	0,18	0,05	0,08	0,25	0,12	1,43	2,10

Tableau 3-5 - Composition de quelques échantillons typiques de chapeaux de fer (1 à 7 = Burkina, 8 à 14 = Togo)

Les chapeaux de fer de la région de Pagala, au Togo, sont connus par près de 2000 analyses d'échantillons de surface et nous avons choisi de représenter par le tableau 3-6, les valeurs caractéristiques d'un des 150 chapeaux de fer connus : l'ensemble des faciès d'un même groupe géographique d'affleurements (CF n°3). Notons que la minéralisation est sulfurée et carbonatée, dans une série schisteuse se marquant par l'abondance de micas et des teneurs en K₂O fortes.

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	Mn3O4	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	H2O
moyenne	17,72	4,11	65,58	1,04	0,32	0,08	0,06	0,84	0,13	0,45	8,84
min	1,60	0,30	23,10	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	1,45
max	71,10	18,10	93,00	16,61	1,53	0,85	0,24	4,96	0,54	2,08	12,53
	As	Ba	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	V		
moyenne	37	1833	116	104	62	179	2720	41	63		
min	1	21	18	11	4	13	3	5	9		
max	800	20000	670	641	358	629	19925	341	465		
	La	Ce	Eu	Lu	Nb	Sc	Sr	Y	Yb	Zr	
moyenne	20,8	55,1	1,3	0,5	6,7	9,3	17	57	5,6	61	
min	1	5	0,1	0,05	1	0,8	1	1	0,1	21	
max	105	1522	18	2,9	14,8	43,9	232	500	39	175	

Tableau 3-6 - Composition chimique du chapeau de fer CF3 de Pagala (n = 126)

Les roches ferruginisées, qui accompagnent l'altération des minerais aussi bien à Pagala qu'à Canoas, ont une composition proche des cuirasses latéritiques. D'ailleurs Togbe a distingué un faciès de roches ferruginisées, souvent orienté ou cloisonné, des figures typiques des affleurements de chapeaux de fer.

Les grandes variations des teneurs sur un même affleurement, doublent la notion d'hétérogénéité, ce qui est un problème en soit pour la représentativité de l'échantillonnage en dehors de l'observation.

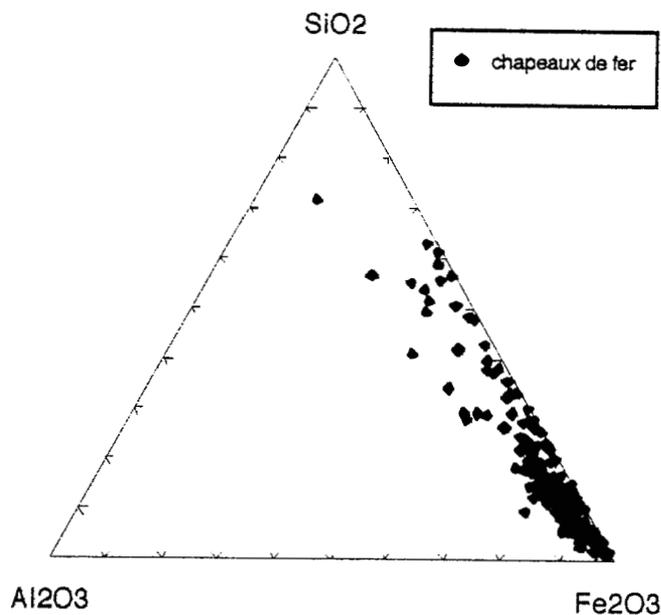


Figure 3-1 - Composition chimique triangulaire ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de divers chapeaux de fer du Togo et du Brésil. Il faut noter que les fortes valeurs relatives en Al_2O_3 de certains chapeaux de fer correspondent à des faciès de roches ferruginisées.

b - Des cuirasses latéritiques :

Les cuirasses ont une composition plus uniforme, dominée par SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - H_2O , avec des variations de diverses natures dont la teneur en fer parental autorisant la discrimination entre les roches originelles : ainsi la représentation triangulaire peut permettre de définir les grands domaines de rattachement des cuirasses alumineuses ou ferrifères en fonction de la roche d'origine (figure 3-2). Dans le détail la discrimination entre les roches parentales des cuirasses se répercute dans la composition de la cuirasse, qu'elle soit alumineuse (bauxitique) ou alumino ferrugineuse (figures 3-3 et 3-4).

A titre d'exemple le tableau des teneurs indique la composition moyenne de trois types de cuirasse spécifiques de trois types de roches du Sénégal Oriental (tableau 3-7), où les dolérites en dykes dans le granite ont une composition tout à fait particulière étant enrichies en microcline ce qui donne des teneurs fortes en K_2O , bien conservées dans la cuirasse.

CUIRASSE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PF
jaspe	16,35	14,86	58,04	0,03	0,27	0,01	0,03	0,06	0,83	9,98
granite	55,44	10,65	25,25	0,12	0,15	0,02	0,07	0,67	0,41	6,77
dolérite	41,72	12,84	34,46	0,29	0,16	0,06	0,06	0,64	0,71	8,72

Tableau 3-7 - Composition moyenne de trois variétés de cuirasses sur des roches mères différentes (Sénégal Oriental, collection Blot)

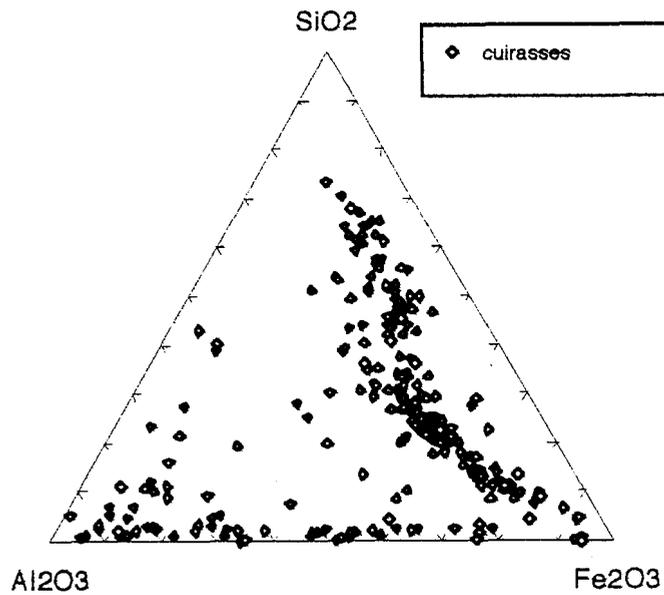


figure 3-2 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses alumineuses et ferrugineuses (collections Bamba, Blot, Boulangé, Gense, Grandin, Pion, Trescases).

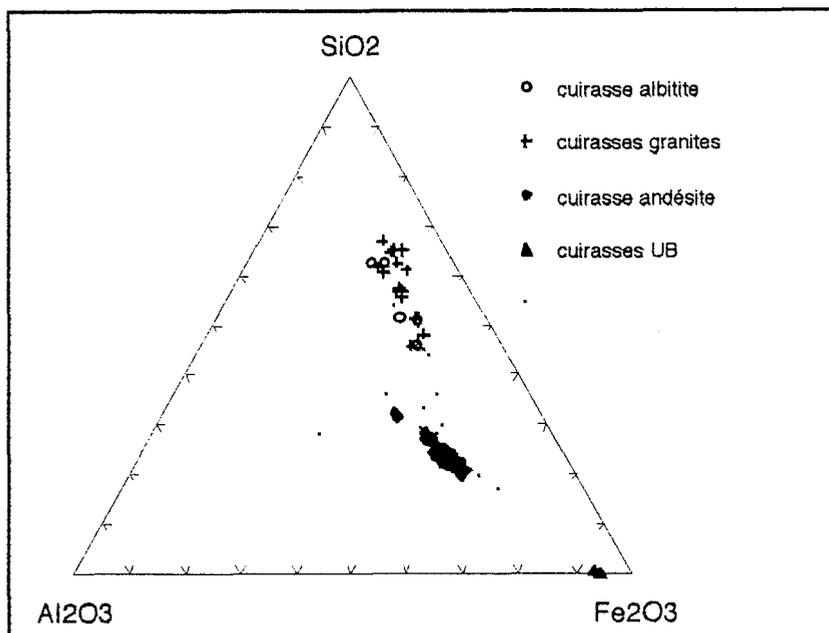


figure 3-3 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses aluminoferrugineuses (collections Bamba, Blot, Trescases).

Notons notamment que l'alumine est toujours bien représentée, ainsi que Ti (conservation), V (qui est souvent enrichi) et Cr (non représenté ici). La figure 3-5 montre bien la discrimination entre cuirasses et chapeaux de fer à partir de deux éléments. Des teneurs importantes, ou simplement bien marquées, en ces éléments sont fréquemment un bon critère de distinction avec les chapeaux de fer, là où nous avons les informations. Ainsi les roches ferruginisées qui sont dans le milieu "chapeaux de fer" peuvent être proches ou lointaines des compositions de cuirasses, par le maintien de caractéristiques liées à la roche magasin.

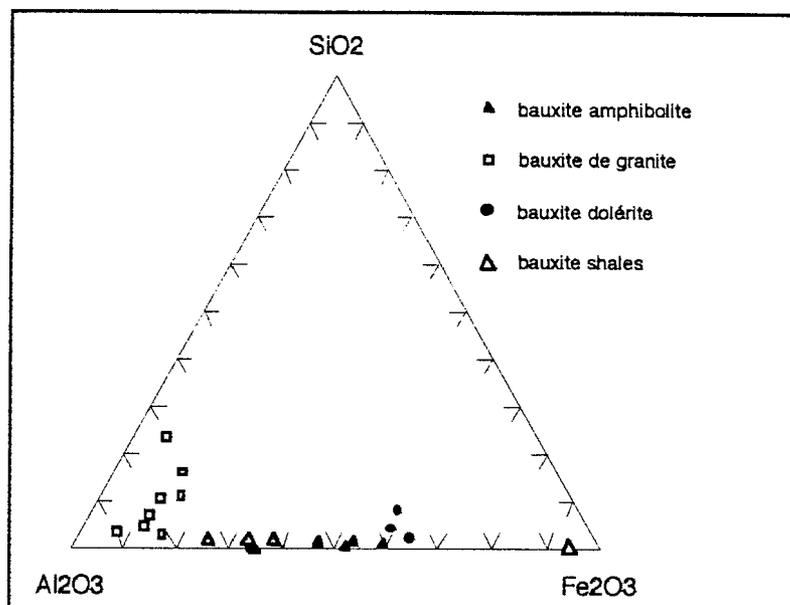


figure 3-4 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses alumineuses (collections Boulangé, Boski et Herbosch).

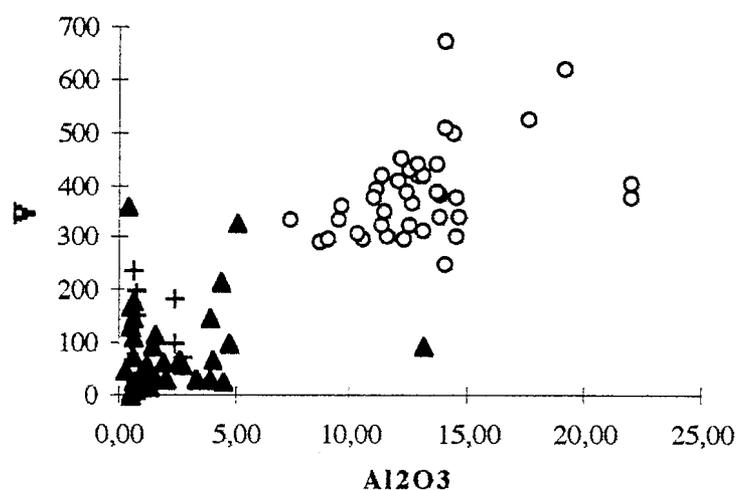


Figure 3-5 - Teneurs en Al_2O_3 et V de diverses roches ferrugineuses (ronds blancs = cuirasses, triangles noirs = chapeaux de fer, croix = fer sédimentaire et magmatique).

Néanmoins, des ambiguïtés de composition peuvent induire une approche erronée, avec une certaine similitude entre les cuirasses sur roches ultrabasiques, et les chapeaux de fer, tous les deux très déficitaires en alumine. Cet aspect devrait d'ailleurs être souligné pour chacun des critères proposés (sur UB il y a un faible développement des cuirasses, des faciès particuliers, peu d'argiles ...).

7 - Composition de la goëthite

Dans les chapeaux de fer la goëthite est le minéral le plus fréquent avec des éléments associés : Si est toujours présent et des teneurs élevées sont fréquentes en Al, Zn, Cu, Ni, Pb, S, P, As ... Ces teneurs élevées peuvent avoir des pièges spécifiques (CO_3 pour Pb et Zn, SO_4

pour Pb...) qui sont juxtaposées aux anomalies de composition des goethites. Cependant la goëthite, et de manière plus large les oxyhydroxydes de Fe-Mn, peuvent être le piège exclusif des éléments typiques de la minéralisation, soit par incorporation dans le réseau (Ni, Cu, Al), soit par de probables fixations de surface (Zn, Pb, As, P ...).

	Si	Al	Cu	Zn	Pb	S	As	P
PAGALA	6,0	2,7	0,1	1,2	0,1	nd	nd	nd
CANOAS	6,1	3,6	0,1	0,9	1,1	1,6	0,2	0,2
IRECE	6,0	2,7	0	1,3	0,2	1,5	1,5	1,4
O'TOOLE	6,4	0,3	0,2	nd	nd	0,9	0	0

Tableau 3-8 - Charge minérale moyenne des goëthites pour 100 atomes de Fe dans divers chapeaux de fer étudiés au Togo et au Brésil.

Kosakevitch relie sur quelques exemples la morphologie de l'oxyhydroxyde de fer à sa composition avec notamment des pseudomorphoses de pyrite enrichies en divers éléments symptomatiques du gîte minéralisé. A Bois Madame (Hérault) les oxydes de fer contiennent jusqu'à : 10 % ZnO, 2,5 à 5 % PbO, 2 à 3 % Al₂O₃, 0,3 % MgO, 0,5 à 1 % CaO. A l'Argentella (Corse) ils contiennent aussi : 0,5 à 2 % PbO, 1% Cu, 1 à 1,5 % SO₃, 0,1 à 1 % As₂O₃. Pour des pseudomorphoses de chalcopirite, des teneurs entre 5 et 20 % CuO sont relevées, alors que les pseudomorphoses de pyrite associées n'en contiennent que 2 à 6 %.

Togbe, à Pagala (Togo), analyse des pseudomorphoses de sidérite en goëthite avec fréquemment 1 à 3 % ZnO.

Au Brésil nous avons discriminé les goëthites suivant leurs modes de mise en place et selon les teneurs en métaux ou en anions, et on peut évoquer des familles à Pb, à Zn, à Pb-Zn sur le gîte Pb-Zn-Ba de Canoas (Parana), à Ni ou Ni-Cu sur le gisement Ni-Cu-Pgm de O'Toole (Minas Gerais). Ni et Cu de la mine de O'Toole sont incorporés dans le réseau comme le nickel à Bonga au Burkina (Lavaud).

Au Burkina les goëthites de Perkoa sont porteuses de Zn et Pb et les goëthites de Kwademen contiennent au mieux 1,4 % de cuivre et 3 % de nickel sur deux échantillons différents (observations personnelles à la microsonde). A Bonga, Lavaud note que le plasma goëthitique peut renfermer jusqu'à 2,6 % de NiO, la goëthite bien cristallisée jusqu'à 1,3 % de NiO et la goëthite très bien cristallisée jusqu'à 0,4 % de NiO

Dans les cuirasses les substitutions Al-Fe sont banales et souvent fortes permettant de discriminer les goëthites et hématites alumineuses par la déformation du réseau cristallin. Les autres éléments sont trop peu représentés, en restant à l'état de trace, pour qu'ils puissent affecter le réseau et même être mis en évidence par microsonde EDS.

En conclusion

Pour une démarche de prospection minière, en zone cuirassée, l'attitude devant un affleurement ferrugineux consiste à définir son origine possible ou probable. Pour cerner

l'éventualité de la présence d'un signal de minéralisation (chapeau de fer) il est utile d'envisager la succession des critères qui ont été évoqués, car ils prennent place à différents stades de l'approche diagnostique, sur le terrain et au laboratoire avec une grande panoplie d'accès. En final le schéma de Butt et Smith, qui distingue à peu près tous les types d'expression ferrugineuse de surface, est un bon catalogue d'orientation, mais il y a un certain nombre d'investigations à réaliser pour qu'il soit validé avec les ambiguïtés des cas rencontrés. Les chapeaux de fer de Pagala, dans le centre du Togo, étaient des brèches ferrugineuses pour les géologues prospecteurs. Pour d'autres géologues il s'agissait de latérite ainsi que pour l'entreprise de travaux publics qui a construit la route Langabou - Yégué avec un soubassement partiel en chapeau de fer à près de 1 % de zinc : sans un soupçon d'argile c'est un matériau de tenue exceptionnelle n'ayant pas besoin de compactage.

A posteriori tout est plus simple quand les altérations sous jacentes aux affleurements ferrugineux sont connues et intégrées dans les filiations latéritiques des roches et de l'altération supergène des roches sulfurées. Ce n'est qu'après que l'on comprend vraiment auquel des profils correspondait l'affleurement (figure 3-6).

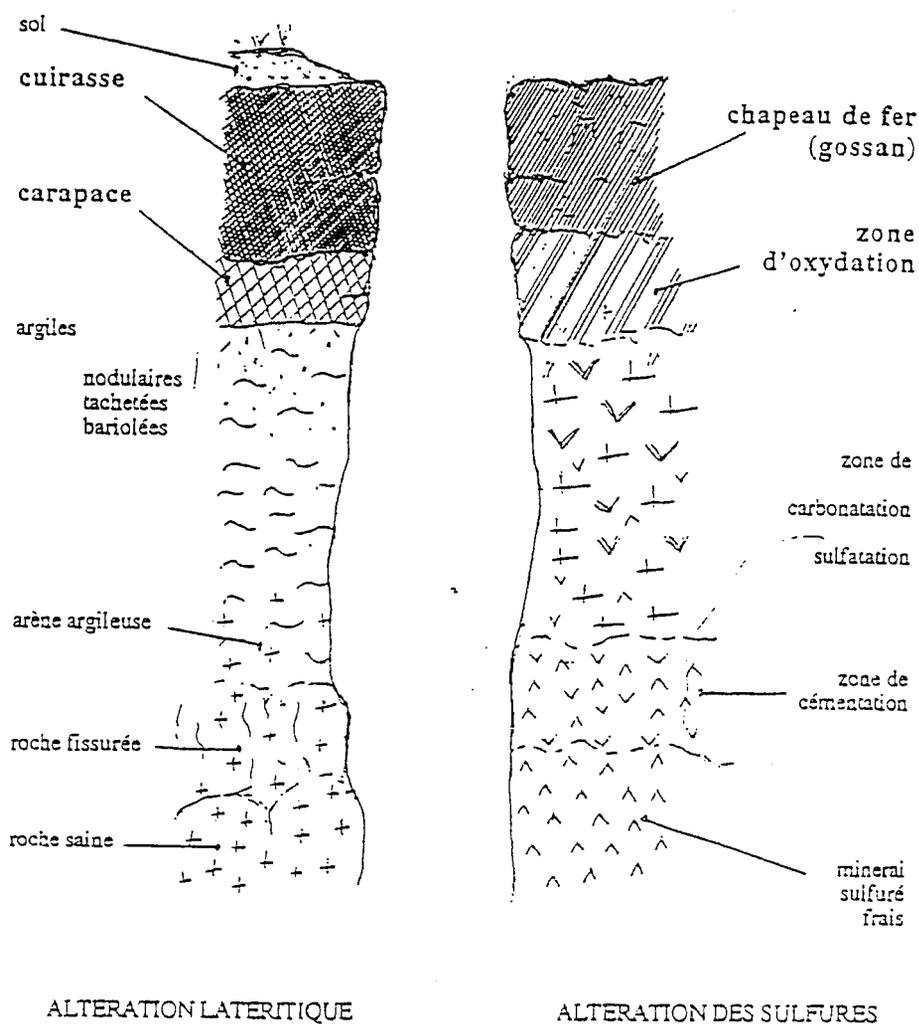


Figure 3-6 - Représentations schématiques d'un profil latéritique cuirassé et de l'altération d'une minéralisation sulfurée

IV - RESULTATS

1 - Observations et travaux d'orientation à Perkoa

a) L'existant

Les premières observations que j'ai eu l'occasion d'effectuer à Perkoa en 1984, m'avaient laissé deux impressions fortes :

La trace superficielle de la minéralisation sulfurée zincifère, mise en évidence en 1982, est un chapeau de fer présentant localement de fortes remobilisations en fer ou en manganèse, de très nombreux faciès silicifiés et quelques faciès brèchiques ferrugineux à quartz. Le chapeau de fer est un affleurement de 250 mètres de long sur 20 de large et 3 de hauteur, formant un petit relief allongé sur la plaine environnante.

La cuirasse de proximité, à 200-300 mètres au SE de l'affleurement, surplombe la plaine de 10-20 mètres. Elle contient des éléments ferrugineux à texture massive permettant d'évoquer la formation d'oxyhydroxydes de fer à partir de sulfures.

Enfin, un aspect annexe me semblait étonnant : la *distorsion* entre les résultats de la *prospection* géochimique (fortes teneurs en Pb, Zn, Ag et Mn ...) confirmés par les teneurs du chapeau de fer et la *composition du minerai* (absence de sulfures de plomb).

Géochimie

	Zn	Pb	Ag	Cd	Mn
minerai massif	200000	2000	50	500	
minerai disséminé	10000-50000	3000-10000	100	100	
chapeau de fer	90-5400	50-12000	1-112		75-90000
anomalie en sol	150	100	0,9		1500

Minéralogie

	pyrrhotite	pyrite	blende	galène	greenockite	magnétite
minerai massif	**	90 % des sulfures			**	**
minerai disséminé	90 % des sulfures		**	**	**	

Tableau 4-1 - Principales caractéristiques minéralogiques et géochimiques de Perkoa, connues en 1982

Un seul forage (PS4) a recoupé la minéralisation dans la zone d'oxydation, mais seules quelques analyses chimiques ont été effectuées : il faut noter que les teneurs en Pb et Ag sont fortes, alors que le Zn reste toujours inférieur à 0,1 %, ce qui faisait supposer *un fort lessivage* préférentiel de cet élément dans la zone d'altération.

Au niveau de *la méthode de prospection* ayant permis la découverte de Perkoa, l'intérêt s'est fixé à partir de 4 points anomaux en Zn, au cours de la prospection géochimique régionale sur prise de sol du PNUD (maille 400 X 400, anomalies entre 100 et 286 ppm). Le plomb n'est apparu que plus tard avec les prospections semi détaillées et détaillées, où il s'est avéré le meilleur marqueur de la géométrie du gisement, avec une très faible dispersion.

Documentation

Rapports du PNUD, du BUVOGMI, de MINOREX ...

NAPON S (1988) - Le gisement d'amas sulfuré (Zn-Ag) de Perkoa dans la Province du Sangyé (Burkina Faso - Afrique de l'Ouest). *Thèse Besançon, 310p*

b) Nouvelles données

Pour orienter de nouvelles recherches ciblées sur les chapeaux de fer, deux échantillons riches en oxyhydroxydes de fer ont été recueillis à l'affleurement. Des analyses sur 47 éléments ont été effectuées, ainsi que l'inventaire minéralogique par DRX. Ceci a été complété par la recherche de la localisation des métaux Pb et Zn à la microsonde.

	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Pb	Sb	Sr	V	Zn
BL1	1,7	704	16800	3	6	59	96	7	21	7	3035	150	153	368	1623
BL2	1,2	1552	1777	5	30	217	100	31	25	13	3744	531	231	454	1054

Tableau 4-2 - Analyses de deux échantillons du chapeau de fer de Perkoa (Blot)

La distorsion observée au cours de la prospection sur prise de sol, persiste dans le chapeau de fer où le plomb est mieux représenté que le zinc. Outre Ag et Mn, on observe aussi de fortes teneurs anormales en As, Sb, Ba ...

Les deux échantillons sont composés de quartz et d'oxyhydroxydes de fer, goéthite et hématite pour BL1, hématite seule pour BL2 ; BL1 contient en outre un peu de barytine. A la microsonde, seuls Pb et Zn ont été recherchés : ces deux éléments sont fixés en grande partie sur la goéthite, mais le plomb s'exprime aussi sous une forme sulfophosphatée avec Al et Fe.

Pour Perkoa, l'image de la minéralisation à travers le chapeau de fer est une image déformée, avec un affleurement riche en silice et en manganèse comportant de très fortes anomalies géochimiques peu en rapport direct avec la minéralisation. Les éléments As, Pb, Sb et Ag sont sur-représentés par rapport au zinc, élément cardinal du minerai zincifère et argentifère. Cette discordance pourrait être élucidée avec des investigations sur les altérations, si un jour il y a mise en exploitation. Actuellement les possibilités explicatives sont soit un maintien sélectif des éléments sur-représentés, par piégeage minéralogique au cours de l'altération, soit une variation latérale ou autre dans la composition de la minéralisation.

2 - Observations et analyses d'orientation à Kwademen

Documentation

Rapports du PNUD, du BUVOGMI ...

LOMPO M (1991) - Etude géologique et structurale des séries birimiennes de la région de Kwademen (Burkina Faso - Afrique de l'Ouest). *Thèse Clermont Ferrand, 191p*

a) L'existant

Les recherches ont apparemment été très désordonnées avec des objectifs variables d'une campagne à l'autre, si bien que certains résultats n'ont même pas été pris en compte dans les conclusions. *Les chapeaux de fer ont été considérés comme représentatifs d'une minéralisation Cu-Zn*, alors que la minéralisation observée est marquée d'abord par Ni et Cu, mais Ni n'a été que bien rarement analysé au cours des prospections de détail (syndrome Perkoa probable ?).

Deux chapeaux de fer sont repérés au sol dont l'un dit de Kwademen est bien défini, avec la recoupe par 3 tranchées, mais un niveau analytique très faible (rien en minéralogie, analyses de quelques éléments seulement). Trois forages semblent avoir recoupé la minéralisation primaire du chapeau de fer. De la malachite et un sulfure de zinc y auraient été reconnus (?).

	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Mn	Au (ppb)
tranchée T1	592	10	75	204	59	730	36
tranchée T1	614	30	66	66	50	1620	26
tranchée T1	609	40	80	54	62	710	22
tranchée T5	300	40	44	26	40	200	11
tranchée T3	2000	50	149	784	328	5640	12

Tableau 4-3 - Les analyses du chapeau de fer de Kwademen (PNUD, 1983)

	ppm					ppb			% pyrrhotite pyrite magnétite		
	Cu	Ni	Zn	Co	Pb	Ag	Au	Pt			
FAR 1 77,36-78,33	4000	5400	900	400	70 ?	1100	15	24	20%	**	**
78,33-80,17	200	50	100	50	70 ?	nd	nd	nd			
80,17-83,52	3500	1500	200	200	70 ?	990	19 ?	15	20%	**	**
FAR 5 193,5-195,5	Cu 2600	Ni 2000	Zn 2000	Co 2000	Pb nd	Ag nd	Au 19	Pt nd			
FAR 2 80,54-81,6 97,98-99,05	Cu 2300 1100	Ni 13	Zn 156	Co 43	Pb 14						

Tableau 4-4 - Analyses minéralogiques et géochimiques du corps sulfuré de Kwademen à partir de 3 forages (PNUD 1983)

Par ailleurs les rapports font état de la disjonction des anomalies en Cu et Zn, qui apparaissent parallèles, mais les autres métaux n'ont pas été suivis, si on excepte Au qui a été un thème particulier d'investigation.

Enfin le deuxième chapeau de fer, dit de Bavila, est fort discret avec une remobilisation ferrugineuse nette à boxworks importants, très limité en extension et de géochimie assez différente du précédent et apparemment seulement à Zn. Sa minéralisation semble avoir été recoupée par le forage FAR 8.

b) L'exploitation complémentaire des informations connues

Après un rapide calcul factoriel à partir des analyses des forages minéralisés, des enseignements complémentaires sont mis en lumière.

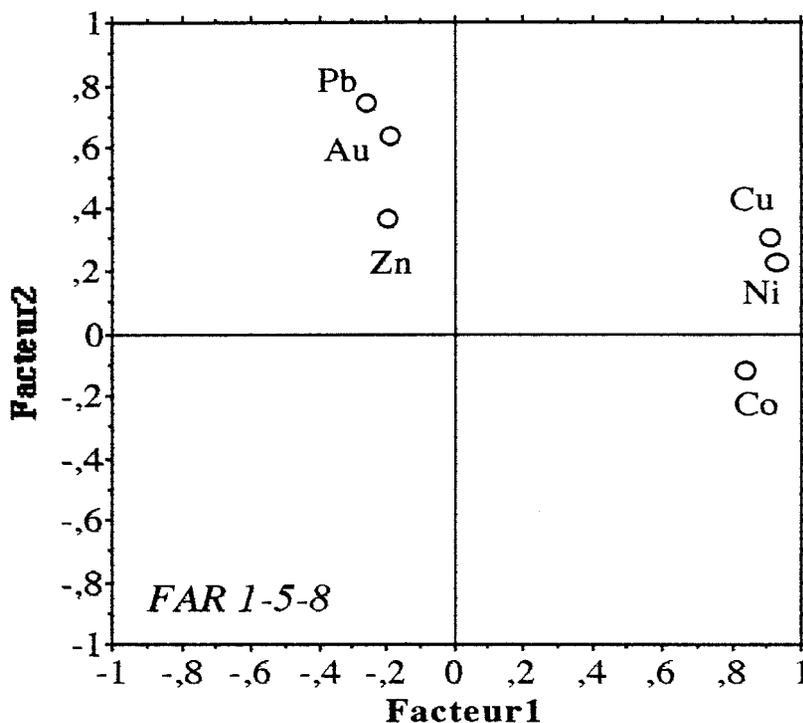


Figure 4-1 - Sondages Kwademen-Bavila, analyse factorielle et représentation des deux premiers axes

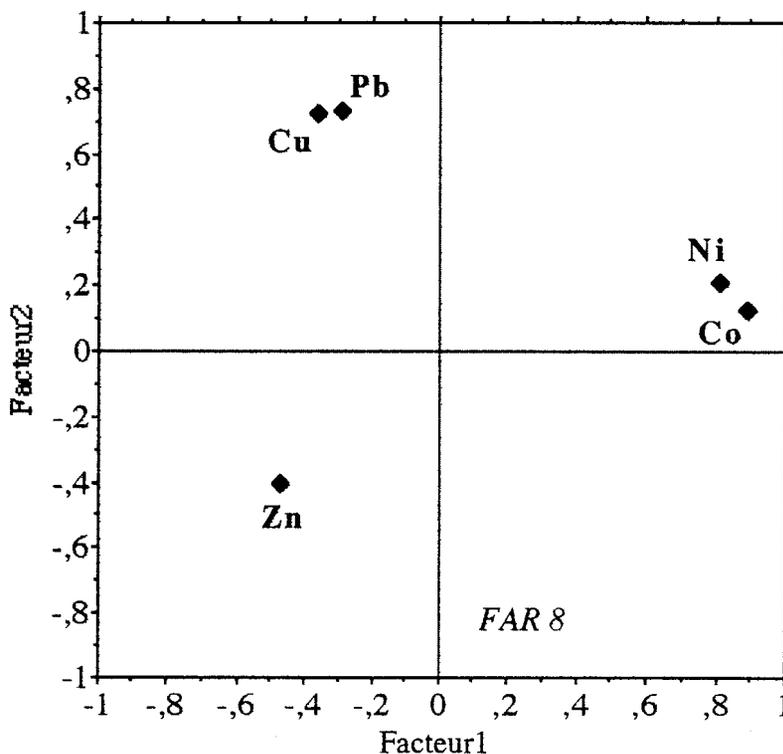


Figure 4-2 - Sondage Bavila, analyse factorielle avec représentation des deux premiers axes

Les minéralisations apparaissent nettement séparées en deux groupes sur les sondages du secteur Kwademen - Bavila, avec Pb-Zn-Au qui a été la cible des investigations à divers stades des prospections, et Cu-Ni-Co qui a été totalement négligé (figure 4-1).

En ne prenant en compte que le forage de Bavila, 3 groupes se distinguent Cu-Pb, Ni-Co et Zn, permettant de croire à d'autres types de minéralisations (figure 4-2).

c) Nouvelles données sur le chapeau de fer de Kwademen sud

Les faciès du chapeau de fer y sont complexes, avec des boxworks souvent très denses, des remobilisations ferrugineuses intenses et une grande variété des couleurs et des densités des matériaux extraits des tranchées et puits de prospection. Il s'étend sur plus de 500 mètres de long, et une dizaine de mètres de large, sans marquer le paysage (affleurement de moins de 1 mètre de haut).

La cuirasse latéritique est proche surplombant l'affleurement de 10 à 20 mètres. Elle contient des éléments de même nature que le chapeau de fer, ainsi que des éléments Fe-Mn. Ces éléments peuvent être libérés par le démantèlement de la cuirasse et il y a ainsi d'assez nombreuse "pierres volantes" à faciès de chapeau de fer.

Plusieurs échantillons ont été prélevés à partir des tranchées et puits existants, des affleurements ferreux (et magnétique) et mangano ferreux ainsi qu'une "pierre volante" de démantèlement de la cuirasse, ont permis d'essayer de poser les problèmes à résoudre dans le cadre de recherches à approfondir.

	As	Ba	Co	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Sr	Te	V	Zn
chapeau de fer												
BL4	88	74	116	212	945	4	29	1961	15	33	512	200
BL5	29	202	18	89	2605	nd	25	279	279	30	448	162
BL19	nd	90	14	148	515	nd	52	5	6	nd	865	118
BL45	71	128	22	83	89	15	140	14	13	50	1546	99
affleurement minéralisation Fe magnétique												
BL46	nd	187	66	49	285	16	13	1852	11	nd	271	84
affleurement minéralisation Mn-Fe												
BL56	nd	1116	177	38	209	16	23	629	859	nd	187	138
pierre volante												
BL3	5	57	34	94	42	nd	24	59	2	nd	446	276
	Au	Pt	Ag	Pb	Sc	Ta						
chapeau de fer												
BL4	na	na	nd	nd	44	nd						
BL5	na	na	nd	nd	27	nd						
BL19	na	na	2,2	nd	25	nd						
BL45	0,015	nd	nd	nd	35	nd						
affleurement minéralisation Fe magnétique												
BL46	0,010	0,085	0,7	8	nd	nd						
affleurement minéralisation Mn-Fe												
BL56	0,020	0,029	nd	25	7	107						
pierre volante												
BL3	na	na	nd	12	43	nd						

Tableau 4-5 - Analyses d'orientation du chapeau de fer de Kwademen et de roches proches (Blot)

La minéralogie est principalement constituée de quartz, de goëthite et d'hématite. La remobilisation du niveau Fe-Mn (BL56) se traduit par la présence d'asbolane, à partir du grenat spessartine, tous les deux déterminés par DRX.

La recherche de la localisation de Ni et Cu dans le chapeau de fer, a été testée à la microsonde sur deux échantillons (BL5 et BL4), montrant bien que ces éléments sont portés par la goëthite. On a mesuré des concentrations atomiques par rapport au fer de 1,4 % de cuivre et de 3 % de nickel, sur les deux échantillons respectifs.

C'est l'importance de Cu et Ni qui semble caractériser ces matériaux de surface, alors que le zinc présente un fond élevé mais sans expression particulière. L'argent est présent et la présence de platine semble liée au nickel. Les teneurs anormales en Te mériteraient une vérification.

Toutes ces caractéristiques semblent voisines des chapeaux de fer sur sulfures Ni-Cu, comme à O'Toole au Brésil étudié précédemment et exploité depuis par la valorisation de la minéralisation Ni-Cu par les Pgm, ou Yilgarn en Australie.

3 - Recherche sur le gîte de Ni latéritique de Bonga

Les recherches antérieures du PNUD ont portées exclusivement sur l'estimation quantitative de la dimension et de la teneur du gîte de Bonga, classé comme nickel latéritique.

Les observations réalisées dans le cadre du programme IRD-UO-BUMIGEB ont montré que des problèmes particuliers de surface n'avaient pas attiré l'attention des prospecteurs, avec un cuirassement enveloppant le massif, ayant des pendages forts, et présentant différents éléments en blocs plus ou moins importants, de bauxite et de roches hyper-ferrugineuses, goëthitiques, à faciès chapeau de fer. Il est à noter aussi que le sommet du massif ne présente pas le moindre trace de bauxite. La bauxite n'a pas été étudiée.

A Bonga, qui est un massif magmatique très différencié, allant des péridotites aux diorites, nous avons été frappé par la présence de faciès de chapeau de fer de certains éléments inclus dans la cuirasse, permettant d'évoquer la présence de sulfures parentaux (nous avons également déterminé du soufre natif dans du quartz). Comme ce gîte n'a été exploré que pour son stock de "Ni latéritique", il peut raisonnablement être posé l'origine du nickel (l'exploration a rarement dépassé 20 à 30 mètres de profondeur). Le travail de T. Lavaud, dans le cadre d'un DESU à l'Université de Toulouse, retient la notion de chapeau de fer sans toutefois pouvoir préciser l'origine parentale de ces faciès particuliers, laissant la possibilité de variation de composition dans la roche mère avec une étape de transformation hydrothermale et une altération en chapeau de fer développée sur des listvénites, non observées à Bonga, mais connues ailleurs. Quoiqu'il en soit la meilleure image de ces faciès hyperferrugineux, est de les envisager comme représentant un paléo-chapeau de fer, dont les racines carbonatées et sulfatées ont forcément été éliminées par l'altération latéritique. Par ailleurs l'étude pétrographique a permis de montrer que

la diorite présente toutes les caractéristiques d'une albitite, et que les faciès de cornéenne sont en réalité des amphibolites. Quant à la place du nickel, l'étude autorise à en définir plusieurs formes suivant le degré d'évolution ; dans les roches c'est la péridotite serpentinisée qui est la plus riche avec une localisation du nickel dans la serpentine, la chlorite et le talc. Dans les saprolites grossières, ce sont les blocs d'UB silicifiés qui sont les plus riches avec des localisation dans les silicates et autour de la magnétite (ferritchromite). Dans les faciès de chapeau de fer le nickel est lié à la goëthite et là aussi il est prouvé qu'il y a localisation dans le réseau de la goëthite. Ce dernier point rejoint bien les observations réalisées à O'Toole au Brésil (Imbernon). Cependant la forme primaire du nickel reste encore non précisée.

4 - Les recherches sur les ferruginisations du Bassin de Taoudéni

Les résultats obtenus dans la partie septentrionale du Burkina, s'inscrivant dans le contexte du Bassin de Taoudéni, Néoprotérozoïque, sont suffisamment novateurs pour qu'une place particulière soit donnée à l'analyse de la démarche de recherche et aux résultats obtenus.

Tout d'abord c'est en utilisant les méthodes définies dans le chapitre III, que des observations d'affleurements ferrugineux me sont apparues comme susceptibles d'être des indices de minéralisations.

Pour en aborder le champ, car la région n'a été que peu étudiée, je me suis résolu à effectuer des analyses systématiques minéralogiques et géochimiques, qui ont conforté l'hypothèse d'un intérêt métallogénique. Afin de laisser le moins de domaines d'ombre, les analyses ont balayé 58 éléments y compris des éléments habituellement absents du domaine sédimentaire connu. Quarante éléments présentent des teneurs supérieures au clarke qui seront détaillées plus loin (chapitre VI).

Se	800	As	300	Sb	200	Te	150	Mn	140
Au	60	Pb	45	Pt	45	Mo	45	Co	35
Pd	35	Bi	29	Zn	23	Re	22	Cd	18
V	16	Be	13	Fe	12	U	10	Hg	10
Ag	7	Tl	7	Ba	7	S	6	W	6
Cu	6	Cr	5	Y	4	P	4	Yb	3
Ga	3	Tb	3	Ni	3	Ce	3	Lu	3
Nd	3	In	3	Sm	2	Eu	2	Th	2

Tableau 4-6 - Eléments présentant une teneur maximale supérieure à deux fois le clarke et valeur du clarke de concentration maximum de chacun de ces éléments.

Il y a dans cette région suffisamment d'observations nouvelles pour qu'il y ait matière à révision de la nature des mécanismes de mise en place des roches et des conséquences pour la distribution des éléments. Les calmes séries sédimentaires et l'absence d'indices pour la prospection qui caractérisaient l'état des connaissances à la fin des années 1960, devraient

évoluer et, quarante ans après la tectonique, l'hydrothermalisme et la métallogénie ont à acquérir des connaissances nouvelles et à imposer de nouvelles orientations.

Conclusions

Les recherches sur les ferruginisations spécifiques de minéralisations s'inscrivent souvent dans ce qui est déjà connu, en apportant des informations complémentaires, ou en confirmant des données négligées qui, par exemple à Kwademen, incite à proposer de reprendre les minéralisations sulfurées et à les étudier. Mais il reste qu'il manque un terrain d'exercice pour mieux connaître les chapeaux de fer dans leur mise en place en milieu tropical, ce qui serait possible à Perkoa, Kwademen et probablement Tiébélé. L'intensité des altérations climatiques et leur extension est vraiment spécifique de l'Afrique de l'Ouest et aucun autre modèle réel comparable n'existe ailleurs.

Par ailleurs, et ce sera développé maintenant, les investigations sur les ferruginisations du Bassin de Taoudéni débouchent sur des perspectives nouvelles pour la recherche prospective de ressources minérales. Sans l'approche à partir des ferruginisations, il n'y aurait eu que peu de chance que le sujet émerge à échéance rapprochée.

V - RESULTATS OBTENUS DANS UNE PARTIE DU BASSIN DE TAODENI, LA PARTIE NORD DU BURKINA

1 - Les prospections antérieures de la partie sédimentaire septentrionale du Burkina

Les observations principales ont été effectuées au Nord du Burkina, dans les séries qui constituent le groupe d'Ydouban (Reichelt) au Mali. Il s'agit des indices de manganèse d'Ansongo (formation Ib), de cuivre de Firgoun (formations Ia et Ib) et de diverses imprégnations d'hématite (formations I et II). Les imprégnations de limonite ou d'hématite-limonite, semblent assez fréquentes et marqueraient des fractures.

Quelques essais de recherche d'autres substances liées au contexte sédimentaires ont été effectués, particulièrement pour l'uranium à la bordure du Bassin, et plusieurs indices sont connus tant à l'Ouest qu'au Nord du Burkina. A la faveur des travaux de recherche d'uranium dans le Nord du pays par le CEA, les échantillons collectés ont montré quelques anomalies en d'autres métaux qui ont été précisées succinctement par la DGM, puis par le PNUD entre 1971 et 1973.

Trois secteurs principaux ont été identifiés, mais il est parfois bien difficile de préciser le niveau des investigations réalisées alors : Mare de Soum, Kabia et In Tangoum.

3 - 1 - La prospection du secteur de la mare de Soum, au Sud de Toussougou, avec 24 km² de prospection géochimique et 2,4 km² de prospection géophysique est la mieux connue. 1271 échantillons de sol ont été prélevés suivant une maille 100 * 200, 650 analysés, 120 concentrés, 21 puits creusés, 1 forage arrêté à 91 mètres, 49 roches prélevées. On connaît les cartes géophysiques (résistivité, PP, PS et 2 sondages électriques) mais il ne semble pas que les cartes géochimique et géologique soient conservées.

Les analyses des sols ont présenté des anomalies nettes et souvent superposées en Cu et Mo, orientées indépendamment de la direction des couches sédimentaires.

	Cu	Mo
Fond géochimique	25	4
Anomalie	62	35

Tableau 5-1 - Géochimie des sols au sud de Toussougou (PNUD)

Les affleurements analysés sont définis sous les appellations de latérite, jaspes lités (rouge, blanc, beige), de silexite brun pâle, de brèches diverses et de grès parfois lités. Seuls les éléments Cu, Mo et Zn semblent avoir été analysés.

	Cu	Mo	Zn
Latérite	180	170	190
Jaspe	140	35	220
Brèches	280	150	300
Grès	305	75	300

Tableau 5-2 - Géochimie des affleurements du sud Toussougou : valeurs maximales (PNUD)

Dans les puits, les roches atteignent des teneurs de 700 ppm Cu, 300 ppm Mo et 350 ppm Zn

Les conclusions de la mise en évidence de fortes teneurs métalliques, dans les sols et dans les roches, sont restées très prudentes en évoquant plusieurs hypothèses métallogéniques qui n'ont pas été étudiées par la suite. Tout d'abord la proximité d'un gisement Pb-Zn téléthermal lié à la silicification où Mo serait accompagnateur, et puis l'éventualité de la proximité d'une source magmatique (intrusion granitique) qu'il reste à mettre en évidence.

La prospection géophysique a donné deux anomalies PP, discordantes par rapport à l'orientation sédimentaire, et en partie calées sur les anomalies géochimiques en Cu et Mo. Ces anomalies PP traduiraient un accident sub-vertical. Le fond magnétique reste plat. La carte des indices du Burkina, à 1/1 000 000, a retenu l'anomalie géochimique Cu-Mo.

3 - 2 – Prospection du secteur de Kabia :

100 km² auraient été cartographiés au 1 / 20000, mais seulement 4 layons de 2 km sont reportés sur un schéma de localisation. 338 échantillons de roche affleurante ont été prélevés et analysés pour Zn et Cu. Ces échantillons ont partiellement été analysés pour d'autres éléments (33 pour Co, 280 pour Mo, 39 pour Ni et 29 pour Pb). Les analyses sont reportées en fonction de la nature de la roche : grès, schistes ou brèches. Il est noté que la série est schisteuse et monotone avec localement des brèches siliceuses qui sont considérées d'origine sédimentaire et des niveaux de quartz manganésifères. Les observations précisent qu'aucune tectonique ne semble affecter la zone où les pendages sont réguliers et forts (50° NW).

Les conclusions des prospecteurs sont restées peu encourageantes en rattachant toutefois, comme au Sud de Toussougou, les fortes valeurs métalliques au rôle collecteur des faciès riches en fer. Kabia figure comme anomalie géochimique en zinc sur la carte des indices, à 1/1 000 000 du Burkina.

	Cu	Ni	Zn	Co	Pb
Schistes	250	220	1700	500	30
Grès	125	120	430	170	60
Roches siliceuses et quartz	400	280	600	270	20
Brèche siliceuse	70	20	370		
Brèche un peu Fe	63	26	480	22	
Brèche moyen Fe	133	630	1000	81	
Brèche Fe	535		1300		
Roche ferrugineuse	110		2560		

Tableau 5-3 - Géochimie des affleurements de roches du secteur Kabia (PNUD) : valeurs maximales

3 - 3 – Prospection du secteur de In Tangoum :

60 km² auraient été cartographiés au 1 / 20000

Les observations font état de la présence du niveau de base du Sédimentaire, gréseux et conglomératique, de grès éventuellement ferrugineux et surtout de la grande extension de brèches siliceuses alternant avec des jaspes et des phanites. Le ciment des brèches est siliceux le plus souvent mais parfois ferrugineux.

	nb	min	max
Cu	60	10	88
Mo	18	-	4
Ni	42	1	40
Zn	60	4	360
Cr	42	6	80
Co	42	4	75

Tableau 5-4 - Géochimie des sols du secteur in Tangoum (PNUD)

Les plus fortes valeurs mesurées sont 260 ppm Cu, 160 ppm Ni et 1600 ppm Zn. La carte des indices du Burkina, à 1/1 000 000, a retenu l'anomalie géochimique en Zn.

3 - 4 - Prospection du secteur de Gountouré Kiri où 120 km d'itinéraires auraient été parcourus. On ne sait que la présence d'une anomalie radiométrique et l'absence d'anomalie en Ni, Cu et Zn. La carte des indices du Burkina, à 1/1 000 000, a retenu l'anomalie géochimique en U.

3 - 5 – Sur le secteur de Tin Akof, les analyses de sols ont donné des valeurs très faibles : 4 à 25 ppm pour Cu, 10 à 40 ppm pour Ni et 10 à 60 ppm pour Zn.

Les conclusions des géologues et géochimistes du PNUD, bien que d'origines différentes, méritent d'être relues, afin d'apprécier le niveau de compréhension des anomalies métalliques mises en évidence dans ces prospections dispersées.

"Les brèches silicifiées et les jaspes, considérés théoriquement comme un bon métallotecte, et la présence de quelques valeurs plus élevées en zinc ou en cuivre et molybdène ont laissé l'impression que nous sommes en présence d'une province métallogénique à sulfures intéressante.,

L'examen de toutes les roches à teneurs plus élevées en éléments métalliques a montré que toutes ces valeurs sont liées à un faciès ferrugineux situé dans la zone de circulation des solutions descendantes." Cette appréciation me semble peu compréhensible.

Ou encore l'affirmation de Lepeltier précisant que

"le fer a joué un rôle de collecteur des éléments métalliques sans jamais arriver à des concentrations de valeur économique." Cette appréciation me semble peu compréhensible.

En conclusion,

"les brèches d'In Tangoum et de la Mare de Soum pourraient être un bon métallotecte, mais en l'absence d'une source minéralisatrice, même si cela existait en profondeur, l'absence des voies de transport pour les solutions n'a pas conduit à la formation de gisement" et, enfin "il n'existe aucun élément dans les surfaces étudiées qui plaide en faveur d'une source minéralisatrice et d'une voie de transport"

Cependant, en même temps Grady estimait cette zone septentrionale du Burkina comme de première importance pour les perspectives métallogéniques, à l'instar de provinces canadiennes, avec des métallotectes d'intérêt certain (brèches silicifiées, jaspes, calcaires, dolomies ...).

Par rapport au support cartographique régional, ces différents points semblent se situer dans des contextes à la fois voisins et à la fois différents. D'Est en Ouest, les anomalies de Kabia, In Tangoum et Soum se situent dans des schistes, des brèches et des carbonates. Cependant toutes les observations évoquent la place privilégiée de roches ferrugineuses comme support des anomalies métalliques.

2 - Les petits corps ferrugineux du Nord Burkina

2 - 1 - Le cadre

Au niveau régional le paysage est marqué par de larges cordons dunaires orientés E-W, alternant avec des paysages de brousse tigrée si typique en photographie aérienne et dont l'accès ou le franchissement sont toujours délicats. La vallée du Béli, comme les zones interdunaires est relativement riche en affleurements, même avec les alluvions qui marquent le Béli, où les seuils rocheux sont nombreux avec une forte incidence sur la circulation de l'eau. Le cuirassement est à la fois disséminé et bien exprimé, ennoyant les calcaires le long du Béli, et surtout donnant une puissante dalle sur les calcaires de Fadar Fadar au Forage Christine. Fréquemment on observe une couche de décarbonatation au contact du calcaire, très légèrement ferruginisée, sans commune mesure avec l'aspect dallé plus régional. Au Nord du Béli les cuirasses sont assez fréquemment marquées par de petites buttes sur les schistes où les altérations kaoliniques sous-jacentes y sont fréquemment mises à nue ; ces cuirasses sont peu puissantes et assez pauvres en fer. Au Sud du Béli, vers la bordure du Bassin, les cuirasses sont plus disséminées, peu puissantes, pauvres en fer, et semblent correspondre plus aux pélites qu'aux grès. Donc le

milieu superficiel est caractérisé par la présence d'un cuirassement assez étendu et discontinu, le plus souvent peu puissant et pauvre en fer, assez bien marqué sur les pélites et schistes et sur les roches carbonatées. Le corollaire en est un lessivage important des éléments, d'abord des éléments lithophiles (alcalins et alcalino terreux), mais aussi des autres éléments y compris les métaux. Cependant l'espace interdunaire peut montrer des signes de confinement pour les métaux alcalins, avec la présence de sols halomorphes tout à fait climatiques, endoréiques (Boulet).

Les ferruginisations qui échappent à la logique climatique régionale posent un problème particulier dans l'expression même de leur description, ce qui induit un traitement particulier dans leur étude et dans l'interprétation qui peut en être donnée :

- les affleurements sont allongés et de petite taille (dam à hm). Ils semblent être organisés en chapelets.
- les faciès ferruginisés sont variés, y compris sur un même corps ferrugineux : massif, gréseux, brèchique . Des boxwoks, sans être fréquents, existent.

Cette description exclut la ressemblance aux descriptions des roches ferrugineuses climatiques banales que sont les cuirasses latéritiques et la dimension de la roche originale devrait être sans commune mesure avec celle des roches d'extension régionale. A de petites ferruginisations superficielles ne peuvent correspondre que des roches parentales de petites dimensions qui sont, et c'est une observation complémentaire essentielle, répétées à l'échelle régionale, soit parce qu'il y a eu des circulations préférentielles, soit parce qu'il y a des répartitions préférentielles originales d'éléments. Le plus logique est de toute façon de considérer que ces petits corps ferrugineux sont spécifiques de l'altération de petits corps de roche particulière comme cela est connu pour toute enclave de roche dans un ensemble plus vaste (Blot, Leprun, Pion).

2 - 2 - Caractérisation d'ensemble

Les ferruginisations du Nord Burkina sont connues, comme brèches ferrugineuses, depuis longtemps par les premiers itinéraires de Delfour, mais il en a abandonné la mention, aussi bien dans son travail de synthèse, que dans la cartographie régionale. Leur appellation initiale de brèches ferrugineuses a été reprise ultérieurement lors des prospections relativement rapides du PNUD, sans conforter l'idée tectonique que cela sous-entendait. En fait cette appellation est ambiguë, avec à la fois une notion de tectonique et avec la présence du fer sous une forme hydroxylée typique du domaine de l'altération supergène. Chacun peut y reconnaître les deux signatures, encore qu'il existe des brèches siliceuses confortant l'origine tectonique, et qu'il existe des faciès ferrugineux non brèchiques distincts de la cuirasse latéritique confortant, à côté des cuirasses la reconnaissance de roches ferrugineuses supergènes. Il a aussi été signalé précédemment que les silicifications étaient une constance dans la proximité des ferruginisations mais leur statut n'a jamais été bien tranché : Delfour et Reichelt ont évoqué des hypothèses

génétiques aussi diverses que la sédimentation chimique, l'hydrothermalisme et la participation de l'altération supergène, tout en considérant les brèches de jaspes, qui ont une large extension, comme syn-sédimentaires. Avec Miningou ont été privilégiées les expressions siliceuses post-sédimentaires, certainement hydrothermales, qui accompagnent si fréquemment les ferruginisations. Toutes ces possibilités, alternatives ou conjointes, contribuent à la difficulté de déterminer ce qui est important dans la présence de ces formations ferrugineuses.

Le contexte des secteurs prospectés par le PNUD a été vérifié et a permis de reconnaître les faciès de brèche ferrugineuse, proches les uns des autres suivant une extension de l'ordre de 150 km Est-Ouest entre Kabia et Toussougou (Mare de Soum). Autour de Tin Akof la relation entre la formation de brèche silicifiée et jaspe de la carte de l'Oudalan (1970 de Delfour et Jeambrun) avec les corps ferruginisés est une constante et plusieurs dizaines de ces corps ont été distingués. On peut s'interroger sur l'abandon de la définition de brèche ferrugineuse par Delfour entre ses premiers travaux (12 affleurements cartographiés y compris hors du secteur que nous avons parcouru) et sa synthèse de 1965 qui a été reprise par la carte géologique de l'Oudalan, alors que les prospections du PNUD ont réintroduit l'appellation de « brèche ferrugineuse ». Cependant en dehors des faciès brèchiques, gréseux, massifs ou scoriacés des ferruginisations, qui présentent des critères typiques de l'altération de minéralisations sulfurées ou carbonatées, d'autres formations ferrugineuses ont été reconnues : des jaspes à hématite passant à des hématites, des intercalations ferrugineuses ou mangano-ferrugineuses en plaquettes dans les schistes, et, bien entendu, des cuirasses latéritiques. Il peut y avoir des confusions entre les corps ferrugineux et les cuirasses latéritiques, mais l'abondance du fer fait assez bien la différence, accompagnée d'un épaissement sensible de la cuirasse.

Il n'est pas évident d'aller plus loin dans la typologie des ferruginisations, avec une connaissance aussi sommaire de la région, et il est sûr qu'un des axes à développer dans l'approche du problème est la définition précise des différents corps ferrugineux, aux origines certainement très différentes, donc aux significations contrastées.

En même temps il faudra bien résoudre la nature exacte de ce qui est appelé « brèche », c'est à dire des brèches siliceuses ou silicifiées et des brèches ferrugineuses qui pourraient être des faciès d'envahissement par du fer secondaire, consécutivement à l'altération de sulfures ou de carbonates ferrugineux. Cartographiquement, mais également à l'observation directe, il y a une relation nette entre les deux. Il peut s'agir de brèches tectoniques syn-sédimentaires ou postérieures aux dépôts de sédiments, ce qui est une discrimination essentielle dans l'éventuelle circulation profonde des éléments. On peut remarquer toutefois que l'extension cartographique de la formation de brèche silicifiée est environ de 60 km E-O, alors que les faciès brèchiques ferrugineux sont reconnus sur 150 km E-O. En particulier la formation brèchique n'est pas cartographiée dans le secteur de Kabia à l'Est du Burkina septentrional, alors que les anomalies métalliques définies par le PNUD le sont principalement sur les brèches ferrugineuses. Enfin, il apparaît aussi que les brèches ferrugineuses du Sud de Toussougou seraient incluses dans la série des carbonates d'Irma, d'après les mêmes travaux. Ces situations sont apparemment

différentes, soit par une connaissance trop sommaire de la géologie, soit parce que le phénomène de bréchification affecte différents termes de la série sédimentaire.

L'observation n'a pas permis à Delfour, à Reichelt et aux géologues de recherche minière de définir de manière convaincante les éventuels événements tectoniques responsables de la formation des brèches. Les survols en magnétométrie notamment ne révèlent pas d'accidents importants, mais plutôt un enfoncement progressif du socle sous les sédiments qui atteindrait 1700 mètres vers Tin Akof. Cependant quelques résultats de mesures géophysiques au sol autorisent à croire à des événements post sédimentaires ; ainsi les mesures de PP, au Sud de Toussougou, suggèrent un accident sub-vertical dans un milieu sédimentaire à faible pendage régulier ; de même le profil de résistivité électrique réalisé pour notre étude indiquerait un corps conducteur discordant par rapport au sédimentaire.

2 - 3 - Contribution d'une approche en géologie des altérations

En final les différentes approches ont à apporter leurs méthodes et leurs connaissances pour évaluer, dans leur domaine respectif, les significations des corps ferrugineux. En ce qui concerne une première approche supergène, déterminante dans la mise en évidence du phénomène, il est indispensable de se référer à ce qui est connu sur la spécificité des altérations des formations de petite dimension, enclaves, dykes et corps minéralisés dans des ensembles plus grands et encaissants. En effet il faut considérer à la fois la spécificité du matériau et sa réactivité à l'agression climatique.

Le problème de la présence de nombreuses petites ferruginisations dans le Bassin de Taoudéni du Nord Burkina, est complexe et cette complexité a des origines endogènes (les corps parentaux) et exogènes (probables divers degrés d'altération de ces corps primaires et de maturation des ferruginisations). Ceci s'exprime bien à travers l'ensemble des paramètres définis par Smirnov pour les altérations de corps sulfurés et l'expression des chapeaux de fer. Ces principes s'appliquent de fait à tout corps en enclave, mais ne prennent une expression spectaculaire qu'à partir des corps sulfurés

Les ferruginisations sont, d'une certaine manière, la forme d'équilibre d'une roche minéralisée soumise aux contraintes "climatiques" en un ensemble de milieux successifs (réducteur, hydroxylé, oxydé). Du fait de la localisation géographique dans la même région, la notion de "contrainte climatique" externe, est ici sensiblement la même pour tous les corps altérés, et les paramètres de différenciation sont donc plus endogènes qu'exogènes. Les principaux paramètres définis par Smirnov qui guident l'altération supergène d'un gîte sulfuré sont multiples et les principaux sont :

- les conditions climatiques
- des facteurs morphologiques et tectoniques
- des critères caractéristiques du minéral

- des critères caractéristiques des roches encaissantes
- du mode de gisement
- des propriétés physico-chimiques et dynamiques des eaux souterraines

Par exemple les climats chauds et humides sont plus favorables au développement de l'altération des sulfures que les climats secs et les climats froids ; l'altération s'exprime mieux sur des corps verticaux qu'horizontaux ; l'abondance de pyrite est un facteur d'acidification essentiel (génération de H_2SO_4) ; un environnement carbonaté facilite la neutralisation en bloquant l'évacuation d'éléments mobiles ; un minerai dispersé ne ressemble pas à un minerai massif, même dans ses altérations ; une eau peu chargée et facilement renouvelée est plus susceptible d'être un bon vecteur et la place de niveau piézométrique d'une nappe phréatique contribue fortement à la définition d'une zonation du minerai altéré vers la surface. A beaucoup d'égard la variété des ferruginisations devrait, plus particulièrement être guidée par la nature et la géométrie des corps parentaux hypothétiques.

Il fait nul doute que les roches ferrugineuses sont, en l'état actuel, *des produits d'altération*, avec notamment une grande abondance d'hydroxydes de fer (goëthite le plus souvent). La question principale est de reconstituer l'origine primaire de cette expression ferrugineuse secondaire. Pour un certain nombre de critères que j'ai sélectionné depuis plusieurs années, et spécifiquement depuis plus d'un an pour le secteur de Tin Akof, la piste de la présence de chapeaux de fer, pourrait expliquer une bonne partie des anomalies définies précédemment par le PNUD. Les arguments avancés pour le dire sont :

- les affleurements sont allongés et de petite taille (dam à hm). Ils semblent être organisés en chapelets.
- les faciès ferruginisés sont variés, y compris sur un même corps ferrugineux : massif, gréseux, brèchique . Des boxwoks, sans être fréquents, existent.
- la pauvreté en alumine exclut une origine climatique simple
- les éléments en trace semblent tout à fait typiques d'une origine sulfurée
- les principaux éléments confirment ceux du PNUD avec notamment Zn, Cu et Mo, mais d'autres éléments sont tout aussi importants, As, Co, Cd, Ni, Pb, Au ...

Ce cortège géochimique est relativement banal dans les minéralisations sulfurées, mais il est encore difficile d'estimer la nature de la minéralisation primaire responsable de cette trace supergène pétrographique, minéralogique et géochimique que sont les affleurements ferrugineux. L'absence d'anomalie magnétique, vérifiée sur le terrain permet cependant d'exclure toute participation significative de minéraux magnétiques (pyrrhotite, magnétite, ilménite).

Il peut être reconsidéré l'interprétation des prospections antérieures du PNUD sous l'éclairage de l'existence de «*chapeaux de fer*», qui ont alors des teneurs tout à fait normales pour une oxydation de gîte sulfuré. Retenons qu'à Perkoa par exemple le taux de lessivage du

Zn est de l'ordre de 99 %, mais qu'il reste quand même une anomalie significative par rapport à l'environnement.

3 - Vrais ou faux chapeaux de fer

Avec de nombreux critères distinctifs par rapport à tous les types de roches ferrugineuses de surface, les ferruginisations du Nord Burkina sont plus à considérer comme l'expression de l'altération de minéralisations ou de témoignage de circulation endogène d'éléments à partir de fluides minéralisés. Comme avec les chapeaux de fer établis il y a des ressemblances d'affleurement, de faciès, l'absence d'argiles et le piégeage de nombreux éléments par les oxyhydroxydes de fer (Blot, Oliveira, Imbernon, Togbé, Magat, Besnus ..). Evidemment il n'y a aucune coupe, aucun profil pour en apporter la preuve et pour en dégager la signification exacte d'une relation directe ou non avec une minéralisation sulfurée.

Ici, seule la résultante superficielle est connue et de toute évidence elle a beaucoup de ressemblance morphologique avec un chapeau de fer, avec des domaines de confusion relativement limités à ce qui est considéré comme ferruginisation de fracture ou encore comme chapeau de fer déplacé où sont plus privilégiées les circulations de fluides que la présence de métaux sulfurés (ou carbonatés). En fait ce sont les travaux ultérieurs éventuels qui autoriseront à faire ces distinctions.

Dans le contexte d'altération latéritisante, il est peu probable que la zone d'oxydation d'un éventuel corps sulfuré soit enrichi en métaux, mais par contre il est vraisemblable que les chapeaux de fer soient lessivés d'une grande partie de leurs éléments, si la maturation est bien évoluée. Par maturation évoluée il faut comprendre que tous les minéraux primaires et tous les minéraux secondaires ont disparu, laissant sur place les minéraux les mieux en équilibre avec le "climat", le quartz et les oxyhydroxydes de fer. Ceux ci sont qualitativement et quantitativement bien représentés et quasi exclusifs des autres minéraux. Seul le pouvoir de rétention des métaux par les oxyhydroxydes de fer reste le lien direct entre la composition de la source primaire, quelle que soit la forme de la rétention (métal piégé dans la structure cristalline pour les éléments les plus petits, adsorption de surface pour les gros éléments). C'est à partir de la composition des minéraux secondaires qu'il faut espérer reconstituer la nature de la formation parentale. Le quartz, ou les autres formes d'expression siliceuse, qui sont approximativement la phase détritique héritée de la roche mère, traduit de fait l'histoire endogène de la roche parentale ; tous les événements, de l'étape sédimentaire au stade actuel, ont laissé leur empreinte, ce qui a permis d'envisager une phase hydrothermale dans l'histoire depuis la sédimentation. La variété et l'importance des métaux est une autre manière d'envisager une origine hydrothermale et leur répartition en montre la complexité. C'est donc l'abondance et la variété des expressions siliceuses qui est le premier indicateur d'événements post-sédimentaires et les premiers travaux de recherche effectués dans cette direction (Miningou) ouvrent la perspective de mécanismes hydrothermaux. Au delà des premières approches dans ce sens par Reichelt, Affaton décrit, à

l'origine de ces silicifications, une tectonique puissante dans le système de la Chaîne du Gourma, favorable à des circulations hydrothermales autres que celles qui ont mobilisé en grand la silice. D'un autre côté la composition des ferruginisations, très tardives dans l'histoire de mise en place du paysage géologique, est typique à la fois, du climat général et local (réactivité spécifique d'un petit corps) et des roches parentales.

4 - Doutes et certitudes

J'ai été confronté à un problème de même nature dans le Centre du Togo au début des années 1980, où des ferruginisations, confondues précédemment avec des cuirasses latéritiques, avaient des caractéristiques morphologiques très particulières faisant la différence dès le terrain. Notons aussi que des prospections d'inventaire des possibilités de minéralisations, réalisées à proximité, avaient retenu l'appellation de brèches ferrugineuses (Lasserre, 1980).

Ces ferruginisations étaient manifestement guidées par la structure régionale méridienne et présentaient des faciès variés dont bréchiques, et les chapeaux de fer étudiés et décrits, n'ont été acceptés comme tels qu'avec la mise en évidence, plusieurs années après, des minéralisations sulfurées et carbonatées. L'importance économique est actuellement en évaluation, 20 ans après le diagnostic de chapeau de fer, refusé alors par tous les spécialistes universitaires et de bureau minier.

Certes à bien des égards la situation de ces affleurements ferrugineux n'est pas identique au Nord Burkina et au Centre Togo, mais en terme d'approche par l'observation et l'étude des matériaux d'altération le champ des perspectives est relativement bien balisé. Il s'agit de roches supergènes produit de l'altération de roches ferrugineuses non silicatées ou de la circulation de fluides à partir de roches ferrugineuses non silicatées. En se référant au schéma très didactique de Butt et Smith (figure 2-1) ces roches ferrugineuses évoquent l'affleurement d'une minéralisation sulfurée ou carbonatée et il s'agit alors d'un *vrai chapeau de fer* ou encore un *faux chapeau de fer* hérité directement de la circulation de fluides minéralisés, rattachés ou non à des minéralisations sulfurées ou carbonatées. Au stade actuel on peut seulement constater qu'il y a eu des mobilisations d'éléments antérieurement aux ferruginisations, avec des silicifications abondantes et de très nombreux éléments anormalement concentrés dans les ferruginisations. S'il est normal de lier l'abondance de la silice et l'abondance de nombreux éléments des ferruginisations, il reste que les autres brèches et les autres roches n'ont pas été étudiées en tant que piège pour les éléments autres que la silice. Soulignons avec insistance que les études ultérieures, en minéralogie et surtout en géochimie ont conforté l'observation avec de fortes anomalies métalliques complexes dont la concentration ne peut être supergène dans un tel milieu altéré.

La dimension régionale n'est pas à négliger car l'extension des observations a montré que le phénomène ne connaissait pas les frontières administratives des Etats concernés : une partie occidentale, au Sud de Toussougou, est maintenant au Mali après les rectifications

frontalières et Kabia jouxte le Niger à l'Est. Notre observation se limite à 150 kilomètres d'Ouest en Est, dans une approche de reconnaissance du phénomène et de son expression pétrographique, minéralogique et géochimique. Il est vraisemblable qu'une réinterprétation des mesures géophysiques anciennes en gravimétrie (Crenn) et en magnétisme (Crenn, Terra Surveys) devrait permettre de fixer une enveloppe régionale plus large encore.

5 - Choix de l'échantillonnage d'orientation

Préalablement à l'interprétation des analyses se posent les alternatives de choix dans l'échantillonnage, soit avec la caractérisation des faciès, soit avec choix du faciès typique ou encore avec la préparation d'un échantillon moyen composite. A cet égard il faut être conscient de la grande variabilité des teneurs des échantillons d'un même chapeau de fer et les résultats obtenus sur une même formation peuvent aboutir à de grandes divergences (exemple de Jabal Sayid en Arabie, tableau 5-5). Dans le problème de l'approche des ferruginisations du Burkina, a été privilégié un balayage régional à partir des faciès.

	minerai		minimum	maximum	moyenne	écart type
Cu	32000	1	70	40000	2400	6900
		2	62	1000	332	271
Pb	2000	1	6	2000	200	600
		2	10	2400	355	600
Zn	13000	1	30	3700	880	900
		2	57	300	160	87
Ag	40	1	0,2	5,8	1	1
		2	0,1	11,2	1,7	2,4
Au	0,7	1	<0,2	8,8	1	2
		2	0,05	12,5	0,6	2,5
As	260	1	4	3000	350	540
		2	10	850	160	70
Sb	15	1	2	24	10	7
		2	30	30	30	
Hg	0,07	1	0,002	0,8	0,07	0,14
		2	0,03	0,19	0,11	0,13
Ba	14	1	40	740	200	190
		2	82	5000	1240	1780
Mo	40	1	2	8	3	2
		2	1,5	300	60	70
Sn	35	1	2	110	20	29
		2	20	300	40	60
Co	100	1	<10	30	20	7
		2	5	5	5	
Ni	13	1	<20	20	15	5
		2	2,5	3	3	
Mn	3000	1	20	4700	330	850
		2	20	45	21	5

Tableau 5-5 - Comparaison de l'étude du chapeau de fer du gîte de sulfures Cu-Zn de Jabal Sayid (Arabie Saoudite)

1 - d'après Ryall et Taylor (1981) n=32 2 - d'après Wilhelm et Kosakévitch (1979) n=24

Dans la phase de reconnaissance, il a été choisi de balayer par l'analyse de très nombreux éléments dans la perspective de poser les jalons de l'exploration d'une région inconnue du point de vue géochimique et métallogénique. C'est pourquoi 58 éléments ont été analysés un peu à l'aveugle, en décalage avec le cadre géologique sédimentaire connu, et c'est également pourquoi la référence à la moyenne de composition de l'écorce terrestre a été utilisée pour la définition des caractéristiques géochimiques et donc des anomalies constatées (Beus et Grigorian). L'essentiel des références de composition de l'écorce provient de Emsley, éventuellement de Wedepohl ou de Beus et Grigorian. Certes le rapport au clark est forcément faussé par le choix de la nature ferrugineuse de tous les échantillons. Néanmoins c'est une approche qui permet de mettre en évidence des tendances générales et des comportements aléatoires ou isolés. La comparaison avec des chapeaux de fer de référence permet d'explorer le même domaine des roches superficielles ferrugineuses, mais le contexte climatique joue de manière très contrastée. Ainsi les références les plus élaborées établies par Ryall et Taylor en Arabie ont un taux de lessivage faible et les chapeaux de fer sont assez peu matures en minéralogie et en géochimie (les alcalino terreux restent là comme des éléments de diagnostic).

Les références acquises au Togo (Blot, Togbé ...), mieux adaptées, posent un autre type de problème dans la mesure où le spectre des éléments analysés n'étaient pas aussi complet avec des limitations analytiques handicapantes pour plusieurs éléments ; par contre les compositions en éléments majeurs médians sont tout à fait comparables, aux spécificités d'origine et d'altération près. Une autre différence tient aussi à la différence de densité d'échantillonnage chaque corps ferrugineux étant représenté par 1 à 4 échantillons au Burkina, dans une superficie de plus de 5000 km², alors qu'au Togo il y a eu plusieurs à plusieurs dizaines d'échantillons par corps affleurant dans un périmètre de moins de 80 km².

6 - Les domaines de confusion possibles

L'hypothèse d'une confusion complète avec les cuirasses latéritiques ne convenait pas à l'observation et les analyses minéralogiques et géochimiques le confirment.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
Pagala	13,25	3,25	69,60	0,30	0,27	0,05	0,07	0,61	0,11	0,32	9,16
Kwademen	7,39	2,26	80,47	0,10	0,06	0,07	0,01	0,18	0,75	0,36	6,44
Perkoa	25,92	2,98	61,68	0,15	0,09	0,11	0,05	0,11	0,25	0,56	6,65
Tin Akof	17,39	2,25	69,90	0,07	0,17	0,23	0	0,04	0,12	0,35	11,14
Gangaol	22,23	19,84	39,25	0,06	0,06	0,01	0	0,06	0,74	0,07	11,66
Laraféla	20,15	17,92	45,95	0,08	0,09	0,11	0,02	0,18	0,60	0,15	11,77

Tableau 5-6 - Comparaison des compositions médianes : 1 - des chapeaux de fer de Pagala (Centre Togo, n=127), 2 - du chapeau de fer de Kwademen (Centre Burkina, n=5), 3 - du chapeau de fer de Perkoa (Centre Burkina, n=10), 4 - des ferruginisations de Tin Akof (n=5), 5 - de la cuirasse de Gangaol (Nord Burkina, n=17), 6 - de la cuirasse de Laraféla (Centre Burkina, n= 32)

La comparaison de composition avec les cuirasses est assez éloquent, à partir des éléments majeurs constitutifs, pour qu'au delà des autres critères de morphologie et de faciès notamment, les ferruginisations soient considérées comme des roches distinctes des cuirasses latéritiques. Bien sûr il existe de nombreuses cuirasses ainsi que des ferruginisations tout à fait particulières à l'intérieur des cuirasses.

Pour les éléments utiles dans les minéralisations sulfurées, nous avons vu plus haut que la caractérisation d'un chapeau de fer "type" ou "moyen" est délicate voire artificielle même en rationalisant les procédures d'échantillonnage. Pour caractériser Tin Akof deux paramètres ont été retenus (moyenne et maximum), alors que pour tous les autres exemples de chapeaux de fer où les minéralisations primaires sont connues, seule la moyenne a été prise en référence. On constate que les ferruginisations du Nord Burkina pourraient tout à fait s'inscrire dans des teneurs du même ordre que beaucoup de chapeaux de fer confirmés. Comme les analyses sont beaucoup plus complètes qu'ailleurs nous verrons plus loin que d'autres éléments indicateurs sont très fortement représentés.

	As	Ba	Co	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Zn
TA1	49	127	39	56	6	68	59	9	340	237
TA2	470	3600	700	300	67	280	650	80	2500	1700
1 Tambo Grande	434	2624	5	338	-	4	493	308	163	76
2 Bodennec	393	126	38	1907	-	5	883	15	48	123
3 Rouez	333	113	5	256	-	7	1593	23	46	116
4 Chizeuil	271	2336	5	850	-	28	171	238	11	3
5 Sain Bel	31	4558	13	216	-	33	300	308	109	40
6 Jabal Sayid	350	200	20	2400	3	15	200	-	-	880
7 Wadi Wassat	40	550	20	17	18	20	6	-	-	16
8 Hadbah	80	360	40	70	200	400	7	-	-	80
9 Salvador 1	121	790	41	607	10	64	260	11	26	3738
10 Salvador 2	218	554	5	229	12	14	2519	35	49	2793
11 Pagala CF3	-	2888	91	55	-	196	-	18	65	4385
12 Pagala CF 81	18	141	49	9	1	174	14	10	73	2739
13 Pagala famille 2	10	1839	1	17	-	8	82	19	66	2423
14 Pagala famille 1	12	290	63	343	-	130	43	19	66	1563
15 Perkoa	820	4200	20	74	19	14	2600	90	177	780

Wilhelm et Kosakevitch (17) : 1-Tambo Grande, 2-Bodennec, 3-Rouez, 4-Chizeuil, 5-Sain Bel

Ryall et Taylor (15) : 6-Jabal Sayid, 7-Wadi Wassat, 8-Hadbah

collection Blot (Brésil) : 9-Salvador1, 10-Salvador2

collection Blot (Togo, Burkina) : 11-Pagala CF3, 12-Pagala CF81, 15-Perkoa

BRGM (Togo) : 13-Pagala famille 2, 14-Pagala famille 1

(-) absence de données

Tableau 5-7 - Teneurs comparées des ferruginisations de Tin Akof (TA1 = moyenne, TA2 = maximum) avec quelques moyennes de teneurs de chapeaux de fer.

Certes d'autres domaines de confusion possible restent, comme des transformations importantes ou non à partir d'une roche ferrugineuse sédimentaire dont la présence est normale dans cette série sédimentaire (Delfour, Reichelt). Certaines roches ferrugineuses, notamment en plaquettes, sont très certainement sédimentaires et leur faible transformation apparente à

l'altération mérite d'être approfondie, car des plaquettes voisines ont de vraies remobilisations de goëthite.

7 - La géochimie des ferruginisations du Bassin de Taoudéni

Par définition le fer est toujours bien représenté puisqu'il s'agit, dans l'ensemble, de roches ferrugineuses. Evidemment aux limites la part du fer est restreinte pour quelques échantillons très siliceux (brèche) ou très micacés (schistes ferruginisés). On remarque que les échantillons les plus riches en fer, relativement aux plus pauvres, sont plus pauvres en métaux précieux et en alcalino terreux (Pd, Pt, Au, Rb, Ca, Mg, Ba, Na, Na, Tl, S, Cr).

Données statistiques des analyses effectuées :

8260 analyses ont été effectués (58 éléments et 2 méthodes pour l'or)

(Eau régale+ICP+ICP-MS et pour Au*, Pt et Pd : Fire Assay+ICP+OES)

6467 analyses au dessus du seuil de détection (78,3 %)

2367 analyses au dessus du clarke utilisé comme référence externe (28,2 %)

parmi lesquelles 1503 sont supérieures à deux fois le clarke (18,2 %)

Les valeurs non mesurables ont été définies comme étant de valeur nulle, ce qui ne modifie que faiblement le calcul des moyennes mais trouble le calcul des médianes. Notons que le tantale n'a jamais été détecté.

L'ensemble de la population des roches ferrugineuses a une teneur de fond peu élevée pour la plupart des éléments, ce qui est assez bien fixé par la médiane de la teneur calculée pour chaque élément.

Ceci peut être nuancé pour les éléments qui ont une médiane supérieure au clarke et qui présentent des teneurs élevées relativement régulières :

Be, V, Co, Zn, As, Mo, Sb, Pb, Bi, Re, Au, U et par définition Fe

Un autre groupe d'éléments présente des médianes plus faibles que le clarke, mais avec une moyenne supérieure au clarke :

Mn, Cu, Se, Cd, Te, Y, Pd et Pt

Un troisième groupe peut être qualifié par une médiane et une moyenne non nulles :

Eléments majeurs, P, S, Cr, Ni, Rb, Sr, Zr, Nb, Sn, Ba, Tl, TR et Th

Enfin la médiane peut être confondue avec la limite de détection pour chacun des éléments concernés, c'est à dire nulle ou quasi nulle :

Li, B, Se, Ag, Cd, In, Te, Cs, Hf, W, Ta, Au, Pt et Pd

Cette distinction montre que fondamentalement les éléments du premier groupe, donne l'ambiance géochimique d'ensemble des ferruginisations, mais n'est pas suffisante pour comprendre l'intégralité de cette population complexe et de diverses natures et origines.

Les éléments ont par ailleurs une plus ou moins forte dispersion qui peut être appréciée par le coefficient de variation (rapport de l'écart type sur la teneur moyenne arithmétique) et des éléments dont la population est plus ou moins homogène, ou la teneur de fond très basse, peuvent être des expressions précises de minéralisations.

Le premier groupe présente une faible dispersion des teneurs (< 100 %) :

P, Mg, Al, Ca, Fe, Ge, Y, Zr, Nb, les TR lourdes et U

Le deuxième groupe est plus dispersé (entre 100 et 200) :

Be, S, Ti, V, Cr, Co, Cu, Zn, Ga, As, Sr, Mo, Ag, Sn, Sb, La, Ce, Hf, Re, Pb, Bi, Th, Hg et Au

Enfin un troisième groupe dont les teneurs sont très dispersées (coefficient de variation > 200). Cette dispersion peut s'expliquer avec des observations simples comme la présence normales de fortes teneurs résiduelles des éléments de schistes plus ou moins ferruginisés (B, K, Rb, Li) ou la présence forte du Mn dans les plaquettes ferro-manganésifères :

B, K, Rb, Cd, In, Te, Ba, Au, Pt, Pd, Tl, Li, Mn, Se, Cs et W

Cette distinction discrimine la dispersion de chaque élément, et en particulier les éléments du premier groupe, où les fortes teneurs sont plus normales plus proches de la définition d'une population unimodale, des autres groupes où les fortes teneurs sont des anomalies plus ponctuelles dans la distribution. Ainsi le fond élevé en U apparaît presque ubiquiste, alors que Sb et les métaux précieux sont typiques de plusieurs associations de significations distinctes.

Enfin la définition de population unimodale ne concerne que peu d'éléments :

Be, Na, Al, P, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr, Mo, Sb, Ba, TR légères, Pb et U

Les études statistiques permettent des interprétations nuancées, mais les calculs de corrélations se heurtent vite aux difficultés de traitement d'une population hétérogène quant à sa composition et probablement à son origine, voire à la spécificité des altérations (par exemple suivant l'acidité du milieu au cours de celles ci).

	détection	nb non dosab	moyenne	écart type	coef variator	médiane	maximum	clarke	> 1 clarke	> 2 clarke
Li	0,5	104	0,28	0,91	320	0	9,78	20	0	0
Be	0,1	0	5,71	5,92	104	3,93	34,20	2,6	92	56
B	1	110	1,10	2,82	257	0	13,05	10	6	0
Na	10	0	147	74	50	130	400	23000	0	0
Mg	100	4	490	302	62	440	1580	23000	0	0
Al	1000	0	5476	3650	67	4325	19150	82000	0	0
P	10	0	688	625	91	509	3866	1000	26	7
S	10	1	237	286	120	142	1743	260	34	13
K	100	14	347	838	241	200	9140	21000	0	0
Ca	100	5	868	800	92	585	4580	41000	0	0
Ti	100	70	179	236	132	50	1016	5600	0	0
V	1	4	332,9	423,0	127	172,7	2540	160	89	48
Cr	1	0	45,7	56,8	124	27,7	531,6	100	14	2
Mn	10	0	1781	11675	655	350	137000	950	25	13
Fe	1000	0	177953	89192	50	168030	480590	41000	137	122
Co	1	0	39,1	66,7	171	23,5	705,7	20	78	35
Ni	1	0	68,7	61,6	90	44,4	283,6	80	41	17
Cu	1	0	55,8	56,4	101	34,9	290,1	50	51	20
Zn	1	0	239,1	309,9	130	120,5	1720	75	97	61
Ga	0,02	4	3,79	7,02	185	1,75	66,73	18	3	1
Ge	0,1	2	0,57	0,37	64	0,49	2,92	1,8	4	0
As	0,1	1	49,45	74,51	151	26,16	472,09	1,5	138	128
Se	0,1	72	0,82	4,54	552	0	43,41	0,05	68	68
Rb	0,1	4	0,82	1,72	210	0,46	18,73	90	0	0
Sr	1	0	9,04	11,32	125	5,13	79,91	370	0	0
Zr	1	0	10,31	4,67	45	9,22	26,15	190	0	0
Nb	0,1	6	0,49	0,38	78	0,38	1,69	20	0	0
Mo	0,1	0	5,78	9,66	167	2,06	66,87	1,5	90	57
Ag	0,05	86	0,048	0,092	193	0	0,534	0,07	29	13
Cd	0,1	88	0,167	0,363	217	0	2,016	0,11	44	24
In	0,02	119	0,008	0,023	293	0	0,144	0,049	8	3
Sn	0,05	36	0,14	0,15	109	0,10	1,02	2,2	0	0
Sb	0,1	0	3,28	5,99	182	1,23	43,14	0,2	140	124
Te	0,02	92	0,04	0,11	258	0	0,76	0,005	48	48
Cs	0,1	123	0,02	0,08	328	0	0,672	3	0	0
Ba	1	0	127,4	346,2	272	38,6	3640	500	6	2
Hf	0,1	102	0,05	0,10	196	0	0,57	5,3	0	0
W	0,2	113	0,25	0,76	311	0	5,98	1	9	6
Re	0,001	44	0,002	0,002	105	0,002	0,009	0,0004	96	96
Tl	0,02	68	0,127	0,462	365	0,020	4,526	0,6	6	4
Pb	1	0	59,4	94,0	158	24,4	645,9	14	92	65
Bi	0,02	44	0,11	0,20	186	0,05	1,40	0,048	72	37
Th	0,1	2	2,1	3,4	165	1,1	27,6	12	4	1
U	0,1	0	5,7	3,9	68	5,0	24,5	2,4	115	74
La	0,1	0	8,0	8,5	107	5,3	60,3	32	3	0
Ce	0,1	0	28,2	32,9	117	18,9	233,9	68	13	4
Nd	0,1	0	19,1	17,1	89	14,5	116,9	38	14	2
Sm	0,1	0	5,6	4,3	77	4,6	22,6	7,9	31	5
Eu	0,1	1	1,4	1,0	74	1,1	5,8	2,1	25	3
Tb	0,1	2	1,0	0,7	72	0,8	4,0	1,1	52	6
Yb	0,1	2	3,0	2,3	74	2,3	12,3	3,3	57	12
Lu	0,1	20	0,4	0,3	79	0,3	1,7	0,51	50	7
Y	0,1	0	35,7	27,0	76	27,6	124,6	30	66	23
Hg*	5	11	30,6	59,2	193	15,3	493,4	50	18	7
Pd**	4	116	1,2	3,1	258	0	21	0,6	24	24
Pt**	5	98	3,5	7,8	223	0	46	1	42	42
Au**	2	57	2,9	4,1	143	2	24	1,1	83	50
Au*	0,2	73	3,0	7,7	259	0	70,3	1,1	59	43

Tableau 5-8 - Caractéristiques analytiques des 140 échantillons de ferruginisations

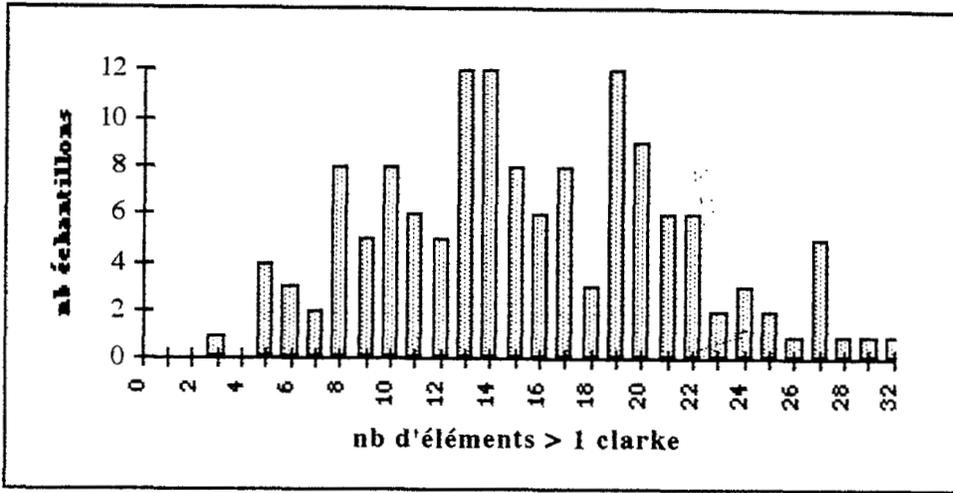


Figure 5-1 - Minéralisation totale des échantillons : nombre d'éléments > 1 clarke

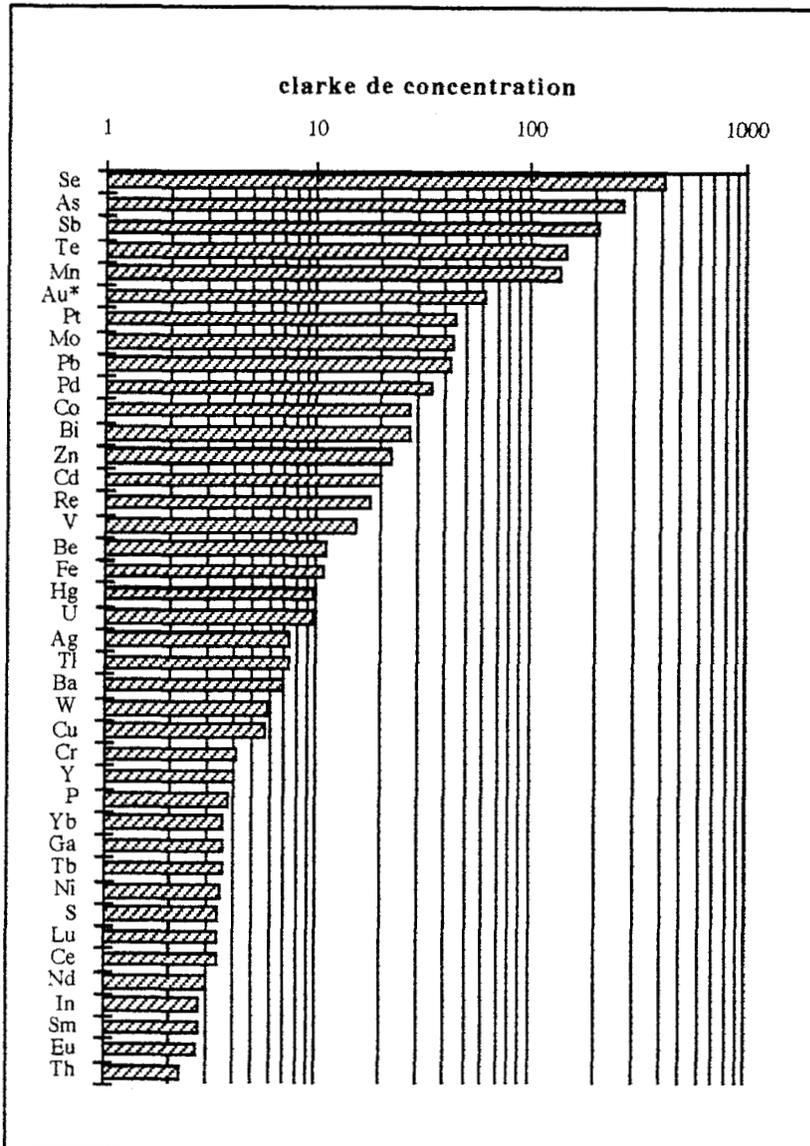
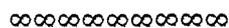


Figure 5-2 - Clarke de concentration des teneurs maximales des éléments ayant des valeurs supérieures à 2 clarkes

En final, de faibles teneurs systématiques signifient une absence intrinsèque ou par lessivage (altération), alors que les teneurs fortes assez systématiquement, comme la famille Be, V, Co, Zn, As, Mo, Sb, Pb ..., donne l'ambiance géochimique spécifique à la région. Entre les deux il y a la place pour des expressions plus localisées, qui, à côté des fortes teneurs systématiques peuvent être issues d'accumulations. Les principaux éléments indicateurs de minéralisation sont diversement représentés et ils seront regardés suivant le cadre de la classification périodique des éléments.

Enfin les échantillons sont assez divers pour qu'on puisse évoquer de 3 à 32 éléments anomaux par échantillon en acceptant la limite du clarke (Beus et Gregorian) et plus de 90 % ont entre 8 et 28 éléments supérieurs au clarke (Figure 5-1).

Tous les éléments ne sont pas représentés de la même manière et les plus fortes anomalies concernent Se, As, Sb et Te d'après le calcul de clarke de concentration de la valeur maximale mesurée (Figure 5-2)).



Les caractéristiques générales des éléments regroupées selon les affinités habituelles des éléments, à partir de la classification périodique des éléments, permettent d'esquisser l'image géochimique d'ensemble des ferruginisations, et, des associations spécifiques ou remarquables. Le rattachement à des modèles de minéralisations connues n'est pas toujours aisé, d'autant que le taux de lessivage des différents éléments est peu connu dans la zone climatique, tandis que leurs roches parentales sont les inconnues fondamentales.

1 - Les alcalins

Les alcalins (Na, K, Li, Rb, Cs) ont des teneurs faibles ou très faibles n'atteignant jamais le clarke, ce qui témoigne d'un lessivage probablement climatique. Ils présentent des corrélations entre eux, associant également Sr et Mn. Le sodium est moins solidaire du groupe des alcalins étant le plus systématiquement lessivé de tous les éléments analysés.

2 - Le béryllium et les alcalino-terreux

Les alcalino-terreux (Ca, Mg, Sr, Ba, Be) ont des comportements fort contrastés suivant les éléments : Ca, Mg et Sr sont très lessivés, alors que Ba, dans l'ensemble faible à très faible, présente quelques teneurs notables, en même temps qu'une forte dispersion des teneurs.

Baryum :

Le baryum est mesurable dans tous les échantillons mais ses teneurs sont faibles à très faibles le plus souvent. Le baryum avec quelques teneurs fortes (6 dépassent 500 ppm) ne présente que peu de corrélations significatives avec les autres éléments en dehors du thallium, et

pas du tout avec les autres alcalino-terreux sauf Sr. Les teneurs les plus fortes sont riches en As, Sb, Mn, Te, Pb, Co, Zn, Cd et pauvres en TR, W, In ...

Son absence de valeurs significatives fortes et fréquentes donne une image originale du type de minéralisation responsable des concentrations observées. C'est en effet un élément indicateur important des gîtes de métaux de base, des gîtes de sulfures massifs volcanogéniques (VMS) et des gîtes Cu-Zn stratiformes. L'alternative est entre un modèle différent de ces gîtes ou dans une autre forme de minéralisation, voire tout simplement une élimination de cet élément dans les altérations de surface, mais ce serait aussi une nouveauté.

Béryllium :

Quant au Be, il apparaît ici comme un élément ubiquiste bien représenté dans l'ensemble des échantillons analysés, avec deux tiers des analyses supérieures au clarke ; de plus ses corrélations significatives sont préférentiellement avec les TR yttriques et le phosphore, mais également avec Zn, Ni et As. La population la plus riche en Be s'accompagne dans le même sens de teneurs plus fortes en As, Se, Sb, Te, Pb, Re, Zn et TR lourdes. En même temps il y a appauvrissement en In, Cr, Ba, Th, Tl, W ... Le béryllium, qui est un élément habituel des pegmatites, conjointement avec les TR, n'est pas interprétable actuellement dans le cadre géologique connu.

3 et 4 - Les groupes de l'aluminium et du titane

Al et les éléments du même groupe (Ga, In et Tl), Ti et ses accompagnateurs Zr et Hf, ont des teneurs très faibles de même que le bore. Les très faibles teneurs en Al et Ti sont à souligner, car elles sont très inhabituelles en milieu cuirassé latéritique, ce qui conforte les ferruginisations comme étant issues d'un autre modèle d'altération que le modèle latéritique.

Le thallium, qui présente de rares anomalies, reste indépendant de son groupe, avec une relation nette entre lui et Ba. L'aluminium et ses satellites In et Ga sont bien corrélés ensemble et présentent les mêmes affinités avec les autres éléments. L'indium, rarement dosable, présente néanmoins de très nettes anomalies, ce qui lui confère une grande dispersion des teneurs. Ses corrélations montrent une forte affinité avec la phase résiduelle de l'altération latéritisante (Al, Ti, Cr, Ga, Zr). Le gallium reste le plus souvent très modestement représenté et ses anomalies sont identiques à celles de In. Le bore est peu représenté dans ce milieu sédimentaire, mais il est noté dans les schistes ferrugineux de Kabia ; il est remarquablement exempt de corrélations avec tous les autres éléments.

5 - Les Terres Rares (lanthanides et yttrium)

On peut noter que, par rapport au clarke, les TR lourdes sont relativement mieux représentées que les TR cériques, tous ces éléments étant fortement corrélés entre eux, ainsi qu'assez systématiquement avec Cu et U.

6 - Le groupe du manganèse

Le manganèse est très diversement représenté, avec des accumulations ponctuelles très fortes qui influencent nettement ses corrélations significatives (alcalins , Ag, Hg et Co). Il est probable que diverses sources sont à l'origine du manganèse. Le Rhénium est proche de sa

limite de détection (supérieure au clarke) et il apparaît fréquemment mais sa teneur ne dépasse pas 10 ppb. Ses corrélations sont essentiellement avec toutes les TR, mais également avec Pb, As et U.

7 - Le groupe du vanadium

Le groupe V-Nb-Ta a un comportement fort différencié, Ta n'étant jamais dosable et Nb restant toujours inférieur à 2 ppm, alors que le vanadium est très élevé, dépassant fréquemment 500 ppm. Néanmoins V et Nb sont bien corrélés entre eux ainsi qu'avec les éléments atmosphériques Al, Ti et leurs accompagnateurs. Seule la corrélation V - Mo est spécifique.

L'abondance du vanadium est nette, et semble appartenir à au moins deux domaines forts distincts, le domaine des altérations et cuirasses latéritiques soulignés aussi par des corrélations significatives, un domaine de liaison avec beaucoup d'autres éléments (seul le Mo apparaît par le calcul du coefficient de corrélation) définissant bien une double origine possible hydrothermale ou bio-sédimentaire.

8 - Le groupe du chrome

Du groupe Cr-Mo-W, seul le molybdène est bien exprimé et anormalique puisque près de la moitié des échantillons a une teneur supérieure à 3 ppm, et 15 % supérieurs à 10 ppm. Les corrélations de ses éléments sont indépendantes, Cr étant proche du groupe Ti-Al et fortement corrélé avec Te, In, Bi et Ga, alors que le molybdène est proche du groupe Cu-V-U. Le tungstène est en général très faible et 6 % des teneurs atteignent et dépassent 1 ppm. W est par ailleurs exclusivement corrélé avec Ge.

9 - Le phosphore

Dans son ensemble le phosphore reste un élément mineur, corrélé avec de nombreux éléments, mais comme il n'a aucune corrélation avec Ca on peut penser qu'il est probablement secondaire. Les principales corrélations sont avec Be, Tl, Ba, Mn et Fe. Le phosphore dépasse le clarke dans près de 20 % des échantillons.

10 - Les actinides

Les actinides sont très différents, les teneurs en Th restant toujours faibles, alors que, celles en uranium sont bien marquées (plus de 70 % des échantillons dépassent 5 ppm). Si ces deux éléments sont bien liés à As et Sb, ubiquistes, U est plus particulièrement lié à Cu et aux TR.

11- Les éléments chalcophiles minéralisateurs

Des éléments chalcophiles minéralisateurs, il ne reste pas grand chose du soufre dans les terrains altérés affleurants étudiés ici, et il est plus lié aux éléments lessivés, notamment alcalino-terreux qu'aux autres. Par contre Se et Te sont relativement bien représentés, avec notamment des teneurs exceptionnellement fortes en sélénium, et, de toute façon des anomalies nettes pour ces deux éléments. Se est bien corrélé avec Th, et Te avec In, Cr, Sn, Ga et Bi.

12 - Le groupe de l'arsenic

Le groupe As-Sb-Bi est celui qui est le plus typique des échantillons analysés, avec surtout des valeurs fortes pour As et Sb. 18 % des échantillons contiennent plus de 5 ppm de

Sb, et le tiers plus de 50 ppm d'arsenic. As et Sb sont bien corrélés entre eux et avec les métaux de base Pb, Cu, Zn, Ni, mais pas du tout avec le cobalt qui a une place à part. Le bismuth a un comportement très différent, étant bien lié à l'ensemble Cr-Ti-Al et présentant ses meilleures corrélations avec In, Ga et Te.

13 - Le groupe du plomb

Le plomb se distingue de ses accompagnateurs traditionnels, Ge qui ne présente que peu d'anomalies, et Sn pas du tout. 45 % des échantillons ont plus de 30 ppm de Pb, et 18 % plus de 100 ppm. Pb est surtout lié à Sb et As mais également aux autres éléments principaux dont Zn, Cd, Hg, Ni et Cu. Sn est assez proche des affinités du bismuth, tandis que Ge est surtout proche du tungstène.

14 - Le groupe du zinc

Le zinc est partout bien représenté avec une moyenne de 230 ppm. Ses accompagnateurs habituels, Cd et Hg, tout en présentant des teneurs variées, ne sont pas systématiquement élevés, tout en gardant des corrélations significatives avec le zinc. Zn est bien corrélé avec les éléments les mieux représentés comme Ni, Pb, As, Sb et Cd.

15 - Le groupe du cuivre

Tous les éléments de ce groupe présentent des teneurs élevées à côté de teneurs nulles. Le cuivre a des teneurs plus faibles que le zinc avec une teneur moyenne de 56 ppm et apparaît plus lié à l'uranium qu'à ses compagnons habituels, Ag et Au. Cependant Cu et Ag sont bien corrélés ensemble et avec Co et Mo. L'or n'est corrélé vraiment qu'avec le palladium.

Les deux méthodes de dosage de l'or (* Eau régale+ICP+ICP-MS et Fire Assay+ICP+OES) ne se recoupent que rarement, mais en final plus de 30 % des échantillons présentent des teneurs supérieures à deux fois le clarke, avec les deux types de dosage. Une seule batée expédiée a été effectuée montrant 6 petits points d'or dans des alluvions à proximité de ferruginisations (14° 53' 22" N - 00° 10' 36" W) dont certains échantillons ont des teneurs mesurables (AB 21 = 6,1 ppb).

La répartition des teneurs en or montre quelques associations qui semblent privilégiées, toujours avec As et Sb, mais aussi le plus souvent avec U et Mo. Le cuivre n'est pas particulièrement bien représenté avec l'or, alors que Pb, Zn et Co sont beaucoup plus fréquents. L'argent comme le nickel ne marquent qu'un tiers des échantillons anormaux en or (> 2 clarkes).

16 - Le groupe du fer

La triade du fer est, bien entendu, dominée par la nature ferrugineuse du matériel analysé, mais Co et Ni sont bien représentés avec de fréquentes anomalies, associées ou dissociées. Le fer et le nickel présentent beaucoup de corrélations communes (Zn, As, Cd, Pb, Sb, Co ...). Co est préférentiellement lié à Mn, Li, Rb et K, mais également à Ag et Hg.

17 - Les métaux précieux

Les métaux précieux (Au, Pt et Pd) sont globalement corrélés entre eux et présentent quelques teneurs notables. En outre, Au est assez bien corrélé à Mo, Pt à Cu et Mo, et Pd à Zn.

La signature des platinoïdes est assez étonnante pour le contexte géologique supposé initialement strictement sédimentaire. Il y a de nettes valeurs conservées dans les ferruginisations, sans relation évidente avec les autres éléments (les coefficients de corrélation ne sont pas significatifs). En prenant seulement en compte la population présentant une somme $Pt + Pd \geq 10$ ppb, qui représente 16 % de la population totale, nous nous plaçons loin des teneurs des formations primaires minéralisées mais dans une gamme satisfaisant aux indications de la prospection de matériaux de surface. Plusieurs types d'associations géochimiques accompagnent les platinoïdes, As et Sb étant toujours très nettement anormaux :

Au-Co-Zn-Pb-Mo-(Cu)-As-Sb

As-Mo-Sb-(Cu)

Au-As-Sb

As-Sb avec platine seul sans palladium

8 - Les associations métallogéniques remarquables

Suivant la nature des minéralisations métalliques, en général sulfurées, un certain nombre d'éléments associés caractérise le milieu parental. Ceci a bien été défini par Andrews-Jones et développé par d'autres. Ici nous nous référerons aux associations typiques de certaines minéralisations hydrothermales et sédimentaires, et leur expression dans les chapeaux de fer, d'après Levinson pour les associations sulfurées (1 à 10) et d'après Ryall et Taylor pour les associations de sulfures oxydés (11 à 15). Cependant les éléments de diagnostic des chapeaux de fer d'Arabie (Ryall et Taylor) ont un comportement qui est très différent de ce qui se passe dans la zone climatique tropicale, et notamment dans le Nord Burkina, ce qui en limite l'application directe.

Avec ces premières analyses d'orientation, il peut être évoqué globalement des milieux géochimiques proches de ceux des *gîtes sulfurés hydrothermaux* et du *milieu sédimentaire des schistes noirs* (figure 5-9).

La présence forte de As et Sb, qui est vraiment la caractéristique des ferruginisations se retrouve dans les minéralisations sulfurées hydrothermales, notamment les *sulfures complexes* et les *sulfures de basse température*, et dans les *schistes noirs*. Dans la zone oxydée que sont les chapeaux de fer la prédominance As-Sb est plus typique des *VMS*, des *Cu-Zn stratiformes*, et des *gîtes de métaux précieux*.

Suivant une pondération des teneurs par le clarke de concentration, les associations géochimiques des 140 échantillons du Nord Burkina, sont nettement plus proches d'une association de type "*sulfures de basse température*" que des autres associations. En deuxième position l'association de type "*métaux précieux*" est nette pour 10 % des échantillons, ce qui est troublant quand on ne prend en compte que l'ensemble sédimentaire établi.

1 - Sulfures hydrothermaux : association générale	Levinson
2 - Porphyry copper	Levinson
3 - Sulfures complexes	Levinson
4 - Sulfures de basse température	Levinson
5 - Gîtes métaux de base	Levinson
6 - Métaux précieux 1	Levinson
7 - Métaux précieux 2	Levinson
8 - Minéralisation hydrothermale de roches basiques	Levinson
9 - Black pérites	Levinson
10 - Phosphorites	Levinson
11 - Gossans volcanogenic massive sulphide	Ryall et Taylor
12 - Gossan Cu-Zn stratiforme	Ryall et Taylor
13 - Gossan métaux précieux	Ryall et Taylor
14 - Gossan UB Ni-Cu	Ryall et Taylor
15 - Gossan de skarn	Ryall et Taylor

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ag	Cu	Ag	As	Ba	Ag	Ag	Co	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag	As	Ag
As	Mo	As	Bi	Cd	As	Au	Cu	As	Mo	As	As	As	Co	Ca
Au		Cd	Sb	Pb	Au	Hg	Ni	Au	Ni	Au	Ba	Au	Cu	Cu
Bi		Hg		Zn	Co	Te	Pt	Bi	Pb	Ba	Ca	Ba	Fe	Fe
Cd		Pb			Cu			Cd	RE	Bi	Cu	Bi	In	Hg
Co		Sb						Cu	U	Cl	Fe	Cu	Mn	Mn
Cu		Se						Mo	V	Co	Hg	Fe	Ni	Mo
Hg		Zn						Ni		Cu	Mn	Hg	Pt	Pb
Mo								Pb		Fe	P	Pb	S	S
Ni								Sb		Hg	Pb	Sb		Sn
Pb								U		Mn	S	Se		W
Sb								V		Mo	Sb	Te		Zn
Se								Zn		Ni	Zn	Zn		
Te										P				
U										Pb				
V										S				
Zn										Sb				
										Se				
										Sn				

Tableau 5-9 - Les associations géochimiques caractéristiques de types de minéralisation

Suivant les associations définies en Arabie par Ryall et Taylor, la majorité des échantillons s'apparente à une association de type "métaux précieux" devant l'association typique des "Zn-Cu stratiformes". Mais attention ces références ont été établies en climat désertique, donc avec des altérations peu évoluées. Cependant l'absence de baryum, notoire dans quasi tout l'échantillonnage, pourrait biaiser le diagnostic. Notons en même temps que le S est un élément diagnostic en Arabie alors que les minéraux d'altération porteurs habituels (alunite, jarosite ...) sont inconnus dans les altérations très fortes, très matures, bref typiques de la zone tropicale, et réservés alors aux milieux confinés (mangroves par exemple).

9 - Conclusions

Les éléments qui caractérisent le mieux les roches ferrugineuses de cette partie du Bassin de Taoudéni sont ceux qui ont des teneurs toujours fortes (As, Sb, Zn, Be, Pb ...), avec d'autres éléments présentant de fortes teneurs ponctuelles diversement réparties (Mn, Se, Ni, Co, Mo, Au, Pt ...). Cependant les corrélations y sont difficilement interprétables et l'analyse factorielle montre qu'un même élément peut s'engager dans différents types d'association avec les autres éléments.

Les indices de minéralisations que sont les ferruginisations s'inscrivent tout d'abord dans une série de couverture d'âge Protérozoïque supérieur. L'extension des indices, distincts des intercalations syn-sédimentaires ferrugineuses ou ferro-manganésifères, suggère une préconcentration liée à la couverture dont les séries sont dominées par des roches clastiques et chimiques (plus ou moins biologiques). Les principales formations sont des conglomérats, des grès, des roches argileuses (pélites, schistes), des roches carbonatées (calcaires et dolomies éventuellement algaires) et des roches siliceuses (silexites).

Le deuxième déterminant dans la genèse et la répartition des anomalies tient au fait de l'orogénie panafricaine de la Chaîne du Gourma, qui a engendré des accidents de grande ampleur, avec notamment des brèches sur toute l'étendue du Nord Burkina et le développement de silicifications liées à cette tectonique. Les brèches n'apparaissent minéralisées que par leurs éléments de silexite très abondants : la pyrite fine est le plus souvent disséminée et particulièrement développée dans les silexites saines, noires, jaspoïdes (grain très fin).



Cette étude reste une étude d'orientation sur les caractéristiques de quelques ferruginisations de la partie Nord du Burkina, dans le Bassin de Taoudéni. Apparemment ces ferruginisations ont des caractéristiques voisines de chapeaux de fer, mais sans qu'il soit possible d'aller au delà. S'agissant d'une approche d'orientation, et les itinéraires ayant été développés depuis, on peut dire que ces caractéristiques affectent tout le Nord d'origine sédimentaire et s'étendent au delà tant au Niger qu'au Mali. Il est net que les formations sédimentaires ont été affectées par une tectonique importante, accompagnée de manifestations hydrothermales s'exprimant, dans l'état des connaissances actuelles, par des silicifications très nombreuses et par la concentration d'éléments. Les ferruginisations surlignent ces concentrations complexes et variées et sont en quelque sorte la trace directe de minéralisations soupçonnées d'origine sulfurée. Les investigations sont trop sommaires pour des conclusions plus précises car tectonique et hydrothermalisme sont des notions nouvelles dans ce contexte et la signification exacte des ferruginisations reste pour une part fort hypothétique.

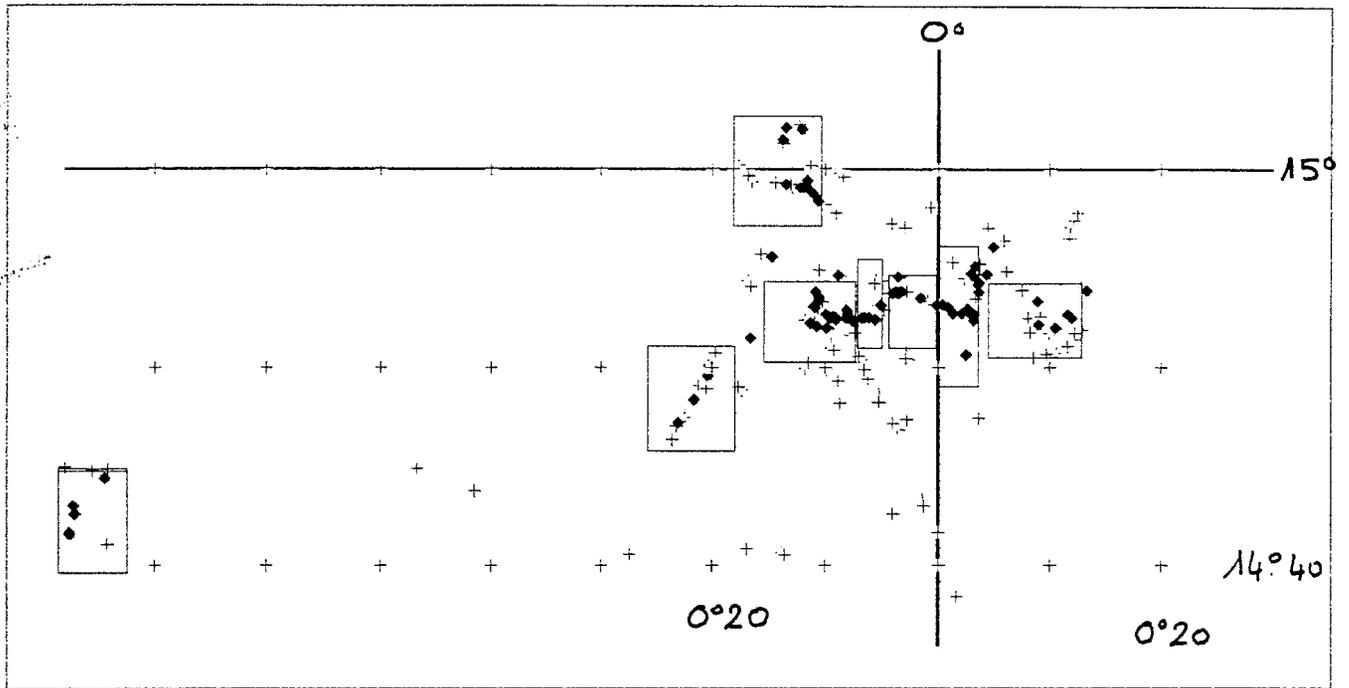
Cependant il apparaît avec force que cette partie du Bassin de Taoudéni, impliquée dans l'orogénie de la Chaîne du Gourma, présente de nombreux signes de concentrations d'éléments

non connus depuis les prospections antérieures du CEA, de la DGM et du PNUD. La cartographie des indices, outre les matériaux carbonatés qui affleurent sur des dizaines de kilomètres, n'avait retenu que le Zn à In Tangoum et Kabia, le Cu-Mo-U à la mare de Soum et l'U à Gountouré Kiri. Aujourd'hui il est possible d'affirmer qu'il y a plusieurs centaines d'indices comparables, beaucoup plus complexes, où les métaux détectés précédemment sont confirmés mais où d'autres apparaissent. Seulement une partie des corps ferrugineux a été analysé, les itinéraires ultérieurs en ayant observé d'autres, et les 140 analyses effectuées représentent un balayage permettant d'établir les domaines géochimiques qui devraient caractériser la région, sédimentaire, tectonisée avec des événements hydrothermaux.

Il est important de préciser maintenant les mécanismes qui aboutissent, préalablement aux altérations ferruginisantes, à la répartition des éléments et à leur concentration. Un DEA vient d'être soutenu (Mariette Miningou : Nature et place des silicifications dans les formations sédimentaires de la région de Tin Akof, Dakar, 2001), il est prévu d'approfondir la démarche dans le cadre d'une recherche doctorale.

Par ailleurs l'application au domaine de la prospection minière est tout juste ébauchée par des reconnaissances de terrain et quelques investigations géophysiques. Ceci permet de proposer que soient immédiatement réalisés des forages pour évaluer la nature de l'enracinement et de l'encaissant d'un affleurement ferrugineux, qui est souligné par des terrains conducteurs en électrique et électromagnétisme, à faible profondeur (< 50 mètres).

Actuellement le meilleurs guide de localisation des corps ferrugineux est la présence de brèches, qui sont le plus souvent siliceuses, et dans lesquelles les ferruginisations supergènes s'expriment apparemment quand les conditions endogènes sont remplies (présence supposée de sulfures). Dans le paysage ces formations affleurent largement entre les vastes cordons dunaires fixés, et correspondent bien alors avec la formation Y2ab de Delfour et Jeambrun, mais également au nord du Béli, toujours sur la feuille de l'Oudalan, et, plus au sud sur la feuille de Djibo. Notons que la brousse tigrée, d'accès si pénible et difficile, est le siège privilégié des brèches dont l'extension E-W et N-S est considérable (observations de M. Miningou et A.G. Nébié).



Z 6 (9)

Z 2 (27) - Z 1 (12)

Z 4 (26) - Z 3 (9)

Z 5 (32)

Z 7 (11)

Z 8 (11)

Figure 5-3 - Affleurements ferrugineux analysés regroupés en 8 zones (140 analyses)

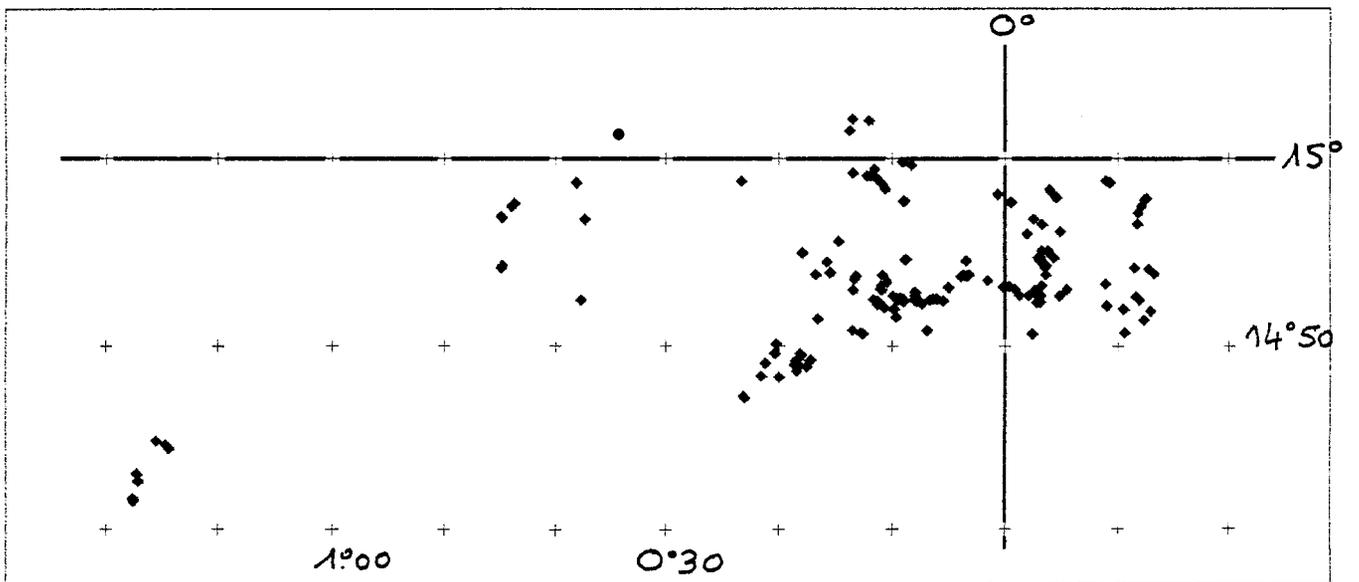


Figure 5-4 - Affleurements ferrugineux reconnus(250)

VI - ENSEIGNEMENTS ET PROPOSITIONS POUR LA SUITE

Quand, en 1996, j'ai lancé l'idée de développer une recherche sur la méthodologie de la prospection et la diversification de la ressource il n'était pas nécessaire d'être prophète pour envisager que l'or ne serait pas toujours à ses hauts plafonds spéculatifs, avec le plein emploi des géologues. En tenant compte de l'existant il semblait important d'explorer d'autres potentialités dans les formations anciennes sans exclusive, aussi bien pour ce qui concerne les cibles que pour l'avenir de la profession dans ces pays où la profession est jeune, sans culture géologique ancrée. Car globalement les multitudes de recherches d'or, vraies ou supposées, depuis plus de 15 ans en Afrique de l'ouest, appuyées sur la synthèse de Milési et al, n'ont pas apporté la ressource escomptée pour la plupart des pays, dont le Burkina, le Mali étant l'exception. Ce fort investissement relatif sur la recherche minière, ciblé sur l'or, n'a pas beaucoup amélioré la connaissance permettant d'envisager d'autres orientations et relativement peu de travaux d'investigation scientifique ont été initiés durant cette période faste. Rares sont les sociétés qui se sont réorientées vers d'autres types de ressources possibles, rares sont les apports à la communauté des géologues. Les formations volcano-sédimentaires du Birimien restent peu connues quant à leur potentialité réelle et les méthodologies de prospection ne semblent pas avoir beaucoup progressé malgré la mise en œuvre d'un arsenal analytique puissant souvent multi-élémentaire, et des capacités de détection très fines.

L'originalité d'approche dans ce programme de recherche était d'introduire les connaissances acquises depuis fort longtemps en géologie supergène de la zone intertropicale, et qui sont restées hors des domaines d'application, à l'exception de l'élément-minéral qu'est l'or, ce qui fait revenir au constat initial. Ces acquis méritent une adaptation à des fins de diagnostics plus directement liés aux minéralisations, des métaux de base par exemple, qu'à l'ambiance géochimique constitutionnelle des formations existantes. Les approches tiennent compte de ce qui était bien établi dès le début des années 1980 pour les altérations climatiques des roches et des connaissances acquises ou nouvelles sur l'altération des minéralisations sulfurées et carbonatées.

1 - Géologie supergène

La difficile prise en compte des phénomènes d'altération météorique reste l'écueil à une meilleure approche dans les prospections.

Avec les affleurements de roches, les premiers pièges de l'altération sont de générer des couleurs différentes de celles des roches saines et de modifier les organisations texturales. Ceci est net dans les formations du Birimien où les couleurs vertes sont fréquemment dues à des minéraux verts comme les chlorites et les épidotes, dont l'origine supergène est banale à partir des micas, des amphiboles, des pyroxènes et des plagioclases (Wackermann, Pion). Aussi

l'appellation de roches vertes mérite t'elle toujours d'être précisée et sa signification justifiée. De même l'organisation orientée, débouchant sur l'appellation de "schistes", n'est fréquemment qu'une des formes de la déstructuration de roches d'origine magmatique, ce que Wackermann retenait comme pseudo-schistes avec comme conséquence diagnostique les appellations de paléo-gabbros ou paléo-basaltes par exemple pour les cas étudiés au Sénégal. Toutes les recherches sur les altérations supergènes, notamment en Afrique tropicale, ont permis de faire prendre en compte à côté des argiles et des oxyhydroxydes, de nombreux minéraux néogénétiques, reflétant des conditions de basses températures et de basses pressions, les chlorites, épidotes, albites et quartz par exemple peuvent traduire le milieu supergène.

Avec les vieilles altérations profondes il faut garder à l'esprit que les recherches spécifiques, des années 1960 à 1980, avaient introduit la définition du "manteau d'altération" dont les descriptions sont nombreuses, sous différents climats, avec pratiquement tous les grandes familles de roches. Mais beaucoup des enseignements acquis alors n'ont pas été intégrés comme spécifiques du fait climatique pour l'interprétation des observations en cartographie et prospection. D'autres concepts ont été introduits depuis, notamment par les prospecteurs australiens, comme l'importation du mot "regolith", qui de fait n'apporte rien de nouveau car il ne définit pas mieux l'ampleur des transformations supergènes en Afrique de l'Ouest, en restant plus vague et plus imprécis que les structurations reconnues dans le manteau d'altération. Il est vrai que l'ensemble régional, sous-continentale, est peut être un grand ensemble unique au monde, malgré toutes les équivalences de mécanismes, d'intensité, de résultantes (mêmes roches supergènes) avec d'autres régions du monde en Amérique latine, en Asie et en Australie.

Cependant l'application des résultats des études sur les altérations à la prospection minière n'a jamais été vraiment un objectif précis et est restée dans les généralités concernant le rattachement direct ou non aux roches. Ainsi il a pu être montré que des éléments ou des minéraux restaient les mémoires géochimiques et minéralogiques des roches parentales à travers le manteau des altérations contemporaines ou anciennes (Blot, Leprun, Pion, Wackermann ...). Cependant les correspondances établies sont restées au niveau des grandes familles de roches qui conservent une image superficielle de contraste. Dans le fil de mes recherches antérieures sur l'altération comparée de massifs de granites et de leurs enclaves, j'ai pris le parti de considérer les corps minéralisés comme des enclaves. Par enclave il est raisonnable d'en souligner la spécificité des altérations par rapport à celles de l'encaissant, avec le maintien de mémoires spécifiques aussi bien pour les minéraux résiduels et néogénétiques que pour les éléments évacués ou conservés sur place. Mais les corps sulfurés sont des enclaves d'un type tout à fait particulier de par l'extraordinaire réactivité des minéraux aux agents d'altération, générant des facteurs d'agression peu étudiés dans la zone climatique. Un seul produit final de l'altération des roches sulfurées, ou carbonatées ferrifères est bien connu dans toutes les régions minières du monde, le chapeau de fer. Il est nécessaire d'insister sur le rôle et le devenir des sulfures au cours des altérations, qui telle la pyrite, même dispersée, même dans le climat peu

favorable à l'altération, comme le climat montagnard de France, déstabilise toute une formation lors de l'altération, avec des dissolutions et des néogénèses (Van Oort et Robert). Le passage aux échelles de fortes concentrations de sulfures et d'intense altération climatique n'est pas très bien défini, mais est sans commune mesure avec l'exemple traité par Van Oort, mettant alors en jeu des capacités d'agression considérables et une intense activité de lessivage. Quoiqu'il en soit le seul fait d'envisager les minéralisations comme des enclaves, permet d'orienter vers la recherche des mémoires spécifiques susceptibles d'être conservées à travers l'altération des sulfures doublée de l'altération latéritique. Je pense que le phénomène le plus typique dans l'altération des gîtes sulfurés, est la formation de minéraux oxyhydroxydés de fer, à toutes les étapes de l'altération, piégeant d'une façon peu réversible divers éléments métalliques libérés. Les argiles, quand elles sont notables, proviennent davantage de l'altération de l'encaissant et surtout d'altérations antérieures hydrothermales. C'est pourquoi il semble que la mémoire la plus directe est conservée par les hématites et surtout goëthites typiques des chapeaux de fer, mais qui se mettent en place très vite en fonction de l'altérabilité des divers sulfures en présence dans le gîte (les sulfures s'altèrent dans l'ordre de leur richesse décroissante en fer et ainsi la galène est le dernier sulfure altéré dans un gîte polymétallique).

La morphologie des minéraux primaires est notamment relativement bien conservée après leur hydrolyse et le remplacement par des formes oxydées de fer et il en est souvent de même avec les minéraux secondaires (sulfates et carbonates) : c'est la conservation relative de cette texture qui a permis le plus d'utilisation des chapeaux de fer comme indicateurs de minerai, de type de minerai, par les écoles pragmatiques du début des investigations sur l'utilisation des chapeaux de fer en prospection. Bien entendu à côté du simple remplacement pseudomorphique existe de nombreuses cristallisations plus indépendantes du point de vue textural, mais toujours capables de piéger les métaux libérés par l'hydrolyse des minéraux primaires et secondaires. Il est possible ainsi de distinguer dans l'étude de l'altération d'un gîte minéralisé, plusieurs générations de goëthites, piégeant un ou plusieurs métaux, selon diverses modalités. Les textures plus ou moins bien conservées et l'importance des autres formes néogénétiques de goëthite, ont une incidence directe sur les faciès des roches ferrugineuses qui constituent littéralement les chapeaux de fer.

En final la morphologie de l'affleurement permet d'évoquer la trace superficielle de la minéralisation, dont l'image classique est le filon, ce qui avait beaucoup marqué les mineurs au XIX^{ème} siècle. Mais toutes les relations géométriques sont possibles entre une minéralisation et la surface du sol et il est important de ne pas rester mécanistes, d'abord parce que les dimensions ne sont pas infinies, ensuite parce qu'il peut y avoir des équivalences latérales dans les faciès et les compositions et surtout parce que l'exposition à l'altération est dépendante d'un grand nombre de facteurs de différentes natures (Smirnov).

J'ai introduit une tentative d'interprétation de l'observation de blocs ferrugineux plus ou moins dispersés en surface du sol ou dans des cuirasses, avec le concept de paléo-chapeau de fer qu'il aurait été intéressant de valider, ou d'écarter, à partir des références des chapeaux de fer

établis à Perkoa et Kwademen. Avec un moindre intérêt immédiat cette observation est plus large que celle de ces deux sites, comme à Rissian(Kongoussi) où des minéralisations se manifestent ainsi dans la cuirasse, avec des équivalents interstratifiés dans les "schistes" sous la cuirasse. Cette appellation a bien été reprise à Bonga (Lavaud) mais il n'y a pas sur ce site les conditions nécessaires pour une étude comparée avec le chapeau de fer en place et identifié. Cette recherche aurait permis je crois de reconsidérer certaines approches dans la prospection des métaux, notamment dans le Birimien, en valorisant l'observation sur le terrain et l'établissement justifiée de cibles en fonction du degré d'observation et d'analyse.

A bien des égards l'approche géomorphologique encore actuellement largement retenue (Petit), est en déphasage par rapport à la recherche d'indices directs de minéralisations, qui repose sur l'observation d'une dépendance des matériaux de surface, chapeaux de fer compris, par rapport à ce qui se situe dessous. Entendons bien cependant que comme les *roches mères* *ss* n'existent plus ce qui est très important pour les enclaves incluses dans des formations plus vastes, corps minéralisés compris, le modèle ne peut être calé que sur une roche équivalente.

Il reste donc dans l'approche des phénomènes superficiels beaucoup de voies à explorer pour la compréhension d'abord et pour l'application ensuite. Les progrès déterminants ne seront apportés que si un gîte est mis en exploitation ou en exploration poussée, car les modèles d'altération des minéralisations sulfurées restent succincts en Afrique de l'Ouest. Dans ce qui a été regardé au Burkina, ce pourrait être un objectif de recherches à Perkoa et Kwademen et vraisemblablement aussi, hors des zones parcourues, à Tiébélé.

Par rapport à l'histoire des prospections de ressources nouvelles, c'est l'observation qui est déterminante et apporte les éléments d'argumentation régionaux et locaux essentiellement à partir des affleurements rocheux, et c'est à partir de l'observation des produits d'altération que peut être déterminée la présence d'indices de minéralisations.

Le problème récurrent est que l'observation des produits de l'altération supergène, tous les affleurements de roches ferrugineuses par exemple, n'est pratiquement jamais une technique de prospection. La prospection aveugle des échantillons suivant tous les types de prospection géochimique sur sols et sédiments ne peut apporter l'argument de l'observation.

2 - Méthodologies de la prospection

Si les connaissances générées à partir des analyses pétrographiques et structurales autorisent à définir des cadres géodynamiques favorables à l'expression de minéralisations il n'en reste pas moins important que des indices de minéralisations soient mis à jour pour en justifier l'intérêt. Si les cadres géodynamiques sont une vérité à un moment donné de l'état des

connaissances, l'histoire de la géologie montre qu'il y a presque toujours un choix dans les arguments dépendant éventuellement d'écoles voire de modes.

Par contre l'indice est un fait établi par l'observation ou la mesure, la minéralogie ou la géochimie définissant en elles même l'indice, dont l'interprétation sera un des enjeux de la vérité géodynamique du moment.

Le thème "méthodologie de la prospection" est inscrit dans le programme développé au Burkina et est un autre des leitmotiv où je pense que l'approfondissement de la connaissance se doit de justifier les choix qui sont faits, retenus et développés par les prospecteurs. Si la recherche minière s'est orientée vers des méthodes "aveugles" (recherche d'indices indirects ou non affleurants), c'est que le milieu de surface efface en grande partie les éléments diagnostics habituels, minéralogiques notamment. Mais les résultats des recherches sur les altérations supergènes sont peu intégrées et les conclusions ont été vite oubliées sans que les méthodes n'aient été adoptées. Gardons les conclusions simples qui ont permis de définir la spécificité des altérations, et au delà, des cuirasses latéritiques, par rapport à la roche.

De fait, si on considère le gîte minéralisé comme une roche particulière, il y a tout lieu de croire qu'il donnera des produits d'altération spécifiques qui sont bien connus, contrastés par rapport à l'encaissant, ce qui a été détaillé au chapitre III. Le programme a été un bon terrain d'expérimentation où l'initiative est au géologue qui parcourt et étudie le terrain à base d'observations et de mesures. Ce peut être la revanche de l'observation si les géologues intègrent les roches supergènes y compris les cuirasses à leur domaine de compétence.

Et donc à partir des recherches antérieures et des observations et analyses effectuées dans le cadre du programme j'estime que les différents marqueurs d'une minéralisation au cours des altérations profondes et intenses, se déclinent autour des minéraux supergènes de fer et de leur association en roches ferrugineuses, roches et minéraux s'inscrivant dans des processus bien définis de filiations. Le climat tropical n'échappe pas à cette loi commune dans laquelle les seules phases intermédiaires ont de fortes probabilité d'en pâtir, et de passer inaperçues ou d'être purement et simplement éliminées dans l'exacerbation du fait climatique.

En effet le bilan des méthodes "aveugles" est globalement peu satisfaisant dans toute l'Afrique francophone, les succès sont très limités et sur l'ensemble des terrains parcourus, nous n'avons pas connaissance d'un résultat significatif ayant débouché sur une exploitation. La base des méthodes aveugles est la prospection géochimique sur prise de sol sans intégrer les connaissances acquises en géologie de surface et en introduisant fréquemment des biais (sélection granulométrique en particulier, élimination des éléments ferrugineux). Tout d'abord comme cela a été dit plus haut, il n'y a pas de logique à chercher les signaux de minéralisation à partir des argiles qui sont rarement typiques de minéralisations sulfurées. Dans l'altération des corps sulfurés, ce qui se forme le plus vite et qui se conserve le plus longtemps est

l'oxyhydroxyde de fer, qui est en même temps un bon piège pour toutes sortes d'éléments indicateurs ou caractéristiques. La conséquence du choix de la prospection aveugle est qu'avec des cibles aussi indirectes que les argiles, il y a eu des interprétations peu utiles pour l'objectif, des déductions non conformes à la réalité du terrain (surestimation du facteur transport, hésitations sur le choix de seuils d'anomalies, acceptation sans critique des résultats analytiques).

Dans les formations à potentialité reconnue, les formations volcano sédimentaires, il y aurait très probablement à remettre les techniques d'observation au goût du jour, en y introduisant les roches ferrugineuses. Il est sûr aussi que si cette approche ne permet pas de fixer le cadre géodynamique, elle permet néanmoins d'esquisser une morphologie de la trace et d'orienter la définition du milieu géochimique d'origine. Suivant cette démarche, l'intérêt métallogénique de Perkoa, Kwademen et Tiébélé aurait pu très bien être mis en évidence sans prospection géochimique préalable.

Plus grave encore est le fait que les objectifs assignés aux prospections ont souvent couvert une hypothèse de type de gisement à rechercher sans que la connaissance régionale acquise en géologie ne le justifiait vraiment : pendant 20 ans le cuivre a été ainsi privilégié à la recherche d'hypothétiques "porphyry copper". Ceci succédait d'ailleurs à l'obligation qu'avaient eu les géologues de l'immédiat après-guerre, de cartographier du Tarkwaïen partout sur le territoire de l'ex-AOF. Alors mes investigations séméiologiques sans bride théorique sur la bordure du Bassin des Volta et sur celle du Bassin de Taoudéni n'auraient jamais été acceptées dans une programmation de prospection en vue de recherche de métaux et de substances minérales, notamment parce que ma seule ambition étaient d'étudier la possibilité et la forme de signaux spécifiques de surface.

Hors des formations admises par la communauté, c'est à dire dans les formations néoprotérozoïques, la simple observation naturaliste a permis de faire ce que les méthodes habituelles de prospection géologique et minière n'auraient pu envisager, comme l'observation de régions considérées comme défavorables, et par conséquent pu réussir, la mise en évidence d'indices inhabituels débouchant sur des sujets nouveaux. Maintenant chaque corps ferrugineux doit être considéré comme un signal de minéralisation, et c'est chacun de ces signaux qu'il reste à expertiser afin d'en définir l'intérêt. L'état des connaissances des altérations de ce type de matériau est trop sommaire pour que des choix de priorité, soit selon la teneur, soit selon une étude statistique de l'ensemble de la population, puissent refléter chacun des types de formations parentales. Comme c'est *a posteriori* que sont presque toujours définis les chapeaux de fer, c'est *a posteriori* que pourront être précisées de meilleures caractéristiques indicatrices pour la prospection. Celle ci peut raisonnablement être développée, à partir des affleurements ferrugineux, avec de bonnes analyses, avec un bon calage géophysique et, rapidement je l'espère, des forages relativement peu profonds intégrant état de surface et propriétés électriques ou électromagnétiques des terrains sous-jacents. La région n'a pas d'altérations très profondes,

même si elles sont évoluées, notamment avec des cuirasses latéritiques mais les nombreux sols halomorphes témoignent d'altérations plus récentes, plus confinées, moins évoluées.

3 - Perspectives métallogéniques

Le domaine qui a été ciblé par les recherches est uniquement celui de l'amélioration de la reconnaissance des indices de minéralisation en milieu à fortes altérations climatiques. Ceci reste un complément pratique aux approches géodynamiques, mais qui peut aussi se révéler comme le facteur déclenchant pour des investigations pétrographiques et structurales complémentaires ou nouvelles. Ces deux aspects sont apparus au cours des recherches et ont donc créé des perspectives, pour l'amélioration et la diversification des ressources, comme ceci a été dit dans les résultats obtenus (chapitres IV et V).

D'une part il y a des perspectives à reprendre des travaux anciens insuffisamment justifiés en fonction des acquis, ce qui est le cas de Kwademen, où il serait envisageable d'expertiser les possibilités en Ni, Cu et platinoïdes. D'autre part, dans les formations néoprotozoïques du Nord Burkina, les indices recueillis nécessitent d'entamer des investigations pour définir le cadre géodynamique responsable de la présence de ces indices. Ceci peut être un tournant dans la définition et la signification de ces formations géologiques oubliées jusqu'à présent pour la prospection des métaux.

Les recherches sur Bonga sont plus intéressantes en ce qui concerne la place et la forme du nickel que susceptibles de fournir de nouveaux objectifs pour la recherche de métal, l'hypothèse de formes sulfurées du nickel restant une hypothèse.



On ne peut pas dire que les séries du Précambrien Supérieur – Paléozoïques, qu'elles soient calmes ou impliquées dans l'orogénie panafricaine, aient été privilégiées par la recherche minière.

Ainsi Bessoles et Trompette pouvaient écrire, en 1980, qu'il n'y avait aucun intérêt minier dans les séries du Bassin des Volta impliquées dans la chaîne des Dahomeyides : "Mais disons tout de suite que l'Atacorien, monotone (schistes et quartzites), constituant des massifs boisés souvent inhabités, *ayant un faible intérêt minier*, n'a été que peu étudié."

A bien des égards, l'ensemble de ces formations constituant les Bassins des Volta et de Taoudéni, a été ainsi tout à fait marginalisé par les investigations de prospection minière, soit du fait d'une certaine monotonie de ces séries, soit parce que d'autres objectifs ont été privilégiés, dans les formations magmatiques ou volcano-sédimentaires du Précambrien inférieur et moyen.

L'exception notable a été certainement la recherche des phosphates, essentiellement dans la partie septentrionale du Bassin des Volta au Burkina Faso, au Niger et au Bénin, y compris dans l'Unité structurale du Buem (Aloub Djouana, Bassar) puis, plus tardivement, dans l'Atacora (Bassar, Pagala au Togo central). Dans le Bassin de Taoudéni, les investigations de recherches appliquées en territoire burkinabé concernent essentiellement les matériaux de construction à défaut des phosphates qui ne sont pas encore connus. Les prospections d'autres ressources ont été rares et il n'en reste que quelques anomalies géochimiques en Zn, U, Cu et Mo qui ont été retrouvées et étendues au cours du déroulement du programme. Au Mali des indices de manganèse et de cuivre sont connus près de Ansongo et Firgoun dans un contexte voisin de celui parcouru au Nord Burkina.

La partie burkinabé du Bassin de Taoudéni ne figure au niveau des potentialités de ressources d'origine minérale que pour ses formations carbonatées, dans la région de Bobo à l'Ouest, et dans celle de Tin Akof au Nord (calcaires et dolomies de Tiara, de Tin Hrassan, de Tin Dioulaf).

L'approfondissement de la recherche, à partir des thèmes abordés dans le programme, a également été lancé dans d'autres directions, plus profondes que l'analyse des signaux superficiels. C'est un projet ambitieux de remettre en cause ce qui semblait acquis dans les formations sédimentaires du Nord Burkina, mais il y a la logique de l'observation de phénomènes superficiels qui ne peuvent être compris dans le seul cadre sédimentaire défini dans les années 1960. Aujourd'hui les observations accordent une grande importance, régionale, aux faits tectoniques et hydrothermaux, probables moteurs d'une remobilisation des éléments et donc débouchant naturellement sur la définition d'un domaine métallogénique nouveau, voire de plusieurs. Enfin la dimension régionale, qui apparaît avec la dispersion des corps ferrugineux sur 6000 km² et l'extension des brèches affectant l'ensemble sédimentaire, peut être évaluée à partir d'une réinterprétation des mesures géophysiques au sol (gravimétrie, magnétométrie) et aéroportées (magnétométrie, radiométrie).

La dimension régionale apparaît à travers les mesures de géophysique d'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, d'abord avec les mesures magnétiques et gravimétriques au sol de Crenn, Blot et al (années 1956 à 1958).

A l'échelle de la sous-région, le secteur du Bassin de Taoudéni où sont connues les ferruginisations, s'inscrit dans une très forte anomalie de pesanteur, anomalie négative centrée sur Tin Akof - Fadar Fadar, jusqu'à Gao au Nord-Est et Djibo à l'Ouest. Cette anomalie est orientée ENE-WSW sur 600 km et 100 à 300 km de largeur, bordée au Sud par l'anomalie positive Ouagadougou-Niamey, et au Nord par l'anomalie positive Mopti-Tichit (figure 6-1). La relation entre les anomalies de Fadar Fadar et celle de Ouaga-Niamey ressemble en intensité, en contraste et en dimension aux anomalies marquant la chaîne des Dahomeyides, anomalie

positive du socle bénino-togolais et anomalie négative de la bordure orientale du Bassin de la Volta (figure 6-3).

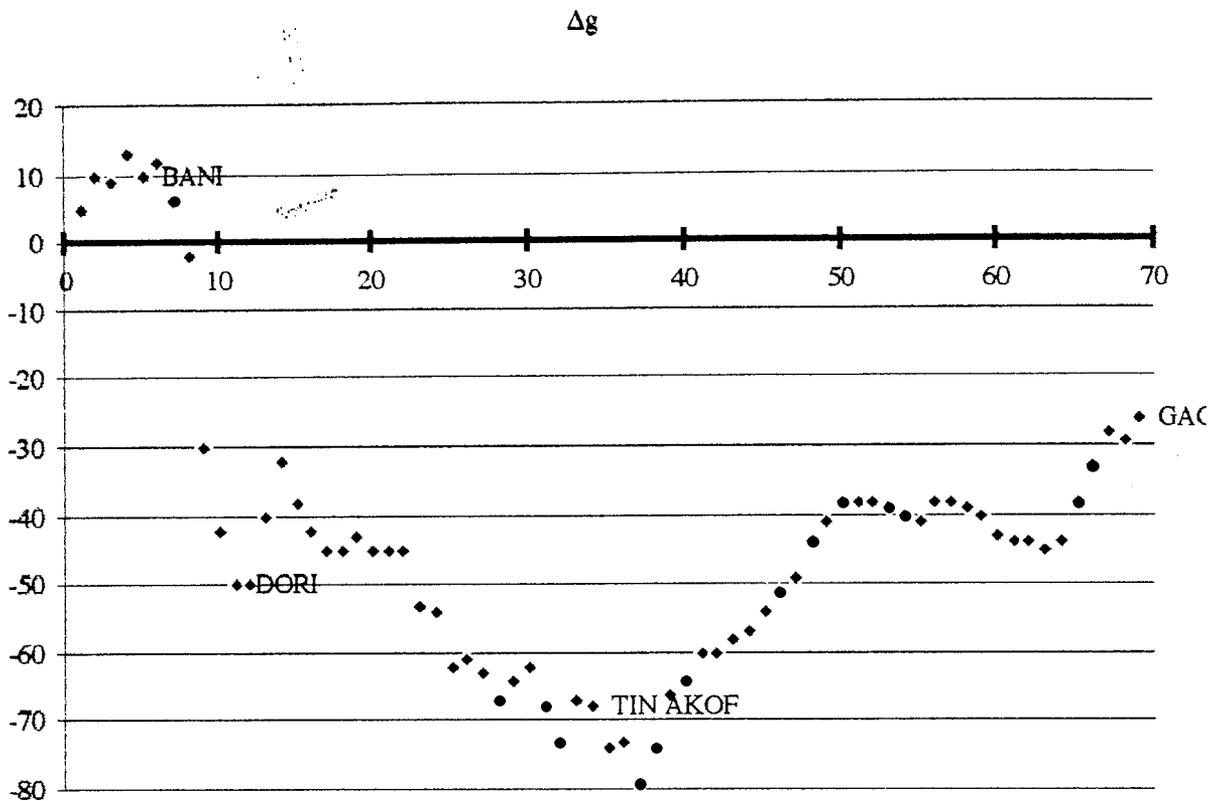


Figure 6-1 - Mesures gravimétriques du Sud au Nord (environ 350 km de Bani à Gao, Δg en milligals)

L'interprétation des mesures aéromagnétiques de Terra Surveys en ce qui concerne les relations socle-sédimentaire couvre de $14^{\circ}45' N$ à $15^{\circ}00' N$ et $0^{\circ}15' E$ à $0^{\circ}25' W$, soit un peu moins de 2000 km^2 (figure 6-4). Dans le détail l'interprétation montre que de la bordure du Bassin à l'aplomb de Tin Akof il y a un fort enfoncement progressif du toit du socle atteignant au moins 1700 mètres, soit près de 10 % en moyenne et 15 % sur le rebord du talus (figure 6-2). Cette fosse apparente semble orientée E-O sans toutefois conserver partout la même profondeur et il n'apparaît pas de correspondance entre l'anomalie gravimétrique négative Fadar Fadar - Tin Akof et l'épaisseur supposée des sédiments. Par ailleurs des hauts fonds accèdent la notion d'une mise en place sur un relief encore fort marqué.

Les résultats faciologiques, minéralogiques et surtout géochimiques, qui sont l'accès essentiel à la création d'indices, obtenus sur les matériaux supergènes dans le cadre de ce programme orientent vers une distribution des éléments d'origine hydrothermale, mais assez complexe car la plupart des associations permettent d'évoquer une ambiance de basse température, mais d'autres une association de métaux précieux et même une association sédimentaire carbonée (schistes noirs).

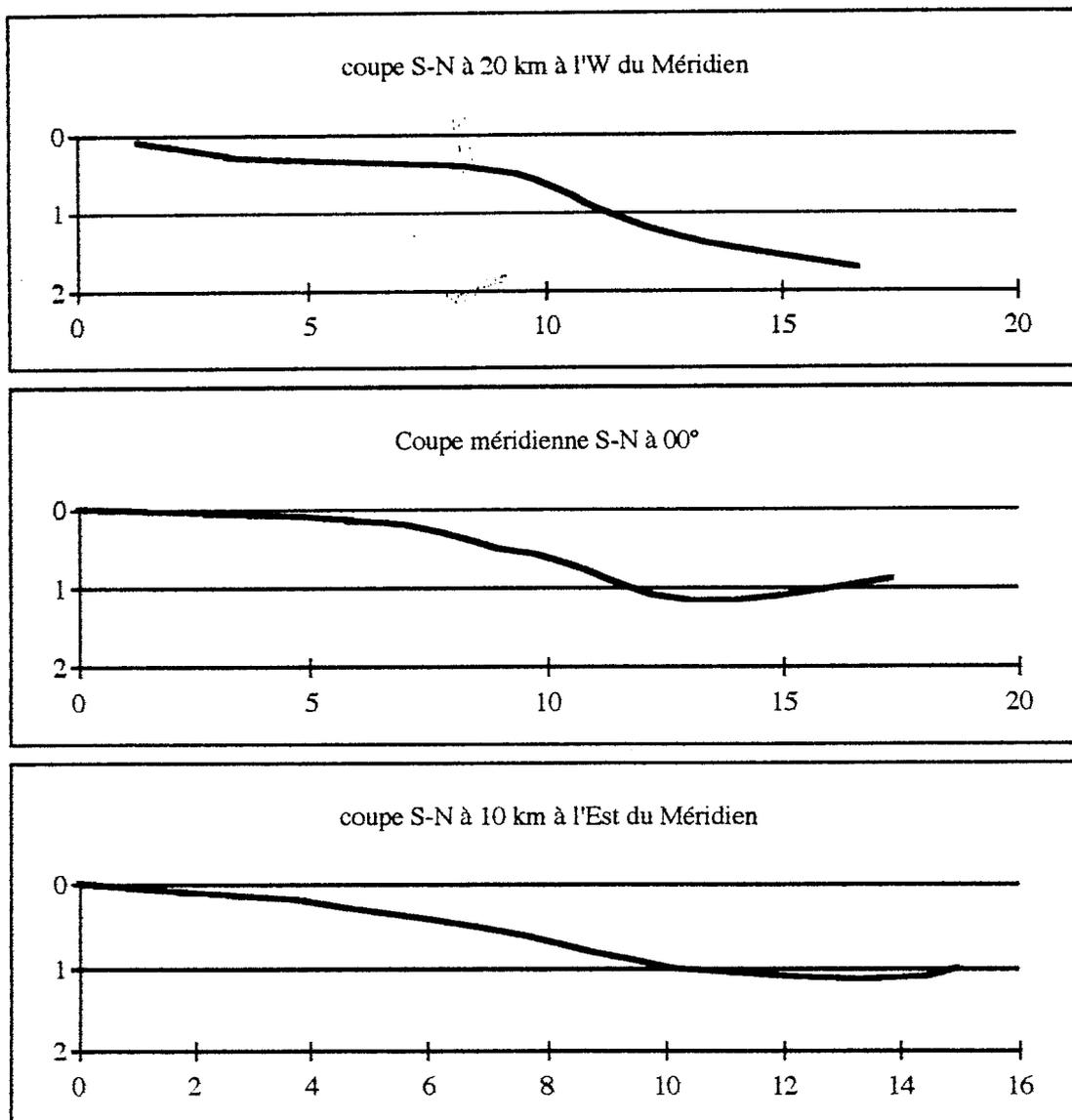


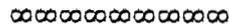
Figure 6-2 - Coupes séries du contact socle - sédimentaire d'après les interprétations des mesures aéromagnétiques (en km).

Quand la conclusion des travaux d'orientation effectués dans le cadre de ce programme, souligne que 44 éléments présentent des anomalies par rapport à la composition de l'écorce terrestre, on peut se poser beaucoup de questions tant sur la validité des méthodes que sur l'impossibilité actuelle d'imaginer la signification d'anomalies rarement réunies. Relativisons aussi par le fait qu'une référence aussi lointaine que le clarke est vraiment très artificielle, mais les références plus proches sont trop incomplètes (ferruginisations par exemple) ou absentes (le milieu géologique régional), ce qui fait que j'ai utilisé la méthode préconisée par Beus et Grigorian. Il reste que 20 éléments présentent des teneurs supérieures à 1 clarke dans plus de un tiers des échantillons dont Cu, Lu, Tb, Y et Yb et que 20 éléments atteignent ou dépassent un clarke de concentration de 10, dont Cd, Hg, Mn, Pd et Pt. Les éléments qui cumulent ces deux caractéristiques sont As, Au, Be, Bi, Co, Fe, Mo, Pb, Re, Sb, Se, Te, U, V et Zn (tableau 6-1).

	Ag	As	Au	B	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr
nb %	21	99	42	4	4	66	51	31	9	56	10
max	7,6	315	64	1,3	7,3	13	29	18	3,4	35	5,3
	Cu	Eu	Fe	Ga	Ge	Hg	In	La	Lu	Mn	Mo
nb %	36	18	98	2	3	13	6	2	36	18	64
max	5,8	2,7	12	3,7	1,6	10	2,9	1,9	3,4	144	45
	Nd	Ni	P	Pb	Pd	Pt	Re	S	Sb	Se	Sm
nb %	10	29	19	66	17	30	69	24	100	49	22
max	3,1	3,5	3,9	46	3,5	46	23	6,7	216	868	2,9
	Sm	Tb	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Yb	Zn
nb %	22	37	34	3	4	82	54	6	47	41	69
max	2,9	3,7	153	2,3	7,5	10	16	6,0	4,2	3,7	23

Tableau 6-1 - Géochimie des ferruginisations du Nord Burkina : % des teneurs > 1 clarke et clarke de concentration maximum

Par ailleurs mon leitmotiv sur l'intérêt métallogénique des formations du Précambrien supérieur, dure effectivement depuis 20 ans dans une démarche commencée au Togo à partir de ma découverte des premiers chapeaux de fer de Pagala (Centre Togo), et il a déterminé mon attention dans le nord du Burkina où les conditions d'observation sont bonnes. Je pense que sans vouloir étendre à tout prix l'intérêt à tout le reste du bassin de Taoudéni, il serait prudent d'y réaliser un minimum d'inventaire, car des ferruginisations, difficiles à considérer comme banalement climatiques, ont été vues dans la région de Bobo, près de Koro et de Tiara par exemple. Plus directement inspiré de l'expérience togolaise, je pense aussi que la prospection de la partie burkinabé du Bassin de la Volta, s'est satisfaite des phosphates mais n'a pas encore exploré les possibilités métallogéniques des formations sédimentaires, ce qui pourrait être corrigé dans les prochaines investigations de cartographie. Même si les perspectives du Birimien restent essentielles, ce qu'ont démontré les travaux anciens synthétisés par Milési et al, il ne peut être négligé les potentialités des formations qui sont issues du démantèlement de celui-ci. Il est vraisemblable que des tris sédimentologiques ont eu lieu au cours des épisodes détritiques, chimiques et biologiques (milieux carbonés, carbonatés, phosphatés) et des événements contemporains ou postérieurs à la sédimentation (tectoniques, magmatiques, hydrothermaux, métamorphiques). La géochimie stratigraphique des formations du Précambrien supérieur n'est pas du tout établie pour évaluer les réserves issues de la sédimentation à partir de l'altération, du transport et de la sédimentation des matériaux plus anciens. Quant aux événements post sédimentaires susceptibles de concentrer les éléments, ils ne sont que très partiellement connus, notamment dans le Bassin de Taoudéni, ce qui pose des problèmes théoriques immédiats. Le contexte de l'ensemble du Bassin de la Volta, au moins dans ses grandes lignes, établi essentiellement par les travaux de Affaton, pourrait servir en partie de modèle à l'approche des perspectives sur le Bassin de Taoudéni, malgré les réserves théoriques posées précédemment de manière arbitraire par Bessoles et Trompette. Conjointement il est vraisemblable que les perspectives d'un des deux bassins serviront de référence à l'autre, avec des identités déjà bien établies dans les échelles stratigraphiques et des événements structuraux post-sédimentaires.



Il faut ajouter aussi que la compréhension des perspectives ouvertes par l'approche réalisée dans le cadre du programme se heurteront au scepticisme des habitudes, à la difficulté intellectuelle de prendre en compte d'autres voies que celles qui sont reconnues à un moment donné.

Au Togo l'émergence de l'intérêt minier des séries du Bassin des Volta impliquées dans l'orogénie panafricaine s'est heurtée tout au long à ce scepticisme, voire à l'hostilité, ralentissant les études directes et grevant très certainement le budget total qui a été consacré aux recherches. Dans les méthodologies utilisées à Pagala, la recherche systématique d'un modèle, plus dogmatique que raisonné, a également biaisé la recherche de la minéralisation, avec la définition géochimique préalable d'associations en principe favorables puis l'utilisation de techniques statistiques sans contraintes. Plus récemment le modèle structural, succédant à un modèle géochimique, a montré ses limites, car là aussi il n'est qu'en partie seulement vérifié. Dès 1985, au Togo, nous avons évoqué la possibilité raisonnable d'un gîte stratiforme d'origine exhalative, et aujourd'hui malgré tous les détours on y revient.

Les sujets possibles dans le Bassin de Taoudéni (région de Tin Akof) n'ont été qu'esquissés au cours de ce programme en privilégiant quand même l'hypothèse d'une origine hydrothermale dans la concentration des éléments. Il est certain qu'il faut développer la connaissance générale permettant de comprendre tous les mécanismes géodynamiques en jeu, sans a priori théorique. En même temps les prospections peuvent maintenant accéder directement aux indices sans détour par les techniques aveugles, les caler par géophysique et les explorer par sondages mécaniques. Actuellement je ne pense pas qu'on puisse aller beaucoup plus loin dans la définition des minéralisations possibles : Pb, Zn, Mo quel élément, quels éléments sont suffisamment concentrés pour pouvoir évoquer un gîte minéralisé ? Et puis, en raison des similitudes, il faudra bien retrouver aussi l'équivalent des phosphates du Bassin des Volta dont tant de caractéristiques se retrouvent dans la région parcourue du Sahel burkinabé.

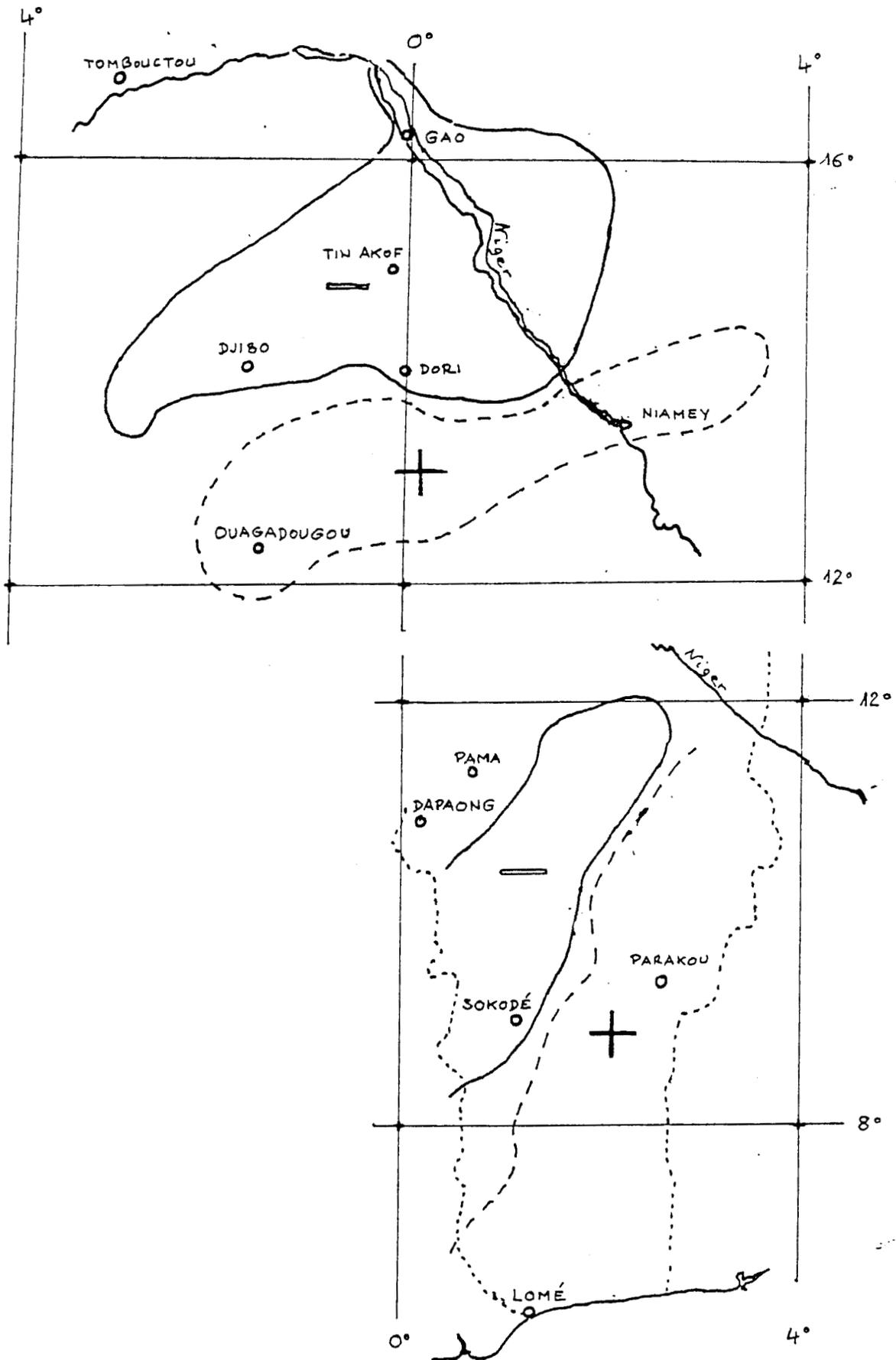


Figure 6-3 - Mesures gravimétriques en Afrique de l'Ouest : schéma cartographique des anomalies négatives principales des bordures des Bassins néoprotérozoïques d'après Creann

ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Blot Alain, 2002, Signification des ferruginisations des formations néoproterozoïques du Nord Burkina Faso (Afrique de l'Ouest), C. R. Geoscience, 334, 12, 909-915

Lavaud Thomas, 2002, Paléo-chapeaux de fer au sein des cuirasses latéritiques : exemple du gîte nickélifère de Bonga, Burkina Faso, DESU Toulouse, 72 p.

Blot Alain, 2002, Complément aux résultats des recherches géochimiques sur les ferruginisations du Nord du Burkina Faso, IRD Ouaga, 27 p., 18 P. HT

Blot Alain, 2001, Distinction entre cuirasses latéritiques et chapeaux de fer. Applications à la mise en évidence de nouvelles perspectives pour les formations peu explorées par la recherche minière, les Bassins du Précambrien Supérieur - Paléozoïque. Séminaire BGR Ouaga, 12p

Miningou Mariette, 2001, Nature et place des silicifications dans les formations sédimentaires de la région de Tin Akof, au Nord du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest - DEA Dakar, 68 p.

Blot Alain, 2001, Quelques résultats des recherches sur les ferruginisations du Nord du Burkina Faso et les perspectives pour la recherche minière dans le Bassin de Taoudéni. Rapport provisoire IRD Ouaga, 18 p, 47 p annexes

Blot A., Imbernon R.A.L., Partiti C.S.M., 2001, Gênese dos minerais do grupo da alunita-jarosita nas ocorrências de Canoas (PR) e Irecê (BA) - Uma armadilha para o chumbo, VI Congresso de Geoquímica dos países de língua portuguesa (Faro 2001), 336-338

Blot A., 2001, Distinction entre cuirasses latéritiques et chapeaux de fer. Applications à la mise en évidence de nouvelles perspectives pour les formations peu explorées par la recherche minière, les Bassins du Précambrien Supérieur - Paléozoïque. Séminaire BGR Ouagadougou, décembre 2001, 12 p.

Blot A., Imbernon R.A.L., 2000, Caractérisation par analyse thermique de la constitution cristallographique de diverses chlorites zincifères, C. R. Acad. Sci. Paris, 330, 469-472

Imbernon R.A.L., Blot A., Oliveira S.M.B. de, Magat P., 1999, Os chapéus de ferro associados ao depósito de Pb-Zn-Ag na região de Canoas, Adrianópolis (PR) - Evolução geoquímica e mineralógica, Geochimica Brasiliensis, 13, 2, 145-161

Blot A., 1999, Cuirasses latéritiques et chapeaux de fer, similitudes et différences. 1999 - 2000, note ORSTOM-IRD Ouagadougou, 20 p.

Conférences à l'Université du Bénin (Lomé), à l'Institut des Sciences de la Terre (Université Cheikh Anta Diop, Dakar), au BUMIGEB (Ouagadougou)

Imbernon R.A.L., Blot A., Oliveira S.M.B. de, Partiti C.S.M., 1998, Mössbauer spectroscopy study of Zn-chlorite from Canoas deposit, Brazil, ICAME 99 ref T6/37

Imbernon Rosely A.L., 1998, Les chapeaux de fer associés aux gisements de Canoas (Pb-Zn-Ag), Adrianópolis (PR) et O'Toole (Cu-Ni-Pgm), Fortaleza de Minas (MG) - Os chapéus de ferro associados aos depósitos de Canoas (Pb-Zn-Ag), Adrianópolis (PR) e O'Toole (Cu-Ni-EGP), Fortaleza de Minas (MG) - thèse Université de São Paulo, 120 p.

Béziat D., Bourges F., Debat P., Lompo M., Tollon F. et Zonou S., 1998, Albités et "listvénite" : sites de concentration aurifère inédits dans les ceintures de roches vertes birimiennes fortement hydrothermalisées du Burkina Faso, Bull. Soc. Géol. Fr., 169, 563-571.

Grandin G., 1998, Formation collective sur le terrain : altérations supergènes au Burkina Faso, Livret-guide, 23p., 5 annexes, 8 planches photos

- Delvigne J., 1998, Atlas of mineralogy of mineral alteration and weathering, The Canadian Mineralogist, 495 p.
- Oliveira S.M.B. de, Blot A, Imbernon R & Magat P., 1996, Jarosita e plumbojarosita nos gossans do distrito mineiro do Canoas (PR), Revista Brasileira de Geociências 26 (1) 3-12
- Bamba O., 1996, L'or disséminé dans les albitites birimiennes de Larafella (Burkina Faso), évolution dans les altérites et les cuirasses ferrugineuses, thèse Marseille, 261p
- Petit M., 1994, Carte géomorphologique du Burkina Faso au 1 /1.000.000, ORSTOM- Université de Ouagadougou, 27 p., carte HT.
- Oliveira S.M.B. de, Blot A. & Magat P., 1993, Le gossan de Irecê-Lapão (BA), O gossan de Irecê-Lapão (BA), Geochim. brasiliensis, VII, 2, 131-150. Port
- Togbé K.A., 1991, Les chapeaux de fer du Togo. Etude pétrographique, minéralogique et géochimique, thèse Université de Poitiers, 204 p.
- Lompo M, 1991, Etude géologique et structurale des séries birimiennes de la région de Kwademen (Burkina Faso - Afrique de l'Ouest), thèse Clermont Ferrand, 191p
- Chauris L et Garreau J, 1990, Typologie des gisements de fer du district de Belle-Isle-en-Terre (Côtes d'Armor, France), Chron. rech. min., n° 505, 23-31
- Boeglin JL, 1990, Evolutions minéralogique et géochimique des cuirasses ferrugineuses de la région de Gaoua (Burkina Faso), thèse Strasbourg, 187 p.
- Affaton P., 1990, Le Bassin des Volta (Afrique de l'Ouest) : une marge passive d'âge protérozoïque supérieure, tectonisée au Panafricain (600 ± 50 Ma), Etudes et thèses ORSTOM, Paris, 500 p.
- Togbé K.A., Blot A., Besnus Y., Affaton P., Seddoh K.F., 1990, Contribution de l'étude des chapeaux de fer à la prospection minière au Togo, 2ème RAIST-UNESCO, Lomé, 9 p.
- Boski T & Herbosch A, 1990, Trace elements and their relation to the mineral phases in the laterite bauxite from Southeast Guinea Bissau, Chemical Geology, 82, 279- 297
- Blot A., Magat P., 1990, Les chapeaux de fer du Togo, de l'affleurement à la région . Séminaire Organisation et fonctionnement des altérites et des sols, Bondy, 157-170
- Nicolini Pierre, 1990, Gîtologie et exploration minière, Lavoisier Ed., Paris, 589 p.
- Blot A., Magat P., 1989, Les chapeaux de fer polymétalliques à zinc du Togo (Afrique de l'Ouest), C. R. Acad. Sci., Paris, 309, II, 371-376
- Ramanaidou E, 1989, Genèse d'un gisement latéritique. Evolution supergène des itabirites protérozoïques de la mine de fer de Capanema (Minas Gerais, Brésil), thèse Poitiers, 163p.
- Milési J.P., Feybesse JL, Ledru P, Dommanget A, Ouédraogo MF, Marcoux E, Prost A, Vinchon C, Sylvain JP, Johan V, Tegye M, Calvez JY, Lagny P, 1989, Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur, Chron. Rech. Min., 497, 3-98
- Milési J.P. et al, 1989, Minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest, Carte à 1 / 2 000 000, BRGM Ed.
- Smirnov V, 1988, Géologie des minéraux utiles, Mir Ed. Moscou, 623 p.

Blot A., Affaton P., Seddoh K.F., Aregba A.P., Godonou K.S., Lenoir F., Drouet J.J., Simpura N'K., Magat P., 1988, Phosphates du Protérozoïque Supérieur dans la Chaîne des Dahomeyides (circa 600MA) de la région de Bassar (Nord Togo, Afrique de l'Ouest). Journ. of Afric. Earth Sc., 7, 1, 159-166

Oort van F et Robert M, 1988, Rôle de l'oxydation du soufre dans les premiers stades de l'altération superficielle des calcschistes (Beaufortain, Alpes du Nord. Conséquences générales sur l'évolution pédologique. C. R. Acad. Sci. Paris, 307, II, 819-825

Napon S, 1988, Le gisement d'amas sulfuré (Zn-Ag) de Perkoa dans la Province du Sangyé (Burkina Faso - Afrique de l'Ouest), thèse Besançon, 310p

Pouit G, 1987, L'amas sulfuré à Cu (Zn) de Tambo Grande dans le Crétacé du Nord Pérou. Historique de la recherche, Chron. Rech. Min., n° 489, 43-49

Guilbert John M, Park Charles F Jr, 1986, The geology of ore deposits, WH Freeman and Company Ed, New York, 985 p.

Blot A., 1986, 1ère RAIST - UNESCO, Dakar

- Pour une meilleure efficacité des prospections minières d'après des exemples togolais.
- L'Atacorien du Togo : une province précambrienne à zinc, fer, phosphore...
- Les phosphates précambriens de Bassar : un nouvel atout pour le Togo et la Sous Région.

Blot A., Magat P., 1986, Les chapeaux de fer du Togo, 1ère RAIST - UNESCO, Dakar

Mosser C., Leprun J.C., Blot A., 1985, Les éléments traces des fractions < 2 μm à kaolinite et smectite formées par les altérations des roches silicatées acides en Afrique de l'Ouest (Sénégal et Haute Volta), Chem geol, 48, 165-181

Boulangé B., 1984, Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire, Travaux et Documents ORSTOM, 175, 341p

Smith R E & Perdrix J L, 1983, Pisolitic laterite geochemistry in the Golden Grove Massive Sulphide district, Western Australia, Journal of Geochemical Exploration, 18, 131-164

Kosakevitch A, 1983, Etude morphogénétique des textures de remplacement et de remplissage dans les chapeaux de fer, BRGM, 83SGN936MGA, 144 p., 47 planches photographiques

Nahon D, Paquet H and Delvigne J, 1982, Lateritic weathering of ultramafic rocks and the concentration of nickel in the Western Ivory Coast, Econ. Geol., 77, 1159-1175

Ryall WR & Taylor GF, 1981, Gossan evaluation manual for use in the Kingdom of Saudi Arabia, Technical record IR-01-3, 146 p, 108 photos

Butt C R M & Smith R E, 1980, Conceptual models in exploration geochemistry, Journal of Geochemical exploration, 12, 89-365

Blot A., 1980, L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal, Travaux et doc. ORSTOM, n°114, 434 p.

Mosser C., 1980, Etude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments, Sciences Géologiques Strasbourg, n°63, 229 p.

Pion J.C., 1979, L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute Volta, Mém. Sc. Géol. Strasbourg, 57, 220 p.

Leprun J.C., 1979, Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins d'Afrique Occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation, Mém. Sc. Géol. Strasbourg, 58, 224 p

- Wilhelm E & Kosakevitch A, 1979, Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection - Bull BRGM, sect II, 109-140
- Kosakevitch A, 1979, Chapeaux de fer : problème de définition et de nomenclature pratique, Bull BRGM, sect II, 141-149
- Blot A., Leprun JC., Pion JC., 1978, Corrélations géochimiques entre les cuirasses ferrugineuses et les roches du socle cristallin au Sénégal et en Haute Volta . Lithodépendance et héritage géochimique, C R Ac Sc, 286, D, 1331-1334
- Terra Surveys limited, 1977, Interprétation du levé aéromagnétique exécuté sur la partie voltaïque du Liptako-Gourma, 280 p., 17 fig, 6 planches HT
- Blot A, Leprun JC, Pion JC, 1976, Originalité de l'altération et du cuirassement des dykes basiques dans le massif de granite de Saraya (Sénégal Oriental) . Bull Soc Géol Fr, 18, 1, 45-49
- Blot A, Carn M, Leprun JC et Pion JC, 1976, Premier bilan des études géologiques et pédologiques d'un corps ultra basique et de son contexte : Koussane au Sénégal Oriental . Cah. ORSTOM sér. Géol., vol VIII , n°2, 113-145
- Terra Surveys limited, 1976, Rapport préliminaire d'interprétation d'une étude aéromagnétique. Partie Nors-Est de la Haute-Volta, 43 p., 3 fig HT, 10 planches HT
- Beus AA and Grigorian SV, 1975, Geochemical exploration methods for mineral deposits. Applied Publishing Ed, 287p
- Pédro G, Delmas AB et Seddoh FK, 1975, Sur la nécessité et l'importance d'une distinction fondamentale entre type et degré d'altération. Application au problème de la ferralitisiation, C. R. Acad. Sci. Paris, 280, D, 825-828
- Dorbath C., Froidevaux P., Blot A., Carn M., 1975, Application des propriétés de résistivité des terrains d'altération à la connaissance de la tectonique du massif de Saraya (Sénégal Oriental), Cah ORSTOM, sér Géol , VII, 2, 111-123
- Wackermann JM, 1975, L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide, thèse Strasbourg, 373 p.
- Levinson A A, 1974, Introduction to Exploration Geochemistry, Applied Publishing Ltd, Maywood, Illinois, 614 p.
- PNUD, 1974, Recherches minières dans le Nord de la Haute-Volta, rapport annuel juillet 1973 - juin 1974, UPV 71/516
- PNUD, 1974, Recherches minières dans le Nord de la Haute-Volta, rapport technique, UPV 71/516
- Grandin G, 1973, Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse de quelques régions d'Afrique de l'Ouest, Mémoire ORSTOM, 82, 275p
- Trescases JJ, 1973, L'évolution géochimique supergène des roches ultra basiques en zone tropicale et la formation des gisements nickélicifères de Nouvelle Calédonie, Mémoire ORSTOM
- Michel P., 1973, Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique, Mém. ORSTOM, 3 vol., 752 p.

Blot A., Pion J.C., Wackermann J.M., 1973, Un exemple de corrélation de rang en géochimie : les altérations du socle birimien en zone tropicale sèche (Sénégal Oriental et Haute Volta), Cah ORSTOM, sér Géol, V, 1, 25-34

Blot A., Leprun J.C., 1973, Influence de deux roches mères de composition voisine sur les altérations et les sols. Un exemple sur le socle cristallin au Sénégal Oriental, Cah ORSTOM, sér Géol, V, 1, 45-57

Reichelt R., 1972, Géologie du Gourma (Afrique occidentale) un "seuil" et un bassin du Précambrien supérieur. Mémoires BRGM., 53, 213 p.

Delfour J. et Jeambrun M., 1970, Notice explicative de la carte géologique au 1/ 200 000 (Oudalan). Rapp. Dir. Géol. Min. Haute Volta. Editions B.R.G.M. Paris, 64 p.

Boulet René, 1968, Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord, ORSTOM, Dakar, 351 p.

Pédro G., 1968, Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique, Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 10, 5, 457-470

Wackermann Jean Marie, 1967, Les faciès pétrographiques de la Série de Mako dans les régions de Kanéméré et Mamakono (Sénégal Oriental), ORSTOM Dakar, 55 p.

Pedro Georges, 1966, Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino-silicique), C. R. Acad. Sci. Paris, 262, D, 1828-1831

Maignien Roger, 1966, Compte-rendu de recherches sur les latérites. Coll. Recherches sur les ressources naturelles, 4, UNESCO, 155 p.

Delvigne Jean, 1965, Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferralitique, Mém. ORSTOM, 13, 177 p.

Delfour J., 1965, Géologie de la partie Nord du cercle de Dori (Haute Volta), Rapp. B.R.G.M., BOB 65 A 27, Haute-Volta, 190 p.

Routhier P., 1963, Les gisements métallifères ; géologie et principes de recherche, Masson Ed., Paris, 2 volumes

Delfour J., 1963, Rapport sur la prospection du sédimentaire nord-voltaïque et sur les calcaires de Tin Dioulaf, Rapp. Inéd. B.R.G.M., Bobo Dioulasso

Blot Claude, Crenn Yvonne, Metzger Joseph, Rechenmann Julien, 1962, Mesures gravimétriques et magnétiques en Afrique occidentale de 1956 à 1958 : Mali, Haute Volta nord, Niger ouest, esquisses Sénégal et Mauritanie. Cahiers ORSTOM, Géophysique (FRA), Vol. 2, No 3, 52 p., 7 cart. HT, 58 p. de graph.

Delfour J., 1961, Rapport préliminaire de fin de campagne de prospection régionale dans le secteur de Dori (Haute-Volta), Rapp. Inéd. B.R.G.M., Bobo Dioulasso

Maignien Roger, 1958, Le cuirassement des sols en Guinée. Mem. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 16, 239 p.

Crenn Yvonne, 1957, Mesures gravimétriques et magnétiques dans la partie centrale de l'AOF : interprétations géologiques. Cahiers ORSTOM, Série Géophysique (FRA), No h.s., 47 p., cart. dont 3 dépl. HT, 9 pl. HT

Tableaux et figures

I - OBJECTIFS

5 - Figure 1-1 - Schéma de localisation des points d'observation.

II - PRINCIPES

10 - Tableau 2-1 - Teneurs en quelques éléments des chapeaux de fer de Perkoa (BL 1, BL2 et SA1), de Kwademen (BL4, BL5 et BL45) et Diana (BL21 et BL26).

11 - Tableau 2-2 - Spécialisations géochimiques des ferruginisations de divers sites du Burkina.

15 - Figure 2-1 - Typologie des affleurements ferrugineux établie par Butt, Smith, Ryall, Taylor

15 - Figure 2-2 - Différenciation des profils cuirassés suivant la roche-mère s établie par Leprun (1- altération pistache, 2- argiles bariolées, 3- argiles tachetées, 4- horizon vertique, 5- horizon illuvial, 6- horizon éluvial, 7-8-9 - cuirasse, 10- nodules de surface, 10- sol de recouvrement

16 - Figure 2-3 - Les conditions pH et rH de la formation de la bauxite et de la latérite établies par Norton (in Guilbert et Park) : 1- domaine de formation de la latérite, 2- de la bauxite, 3- des podzols, 4- des latérites riches en fer.

16 - Figure 2-4 - Schéma des évolutions des roches endogènes et exogènes et des équivalences latérales des éléments des cuirasses à blocs (faciès conglomératique) établi par Blot.

17 - Figure 2-5 - Les enjeux des formations ferrugineuses pour la ressource minière.

III - MATERIELS ET METHODES

20 - Tableau 3-1 - Couleurs observées dans les chapeaux de fer (A. M. Bateman).

22 - Tableau 3-2 - Minéraux spécifiques des gossans d'Arabie (Ryall & Taylor)

* autres minéraux observés dans nos études brésiliennes.

23 - Tableau 3-3 - Minéraux spécifiques des cuirasses et profils latéritiques.

24 - Tableau 3-4 - Les filiations dans la mine de O'Toole établi par Rosely Imbernon.

26 - Tableau 3-5 - Composition de quelques échantillons typiques de chapeaux de fer (1 à 7 = Burkina, 8 à 14 = Togo).

26 - Tableau 3-6 - Composition chimique du chapeau de fer CF3 de Pagala (n = 126).

27 - Tableau 3-7 - Composition moyenne de trois variétés de cuirasses sur des roches mères différentes (Sénégal Oriental, collection Blot).

30 - Tableau 3-8 - Charge minérale moyenne des goethites pour 100 atomes de Fe dans divers chapeaux de fer étudiés au Togo et au Brésil.

27 - Figure 3-1 - Composition chimique triangulaire ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de divers chapeaux de fer du Togo et du Brésil. Il faut noter que les fortes valeurs relatives en Al_2O_3 de certains chapeaux de fer correspondent à des faciès de roches ferruginisées.

28 - Figure 3-2 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses alumineuses et ferrugineuses (collections Bamba, Blot, Boulangé, Gense, Grandin, Pion, Trescases).

28 - Figure 3-3 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses aluminoferrugineuses (collections Bamba, Blot, Trescases).

29 - Figure 3-4 - Composition chimique ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de diverses cuirasses alumineuses (collections Boulangé, Boski et Herbosch).

29 - Figure 3-5 - Teneurs en Al_2O_3 et V de diverses roches ferrugineuses (ronds blancs = cuirasses, triangles noirs = chapeaux de fer, croix = fer sédimentaire et magmatique).

31 - Figure 3-6 - Représentations schématiques d'un profil latéritique cuirassé et de l'altération d'une minéralisation sulfurée.

IV - RESULTATS

- 32 - Tableau 4-1 - Principales caractéristiques minéralogiques et géochimiques de Perkoa, connues en 1982.
33 - Tableau 4-2 - Analyses de deux échantillons du chapeau de fer de Perkoa (Blot).
34 - Tableau 4-3 - Les analyses du chapeau de fer de Kwademen (PNUD, 1983).
34 - Tableau 4-4 - Analyses minéralogiques et géochimiques du corps sulfuré de Kwademen à partir de 3 forages (PNUD 1983).
36 - Tableau 4-5 - Analyses d'orientation du chapeau de fer de Kwademen et de roches proches (Blot).
38 - Tableau 4-6 - Eléments présentant une teneur maximale supérieure à deux fois le clarke et valeur du clarke de concentration maximum de chacun de ces éléments.
- 35 - Figure 4-1 - Sondages Kwademen-Bavila, analyse factorielle et représentation des deux premiers axes.
35 - Figure 4-2 - Sondage Bavila, analyse factorielle avec représentation des deux premiers axes

V - RESULTATS OBTENUS DANS UNE PARTIE DU BASSIN DE TAoudenI, LA PARTIE NORD DU BURKINA

- 40 - Tableau 5-1 - Géochimie des sols au sud de Toussougou (PNUD).
41 - Tableau 5-2 - Géochimie des affleurements du sud Toussougou : valeurs maximales (PNUD)
41 - Tableau 5-3 - Géochimie des affleurements de roches du secteur Kabia (PNUD) : valeurs maximales.
42 - Tableau 5-4 - Géochimie des sols du secteur in Tangoum (PNUD).
50 - Tableau 5-5 - Comparaison de l'étude du chapeau de fer du gîte de sulfures Cu-Zn de Jabal Sayid (Arabie Saoudite).
51 - Tableau 5-6 - Comparaison des compositions médianes : 1 - des chapeaux de fer de Pagala (Centre Togo, n=127), 2 - du chapeau de fer de Kwademen (Centre Burkina, n=5), 3 - du chapeau de fer de Perkoa (Centre Burkina, n=10), 4 - des ferruginisations de Tin Akof (n=5), 5 - de la cuirasse de Gangaol (Nord Burkina, n=17), 6 - de la cuirasse de Laraféla (Centre Burkina, n= 32)
52 - Tableau 5-7 - Teneurs comparées des ferruginisations de Tin Akof (TA1 = moyenne, TA2 = maximum) avec quelques moyennes de teneurs de chapeaux de fer.
55 - Tableau 5-8 - Caractéristiques analytiques des 140 échantillons des ferruginisations.
62 - Tableau 5-9 - Les associations géochimiques caractéristiques de types de minéralisation
- 56 - Figure 5-1 - Minéralisation totale des échantillons : nombre d'éléments > 1 clarke.
56 - Figure 5-2 - Clarke de concentration des teneurs maximales des éléments ayant des valeurs supérieures à 2 clarkes.
65 - Figure 5-3 - Affleurements ferruginisés analysés regroupés en 8 zones géographiques.
65 - Figure 5-2 - Affleurements ferrugineux reconnus au 1/7/2002.

VI - ENSEIGNEMENTS ET PROPOSITIONS POUR LA SUITE

- 76 - Tableau 6-1 - Géochimie des ferruginisations du Nord Burkina : % des teneurs > 1 clarke et clarke de concentration maximum.
- 74 - Figure 6-1 - Mesures gravimétriques du Sud au Nord (environ 350 km de Bani à Gao, Δg en milligals).
75 - Figure 6-2 - Coupes sériées du contact socle - sédimentaire d'après les interprétations des mesures aéromagnétiques (en km).
78 - Figure 6-3 - Mesures gravimétriques en Afrique de l'Ouest : schéma cartographique des anomalies négatives principales des bordures des Bassins néoprotozoïques d'après Crenn
79 - Figure 6-4 - Carte interprétative du contact socle - sédimentaire d'après les interprétations des mesures aéromagnétiques de Terra Surveys.

Ferruginisations sur l'ensemble du Burkina, Birimien et Précambrien supérieur

	statistiques						effectifs			
	min	max	moyenne	écart type	coef variat	médiane	clarke(clk)	< détect	> 1 clk	> 2 clk
Si	13088	336650	93107	79423	85	69929	277000	0	2	0
Al	4075	347612	35724	51304	144	24557	82000	0	3	1
Fe	26299	632987	425380	150305	35	458758	41000	0	45	45
Mn	0	193614	14315	37596	263	852	950	3	21	14
Mg	0	4282	793	775	98	543	23000	1	0	
Ca	0	7361	1177	1577	134	715	41000	4	0	
Na	0	6306	395	1136	288	0	23000	30	0	
K	0	91318	2959	13293	449	332	21000	10	0	
Tl	180	22122	2776	3349	121	2218	5600	0	2	1
P	131	6066	1747	1256	72	1571	1000	0	32	16
H	1936	25637	9415	4090	43	9243	1520	0	47	45
C	0	1419	146	249	171	27	480	19	2	1
S	0	10300	1064	1986	187	200	260	18	23	17
Ag	0	100,0	8,8	25,2	285,1	0	0,07	31	16	16
As	0	1554,0	254,1	408,2	160,6	46	1,5	10	37	37
Ba	0	16800,0	1807,4	3995,8	221,1	144	500	3	9	9
Bi			0				0,048	47	0	
Cd	0	24,0	3,1	5,6	177,9	1	0,11	23	24	24
Co	2	2490,0	114,6	367,3	320,4	29	20	0	28	18
Cr	2	8469,0	530,6	1729,8	326,0	88	100	0	17	11
Cu	10	2605,0	250,7	509,7	203,4	98	50	0	33	22
Fe	26299	632987	425380	150305	35	458758	41000	0	45	45
Ga	0	17,0	0,8	3,3	396,8	0	18	44	0	
La	0	79,0	13,2	16,6	125,7	7	32	2	5	2
Li	0	28,0	3,5	7,5	215,0	0	20	33	5	0
Mn	0	193614	14315	37596	263	852	950	3	21	14
Mo	0	109,0	12,3	18,7	152,0	7	1,5	8	39	34
Nb	0	165,0	23,5	39,2	166,9	9	20	13	16	6
Ni	5	7187,0	596,7	1656,6	277,6	59	80	0	21	13
Pb	0	6934,0	812,0	1598,7	196,9	13	14	14	23	20
Sb	0	531,0	36,7	99,2	270,5	0	0,2	34	13	13
Sc	0	129,0	16,9	21,4	126,2	12	16	12	20	7
Se	0	4,9	0,3	0,9	343,5	0	0,05	40	7	7
Sn			0,0				2,2	47	0	
Sr	2	859,0	62,0	133,1	214,9	21	370	0	1	1
Ta	0	107,0	4,6	16,2	353,3	0	2	38	9	9
Te	0	50,0	3,0	10,3	342,3	0	0,005	43	4	4
V	25	1761,0	346,6	421,0	121,5	188	160	0	26	14
W			0,0				1	47	0	
Y	0	182,0	18,7	31,8	169,7	11,5	30	13	6	3
Zn	9	2009,0	406,1	453,1	111,6	236	75	0	42	33
Zr	0	89,0	20,9	26,7	128,1	8	190	17	0	
Au*	4	531,0	57,5	143,6	250,0	10	1,1	0	13	13
Os*	0	19,0	2,4	6,0	251,3	0	0,1	11	2	2
Pt*	0	180,0	32,6	60,2	184,7	0	1	9	4	4
Ru*	0	70,0	5,4	19,4	360,6	0	1	12	1	1

n = 47, sauf * n= 13 éléments en ppm, sauf * en ppb

Analyses ITS-Bondar Clegg, Vancouver, Canada

(majeurs : borate+XRF, traces : 4 acides+ICP, * : activation neutronique)

Alain BLOT - Quelques ferruginisations du Burkina Faso - Annexe 1

	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	PF	CO2	S	Σ	Ag	p l As
chapeaux de fer																
PERKOA																
BL1	17,94	2,00	71,07	0,07	0,06	0,07	<0,01	<0,05	0,22	0,43	7,91	0	1,03	99,77	1,7	704
BL2	20,94	2,08	70,96	0,31	0,19	0,65	0,04	0,09	0,39	0,72	3,53	0,32	0,27	99,9	1,2	1552
SA-1	4,38	3,84	72,67	4,37	0,18	0,25	0,16	0,10	0,05	0,67	11,29	0,08	0,14	97,96	>50	1071
SA-2	56,37	8,25	15,29	6,80	0,35	0,76	0,09	0,16	0,69	0,34	7,99	0,52	0,20	97,81	>50	951
SA-3	34,01	4,85	51,89	0,10	0,10	0,09	0,01	1,12	0,63	0,42	4,96	0,08	0,08	98,22	2,2	1057
SA-4	39,94	1,35	52,40	0,03	0,03	0,07	<0,01	0,11	0,26	0,47	3,07	0,09	0,28	97,75	2,4	631
SA-5	72,02	5,46	5,66	8,95	0,04	0,14	0,06	0,07	0,29	0,09	4,87	0,09	0,02	97,76	25,9	124
SA-6	35,35	2,49	49,96	0,04	<0,01	0,10	<0,01	0,18	0,16	0,65	5,73	0,09	0,66	94,68	3,9	1554
SB-1	40,88	1,67	51,71	0,15	0,05	0,12	<0,01	0,16	0,23	0,40	3,63	0,09	0,17	99,03	2,1	573
SB-2	30,95	17,61	18,64	19,17	0,53	0,51	0,09	0,08	0,73	0,34	9,21	0,09	0,16	98,11	>50	390
SC-1	10,92	3,46	74,16	0,15	0,10	0,05	0,04	0,04	0,32	0,67	8,50	0,08	0,28	98,49	2,8	603
SC-2	12,26	3,85	71,13	0,24	0,09	0,11	0,05	0,13	0,75	0,93	7,57	0,12	0,61	97,16	4,5	767
SD-1	30,90	6,82	46,32	6,73	0,05	0,12	0,05	0,08	0,22	0,24	8,26	0,10	0,14	100,03	36	274
BAVILA																
BL17	51,86	0,77	44,16	0,11	0,06	0,10	0,01	<0,05	0,15	0,09	1,73	<0,01	0,05	99,04	<0,5	16
BL18	13,15	7,11	65,04	0,11	0,31	0,16	<0,01	<0,05	0,46	0,20	12,41	<0,01	<0,02	98,95	<0,5	<5
KWADEMEN																
BL4	7,39	2,26	80,47	0,10	0,17	0,15	0,01	<0,05	0,76	0,45	6,44	<0,01	0,15	98,2	<0,5	88
BL5	12,23	1,86	73,59	0,10	0,05	0,07	<0,01	<0,05	0,84	0,80	7,97	<0,01	0,17	97,51	<0,5	29
BL19	5,56	3,28	83,83	0,15	0,03	0,03	<0,01	<0,05	0,75	0,36	4,88	<0,01	0,19	98,87	2,2	<5
BL45	13,41	9,78	65,59	0,07	0,06	0,07	<0,01	0,05	0,37	0,13	9,70	0,01	0,07	99,23	<0,5	71
BL46	5,55	1,06	90,5	0,38	0,12	<0,01	<0,01	0,30	0,36	0,06	1,76	0,01	0,07	100,1	0,7	<5
BL56	34,26	7,42	20,08	25	0,71	1,03	<0,01	0,58	0,28	0,08	9,52	0,02	<0,02	98,96	<0,5	<5
diagnostic incertain																
PERKOA																
SE1	22,95	6,25	61,74	0,06	0,08	0,17	<0,01	0,02	0,28	0,40	7,40	0,10	0,02	99,36	<0,2	127
PIÉLA																
BL14	21,26	11,68	56,86	0,70	0,09	0,05	<0,01	0,09	0,57	0,24	6,86	<0,01	<0,02	98,4	<0,5	<5
DIANA																
BL20	32,97	13,15	45,04	0,24	0,07	0,05	0,07	0,29	0,57	0,25	7,02	<0,01	<0,02	99,72	<0,5	11
BL21	19,69	6,20	62,81	0,20	0,09	0,07	0,61	0,28	0,17	0,82	9,31	<0,01	<0,02	100,3	<0,5	80
BL22	26,56	6,26	58,99	0,02	0,04	0,03	<0,01	<0,05	0,79	0,63	6,97	<0,01	<0,02	100,3	<0,5	19
BL26	14,96	5,90	67,84	0,72	0,06	0,08	<0,01	<0,05	0,68	0,67	9,66	<0,01	0,02	100,6	<0,5	63
BL28	68,01	5,99	19,60	0,04	0,19	0,08	0,06	<0,05	0,56	0,19	4,42	<0,01	0,02	99,14	<0,5	11
bloc ferruginisé inclus dans la cuirasse																
PIÉLA																
BL13	18,47	9,85	65,17	0,05	0,14	0,17	<0,01	<0,05	0,41	0,29	4,76	<0,01	0,03	99,31	<0,5	46
RISSIAN																
BL37	2,83	3,72	80,47	0,04	0,16	0,02	<0,01	0,02	0,48	0,57	12,07	0,08	<0,02	100,4	<0,2	<5
BL38	5,58	1,56	81,57	<0,01	0,08	0,08	0,22	0,13	0,04	0,53	10,65	0,08	<0,02	100,4	<0,5	8
BL39	10,84	7,92	74,51	<0,01	0,09	0,19	<0,01	0,01	0,55	0,36	6,58	0,10	0,02	101,2	<0,5	29
BONGA																
BL47	4,70	3,40	78,36	0,04	0,12	<0,01	<0,01	0,02	0,12	0,04	11,10	<0,01	<0,02	97,9	<0,5	18
BL48	2,97	2,52	86,03	0,50	0,21	0,05	<0,01	0,03	0,04	0,03	7,35	0,01	<0,02	99,73	<0,5	17
BL50	3,54	1,03	83,79	0,06	0,19	<0,01	<0,01	0,01	0,03	0,07	10,24	<0,01	<0,02	98,96	<0,5	<5
passée enrichie en oxyhydroxydes de fer																
GOUNDI																
BL32	8,90	7,49	70,96	0,13	0,08	<0,01	<0,01	0,02	0,66	0,16	12,23	0,06	<0,02	100,7	<0,2	5
BL33	3,29	1,00	85,20	3,21	0,17	0,13	<0,01	0,02	0,04	0,04	6,16	0,04	<0,02	99,26	<0,2	<5
GANGAOL																
BL44	4,11	3,95	69,29	7,00	0,05	0,04	<0,01	0,24	0,04	1,39	12,67	0,04	<0,02	98,78	30,3	279
TIN AKOF																
BL51	7,12	2,23	79,41	0,04	0,17	0,80	<0,01	0,01	0,12	0,63	11,38	<0,01	<0,02	101,9	<0,5	327
BL52	19,13	9,93	58,03	0,06	0,17	0,23	<0,01	0,11	0,43	0,35	11,64	<0,01	0,03	100,1	<0,5	66
BL53	21,39	2,25	66,23	0,30	0,18	0,13	<0,01	0,26	0,08	0,09	9,46	0,01	0,03	100,4	<0,5	83
BL54	8,53	4,64	74,63	0,07	0,07	0,11	<0,01	0,03	0,17	0,32	11,14	<0,01	0,02	99,71	<0,5	224
BL55	17,39	1,71	69,90	0,12	0,20	0,25	<0,01	0,04	0,04	0,49	9,85	0,02	0,03	99,99	<0,5	45
cuirasse																
BONGA																
BL49	7,54	18,36	57,53	0,05	0,06	0,05	<0,01	0,02	0,5	0,2	12,52	0,01	0,04	96,83	<0,5	27
bauxite																
RISSIAN																
BL36	2,80	65,68	3,76	<0,01	0,03	0,11	0,08	0,04	3,69	0,18	22,91	0,14	<0,02	99,36	<0,2	<5
pierres volantes																
GOUNDI																
BL35	17,92	7,12	61,80	0,07	0,05	0,16	0,85	0,87	0,43	0,44	9,66	0,03	<0,02	99,39	<0,5	<5
KWADEMEN																
BL3	12,45	10,19	63,80	0,02	0,06	0,04	<0,01	0,05	1,36	0,89	10,50	<0,01	<0,02	99,36	<0,5	5

Alain BLOT - Quelques ferruginisations du Burkina Faso - Annexe I

	Au*	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	La	Li	Mn	Mo	Nb	Ni	p 2 Os*
chapeaux de fer																
PERKOA																
BL1		16800	♁	3	6	59	96	497087	<10	6	♁	542	7	21	7	
BL2		1777	♁	5	30	217	100	496318	<10	26	♁	2401	31	25	13	
SA-1		>2000	♁	24	47	25	184	508278	♁	<5	2	33844	7	<1	17	
SA-2		>2000	♁	18	109	60	209	106943	11	21	28	52700	27	14	33	
SA-3		259	♁	5	8	95	21	362936	♁	<5	<1	774	11	5	8	
SA-4		277	♁	3	3	39	10	366503	♁	<5	<1	232	67	7	5	
SA-5		>2000	♁	13	18	59	84	39588	<10	♁	22	69300	2	♁	24	
SA-6		400	♁	7	4	59	23	349437	♁	6	<1	310	34	9	5	
SB-1		333	♁	3	5	88	19	361677	♁	♁	<1	1162	11	7	8	
SB-2		>2000	♁	20	29	174	142	130374	11	15	23	148500	2	5	48	
SC-1		144	♁	6	6	227	67	518700	♁	♁	<1	1162	11	8	8	
SC-2		290	♁	5	6	156	49	497507	♁	7	<1	1859	12	6	8	
SD-1		>2000	♁	14	7	112	50	323977	♁	♁	3	52100	5	♁	11	
BAVILA																
BL17		160	♁	1	6	84	160	308870	<10	6	♁	852	2	♁	10	
BL18		215	♁	1	39	275	117	454911	<10	34	3	852	<1	12	139	
KWADEMEN																
BL4		74	♁	<1	116	212	945	562834	<10	10	♁	774	4	29	1961	
BL5		202	♁	<1	18	89	2605	514713	<10	71	♁	774	<1	25	279	
BL19		90	♁	<1	14	148	515	586335	<10	♁	♁	1162	<1	52	5	
BL45	15	128	♁	1,1	22	83	89	458758	<10	10	♁	542	15	140	14	<10
BL46	10	187	♁	<1	66	49	285	632987	<10	♁	♁	2943	16	13	1852	<10
BL56	20	1116	♁	1,9	177	38	209	140446	17	33	22	193614	16	23	629	<10
diagnostic incertain																
PERKOA																
SE1		55	♁	<1	11	26	61	431830	♁	7	<1	465	10	♁	44	
PIELA																
BL14		329	♁	<1	242	127	123	397698	<10	8	21	5421	5	9	145	
DIANA																
BL20		358	♁	<1	17	16	228	315025	<10	11	5	1859	<1	12	28	
BL21		120	♁	<1	66	28	354	439314	<10	13	7	1549	<1	♁	274	
BL22		25	♁	<1	38	43	280	412596	<10	16	3	155	<1	♁	333	
BL26		402	♁	<1	92	83	483	474495	<10	♁	♁	5576	<1	9	188	
BL28		94	♁	<1	17	98	104	137089	<10	7	6	310	2	9	89	
bloc ferruginisé inclus dans la cuirasse																
PIELA																
BL13		101	♁	<1	8	55	69	455820	<10	14	♁	387	8	64	7	
RISSIAN																
BL37		7	♁	<1	24	63	444	562834	♁	<1	<1	310	3	32	79	
BL38		<5	♁	<1	9	22	187	570527	♁	♁	<1	<77	3	<1	38	
BL39		36	♁	<1	2	362	22	521148	♁	<1	<1	<77	3	♁	8	
BONGA																
BL47	5	<5	♁	2,4	271	8469	36	548076	<10	12	♁	310	13	♁	5968	<10
BL48	9	57	♁	1,7	568	896	42	601722	<10	11	♁	3872	14	♁	6876	<10
BL50	531	<5	♁	<1	165	2934	45	586055	<10	6	♁	465	14	♁	7187	<10
passée enrichie en oxyhydroxydes de fer																
GOUNDI																
BL32		39	♁	<1	29	298	153	496318	♁	6	<1	1007	6	27	57	
BL33		386	♁	1	157	2	99	595917	♁	21	<1	24860	4	10	130	
GANGAOL																
BL44	79	>2000	♁	4,8	2490	96	2401	484637	<10	37	16	54212	109	165	377	<13
TIN AKOF																
BL51	24	21	♁	3,3	57	19	30	555420	<10	79	♁	310	18	♁	119	19
BL52	4	204	♁	1,5	30	116	59	405881	<10	26	♁	465	20	119	85	<10
BL53	27	34	♁	<1	137	33	83	463234	<10	30	♁	2323	15	11	156	<10
BL54	8	27	♁	2,3	52	21	261	521987	<10	22	♁	542	18	143	90	<10
BL55	8	73	♁	<1	63	94	98	488904	<10	17	♁	929	16	31	165	<10
cuirasse																
BONGA																
BL49	7	24	♁	<1	42	8307	31	402384	<10	9	♁	387	11	20	382	<10
bauxite																
RISSIAN																
BL36		11	♁	<1	3	212	23	26299	<10	♁	<1	<77	2	6	9	
pierres volantes																
GOUNDI																
BL35		37	♁	<1	28	74	44	432250	♁	5	2	542	3	12	69	
KWADEMEN																
BL3		57	♁	<1	34	94	42	446238	<10	♁	♁	155	<1	24	59	

Alain BLOT - Quelques ferruginisations du Burkina Faso - Annexe 1

	Pb	Pt*	Ru*	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Te	V	W	Y	Zn	Zr ^{p3}
chapeaux de fer															
PERKOA															
BL1	3035			150	<5		<20	153	<5	<25	368	<20	<5	1623	<5
BL2	3744			531	<5		<20	231	<5	<25	454	<20	9	1054	27
SA-1	1276			64	6	<0,1	<20	50	<10	<10	48	<20	12	2009	<5
SA-2	618			89	14	1	<20	179	10	<10	188	<20	11	1187	5
SA-3	1147			23	<5	0,1	<20	33	<10	<10	127	<20	<5	228	11
SA-4	3078			369	<5	2	<20	48	<10	<10	145	<20	<5	158	6
SA-5	742			13	6	0,1	<20	77	13	<10	60	<20	10	1154	8
SA-6	6934			212	<5	1	<20	121	<10	<10	149	<20	5	303	<5
SB-1	860			58	<5	<0,1	<20	37	<10	<10	140	<20	<5	394	8
SB-2	4195			96	8	2,9	<20	106	14	<10	79	<20	13	1480	10
SC-1	1915			31	<5	<0,1	<20	38	<10	<10	159	<20	<5	832	<5
SC-2	3485			58	<5	<0,1	<20	113	<10	<10	154	<20	<5	460	6
SD-1	5367			30	<5	4,9	<20	51	<10	<10	111	<20	5	1103	8
BAVILA															
BL17	9			<5	<5		<20	11	<5	<25	114	<20	<5	272	13
BL18	<2			<5	16		<20	43	<5	<25	233	<20	12	442	84
KWADEMEN															
BL4	<2			<5	44		<20	15	<5	33	512	<20	9	200	<5
BL5	<2			<5	27		<20	279	<5	30	448	<20	12	162	<5
BL19	<2			<5	25		<20	6	<5	<25	865	<20	<5	118	<5
BL45	<2	<20	<50	<5	35		<20	13	<5	50	1546	<20	<5	99	58
BL46	8	85	<50	<5	<5		<20	11	<5	<25	271	<20	<5	84	<5
BL56	25	29	<50	<5	7		<20	859	107	<25	187	<20	31	138	56
diagnostic incertain															
PERKOA															
SE1	16			<5	17	<0,1	<20	21	<10	<10	86	<20	18	49	<1
PIÉLA															
BL14	<2			<5	25		<20	9	<5	<25	219	<20	18	122	9
DIANA															
BL20	<2			<5	35		<20	25	<5	<25	241	<20	12	154	70
BL21	13			<5	21		<20	66	<5	<25	136	<20	24	399	28
BL22	<2			<5	12		<20	7	<5	<25	106	<20	21	401	66
BL26	<2			<5	24		<20	14	<5	<25	207	<20	21	196	24
BL28	4			<5	25		<20	23	<5	<25	171	<20	13	114	63
bloc ferruginisé inclus dans la cuirasse															
PIÉLA															
BL13	12			<5	23		<20	38	<5	28	1023	<20	<5	112	26
RISSIAN															
BL37	<2			<5	12	<0,1	<20	3	<10	<10	436	<20	7	131	<5
BL38	<2			<5	6	<0,1	<20	4	<10	<10	58	<20	11	66	<1
BL39	<2			<5	8	<0,1	<20	12	<10	<10	96	<20	<5	23	<5
BONGA															
BL47	8	<20	<50	<5	15		<20	7	<5	<25	114	<20	12	326	19
BL48	47	<20	<50	<5	17		<20	10	13	<25	64	<20	9	363	<5
BL50	4	<20	<50	<5	11		<20	9	7	<25	25	<20	10	236	<5
passée enrichie en oxyhydroxydes de fer															
GOUNDI															
BL32	6			<5	44	<0,1	<20	4	<10	<10	393	<20	13	152	10
BL33	124			<5	22	<0,1	<20	29	<10	<10	204	<20	13	233	<5
GANGAOL															
BL44	895	180	<71	<5	129		<20	35	23	<25	1761	<20	53	343	7
TIN AKOF															
BL51	105	130	<50	<5	8		<20	17	<5	<25	119	<20	182	378	24
BL52	14	<20	<50	<5	13		<20	37	<5	<25	1267	<20	26	157	89
BL53	306	<20	<50	<5	7		<20	12	<5	<25	196	<20	84	418	33
BL54	69	<20	<50	<5	16		<20	17	10	<25	1602	<20	56	406	52
BL55	88	<20	<50	<5	<5		<20	15	<5	<25	428	<20	95	342	38
cuirasse															
BONGA															
BL49	<2	<20	<50	<5	24		<20	12	19	<25	248	<20	<5	65	86
bauxite															
RISSIAN															
BL36	<2			<5	7	<0,1	<20	5	<10	<10	89	<20	<1	9	36
pierres volantes															
GOUNDI															
BL35	2			<5	44	<0,1	<20	5	<10	<10	199	<20	18	116	<5
KWADEMEN															
BL3	12			<5	43		<20	2	<5	<25	446	<20	17	276	<5

Ferruginisations Nord Burkina
tableau des paramètres des principaux éléments

	statistiques					teneurs		effectifs		
	moyenne	écart type	coef variation	médiane	maximum	clarke	détection	non dosable	> 1 clarke	> 2 clarques
Mn	1781	11675	655	350	137000	950	10	0	25	13
As	49,45	74,51	151	26,16	472,09	1,5	0,1	1	138	128
Se	0,82	4,54	552	0	43,41	0,05	0,1	72	68	68
Be	5,71	5,92	104	3,93	34,20	2,6	0,1	0	92	56
V	332,9	423,0	127	172,7	2540	160	1	4	89	48
Cr	45,7	56,8	124	27,7	531,6	100	1	0	14	2
Co	39,1	66,7	171	23,5	705,7	20	1	0	78	35
Ni	68,7	61,6	90	44,4	283,6	80	1	0	41	17
Cu	55,8	56,4	101	34,9	290,1	50	1	0	51	20
Zn	239,1	309,9	130	120,5	1720	75	1	0	97	61
Pb	59,4	94,0	158	24,4	645,9	14	1	0	92	65
Bi	0,11	0,20	186	0,05	1,40	0,048	0,02	44	72	37
Mo	5,78	9,66	167	2,06	66,87	1,5	0,1	0	90	57
Sb	3,28	5,99	182	1,23	43,14	0,2	0,1	0	140	124
W	0,25	0,76	311	0	5,98	1	0,2	113	9	6
Re	0,002	0,002	105	0,002	0,009	0,0004	0,001	44	96	96
Tl	0,127	0,462	365	0,020	4,526	0,6	0,02	68	6	4
Th	2,1	3,4	165	1,1	27,6	12	0,1	2	4	1
U	5,7	3,9	68	5,0	24,5	2,4	0,1	0	115	74
P	688	625	91	509	3866	1000	10	0	26	7
S	237	286	120	142	1743	260	10	1	34	13
Y	35,7	27,0	76	27,6	124,6	30	0,1	0	66	23
Ag	0,048	0,092	193	0	0,534	0,07	0,05	86	29	13
Cd	0,167	0,363	217	0	2,016	0,11	0,1	88	44	24
In	0,008	0,023	293	0	0,144	0,049	0,02	119	8	3
Te	0,04	0,11	258	0	0,76	0,005	0,02	92	48	48
Ba	127,4	346,2	272	38,6	3640	500	1	0	6	2
Yb	3,0	2,3	74	2,3	12,3	3,3	0,1	2	57	12
Hg*	30,6	59,2	193	15,3	493,4	50	5	11	18	7
Pd**	1,2	3,1	258	0	21	0,6	4	116	24	24
Pt**	3,5	7,8	223	0	46	1	5	98	42	42
Au**	2,9	4,1	143	2	24	1,1	2	57	83	50
Au*	3,0	7,7	259	0	70,3	1,1	0,2	73	59	43

n = 140

**** en ppb et fire assay+ICP+OES**

*** en ppb et Eau régale+ICP+ICP-MS**

tous les autres éléments en ppm et Eau régale+ICP+ICP-MS

Analyses Actlabs, Ancaster, Ontario, Canada

ZONE 1	longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb
AB41	0	13	15	E	14	53	52	137000	30,3		12,8	46	24,2	706	177	223	622	22,3	0,58	3,77	1,52
AB42	0	11	54	E	14	52	29	771	52,9	0,3	34,2	87	25,2	23,1	74,8	23,9	108	8,59	0,50	0,87	0,89
AB37	0	11	36	E	14	52	39	175	6,9	0,1	6,0	29	9,4	4,7	19,4	3,4	56,7	8,12		0,33	0,66
AB38								474	16,1		3,1	46	20,6	30,4	48,8	15,6	217	170		0,62	0,66
AB39								512	25,3		8,9	31	12,5	22,6	32,1	13,4	84,3	9,75		0,50	0,80
AB40								710	109		13,5	27	12,6	103	193	27,7	545	40,2	0,03	0,94	1,22
AB40-1								731	117		11,0	29	23,9	103	194	25,3	532	30,4		0,79	0,95
AB13	0	10	36	E	14	50	44	436	2,0	0,1	0,7	15	19,2	10,8	23,6	5,6	50,9	3,13	0,05	0,25	0,27
AB13-1								60	1,5		0,3	7	66,9	1,9	8,0	3,3	15,9	2,20	0,08	0,65	0,62
AB36	0	10	28	E	14	51	59	3190	26,6	0,1	1,0	198	148	31,3	21,6	14,1	35,2	9,74	0,19	2,28	1,03
AB35	0	8	57	E	14	52	10	1130	61,1		11,9	103	13,3	55,7	42,4	31,0	153	17,7	0,06	0,84	0,77
AB34	0	8	52	E	14	53	20	4510	52,6		7,0	80	17,3	112	147	40,7	861	310		1,79	0,97

ZONE 2	longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb
AB33	0	4	53	E	14	56	6	20300	87,7		1,3	18	38,3	38,9	52,8	42,8	295	39,6		1,75	0,77
AB70	0	3	37	E	14	54	17	149	4,0		1,9	135	39,7	9,5	20,1	84,6	110	27,0		0,88	3,21
AB71								1360	1,8		1,0	291	175	11,5	11,1	34,4	36,7	24,2	0,40	4,10	0,63
AB72								324	19,9		5,2	301	35,6	38,8	109	93,2	609	34,8	0,09	1,62	10,3
AB74	0	3	35	E	14	53	48	189	20,0	0,1	2,7	443	89,4	20,3	46,0	57,4	129	54,0	0,46	1,98	0,89
AB73	0	3	31	E	14	54	11	782	14,2	0,2	3,2	893	95,1	21,5	32,0	128	178	25,6	0,11	4,87	1,08
AB12	0	3	15	E	14	55	7	372	53,9		26,0	99	20,0	33,6	115	49,9	1030	194	0,03	4,02	5,72
AB77	0	3	9	E	14	52	41	371	34,1		2,5	6	34,7	18,6	58,5	25,1	108	5,95		1,43	0,69
AB78								352	61,5	0,3	8,0	16	57,9	18,9	24,5	18,5	49,8	14,4		2,48	0,56
AB78-1								347	23,4		3,2	35	15,8	10,2	19,6	12,9	33,8	22,0		2,84	0,40
AB78-2								240	6,6		3,2	38	20,9	14,2	21,2	18,0	66,0	12,8		2,17	1,16
AB79	0	3	6	E	14	52	22	1080	4,7		1,9	128	6,4	37,4	49,8	28,1	119	73,4		2,13	4,00
AB11	0	3	2	E	14	54	39	370	227	22,8	9,9	420	115	53,9	198	157	821	188	0,06	7,25	13,5
AB11-1								915	289	43,4	19,2	591	48,0	82,3	242	214	1590	311	0,09	8,25	26,6
AB82	0	2	56	E	14	52	42	443	14,4		2,5	76	10,4	19,2	55,6	35,6	50,9	34,8	0,07	6,59	0,38
AB83								1220	6,2		1,3	59	8,6	62,9	69,2	16,5	68,9	12,6	0,05	1,71	0,36
AB10	0	2	54	E	14	54	43	7870	280		22,5	633	38,4	186	240	290	1400	403	0,11	12,6	20,6
AB10-1								496	446	3,3	11,0	692	103	34,1	119	172	659	490	0,05	10,8	43,1
AB10-2								613	178	0,4	2,8	179	88,3	48,8	284	46,2	596	57,0	0,09	10,0	13,2
AB84	0	2	49	E	14	52	44	1420	14,9		3,7	46	29,0	79,4	190	18,8	185	11,0	0,04	0,96	0,51
AB84-1								771	28,3		2,0	166	38,9	65,0	103	29,5	265	28,0	0,03	2,08	0,41
AB85	0	2	46	E	14	52	46	1120	30,7		1,6	184	43,4	44,4	78,5	34,3	124	23,1		1,65	2,76
AB85-1								856	22,5		1,3	163	22,2	30,9	58,9	24,2	102	31,8		1,60	2,82
AB86	0	2	34	E	14	52	58	102	18,9		1,8	85	16,5	11,4	32,5	33,6	44,8	11,2		1,48	1,20
AB86-1								135	5,2		2,2	145	14,2	9,9	30,7	55,3	64,7	24,7		2,48	1,94
AB80	0	2	25	E	14	50	39	946	2,2		0,8	57	52,6	10,8	15,6	85,8	14,6	11,1		0,91	0,35
AB81								2010	5,4	0,2	0,6	28	21,1	18,0	10,2	75,5	10,6	129	0,15	1,78	1,47

ZONE 1	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB41		0,002	1,91	2,2	3,4	314			6		3866		24,5	0,53	0,7		0,30	940	2,0
AB42		0,002	0,19	0,8	5,8	12					2155	50	58,3					93,2	3,9
AB37				0,3	0,6	8			6		655	48	17,6					18,7	1,6
AB38				0,4	1,6	28		2			739	109	14,8					30,6	1,3
AB39		0,002	0,03	0,5	1,8	18	4,2				1168	217	22,2					39,8	1,8
AB40		0,004	0,02	0,5	1,9	30					2275	143	57,9		0,1			91,9	4,1
AB40-1		0,001	0,03	0,6	1,4	30		2	5		1892	131	53,9		0,1			51,3	4,2
AB13			0,05	1,2	0,5	8	4,2				217	68	5,0				0,07	116	0,4
AB13-1	0,4		0,03	1,3	0,2		11,2				79	26	1,2					51,4	
AB36	0,2	0,001	0,09	3,3	1,6	19					180	114	5,6			0,02	0,12	655	0,6
AB35			0,08	0,2	3,9	20	3,3				1346	123	31,7					84,6	1,9
AB34			0,37	0,7	3,8	19	7,4		5		1304	59	30,8	0,07	0,2			566	2,8
ZONE 2	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB33		0,002	4,53	0,3	2,8	165	5,1	4			3759	452	13,5	0,10	1,4			3640	0,9
AB70				0,4	3,3	15		2	5		147	443	15,7	0,08				86,6	1,5
AB71			0,10	4,0	4,0	9			5		298	136	10,0	0,06		0,04	0,26	273	1,3
AB72		0,001		0,3	2,4	14	0,5	2			520	1101	31,6		0,4			24,4	3,4
AB74				5,7	5,2	16					285	123	23,3			0,07	0,40	29,3	2,8
AB73		0,004	0,08	4,2	10,6	6	0,5	5			754	91	36,4			0,04	0,10	131	4,2
AB12	0,5	0,001		1,2	11,7	24	3,3	2			1778	185	61,2		0,3			23,1	4,1
AB77				0,4	4,8	6	1,9	3			519	55	25,0	0,14				48,7	2,3
AB78		0,005		0,2	5,7	8					929	40	45,9		0,1			28,4	3,4
AB78-1		0,001		0,9	3,3	25					548	641	31,8					66,8	2,8
AB78-2		0,001		0,9	3,1	11	1,4	2	6		439	136	21,5		0,1			61,8	1,8
AB79		0,002	0,02	3,7	3,4	6	4,2	2	10		89	100	16,7		1,7			30,8	1,3
AB11	3,2	0,003	0,06	13,7	5,8	77	0,5			5	771	380	53,7	0,06	0,7			70,0	5,5
AB11-1	0,5	0,002	0,19	20,9	9,8	97		3	7	4	974	417	74,5	0,15	1,5			152	7,8
AB82		0,002		1,3	6,0	6	0,9	5	17		321	799	31,2					27,8	3,6
AB83				0,5	3,7						169	1356	10,4		0,1			22,6	0,8
AB10	0,9	0,007	1,86	6,8	16,4	80	1,9	2	5	4	2194	504	109	0,25	2,0		0,07	1310	9,5
AB10-1	0,6	0,009	0,26	27,6	24,5	31					1355	1390	54,1	0,10	1,6	0,02		155	5,0
AB10-2	0,6	0,002	0,05	7,0	4,8	14	1,4	2			434	94	20,1		0,1			41,0	3,5
AB84		0,005		1,3	5,1	43		2			793	290	41,2	0,05	0,2			62,0	4,1
AB84-1		0,003	0,02	1,3	4,7	16	1,9		6		352	1089	42,3		0,2			107	3,6
AB85		0,003		1,7	3,5	10		3	6		441	583	26,0	0,08				75,7	2,6
AB85-1		0,001		1,9	2,4	37		6	6		400	432	19,0	0,08	0,3			80,4	1,8
AB86				0,2	1,2						206	69	13,2					15,9	1,1
AB86-1		0,002			4,9	8		2	14		471	226	20,0					15,5	2,3
AB80		0,002	0,06	1,1	1,5	13					192	173	4,2					108	0,4
AB81		0,001	1,26	0,7	1,0	7	1,4	4			197	251	6,7	0,11				327	0,6

ZONE 3		longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb
AB87		0	2	4	E	14	52	43	495	1,9	0,1	3,9	35	30,9	11,1	38,0	4,4	44,4	8,95		0,74	0,60
AB88									1650	2,2	0,4	2,4	702	13,0	23,1	19,0	48,9	64,5	13,2	0,10	0,98	0,87
AB117		0	1	15	E	14	52	43	59	3,7		3,5	97	16,7	8,7	32,7	12,8	90,6	15,9		0,37	0,83
AB117-1									308			11,5	231	15,7	37,8	133	26,6	251	65,4		0,48	3,06
AB116		0	0	52	E	14	53	2	492	9,0	0,2	4,5	157	22,5	26,5	48,8	10,5	97,3	21,3	0,09	0,87	0,56
AB115		0	0	21	E	14	53	11	396	10,0		7,3	86	5,5	8,6	24,9	16,0	33,5	13,4	0,03	1,20	0,49
AB114		0	0	11	W	14	53	9	163	20,2		6,9	492	14,5	16,2	40,1	34,9	121	13,4	0,14	2,23	0,88
AB114-1									199	64,7	1,2	3,3	1310	160	20,3	45,0	51,5	118	46,7	0,83	8,73	1,79
AB113		0	1	37	W	14	53	31	432	70,2	0,6	34,2	337	30,4	42,3	133	84,2	184	54,2	0,11	1,34	3,60
ZONE 4		longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb
AB112		0	3	17	W	14	53	50	376	70,0		7,4	725	33,3	41,3	118	97,8	323	99,8		3,65	17,1
AB111		0	3	24	W	14	53	45	588	27,7	0,3	15,3	130	29,4	11,3	38,1	33,8	93,6	12,7		1,37	1,06
AB107		0	3	33	W	14	54	33	645	1,1		1,8	145	28,4	19,5	23,2	18,4	68,9	7,03		1,27	0,31
AB108		0	3	35	W	14	53	44	257	3,0	0,2	1,6	47	18,1	7,1	17,5	10,1	60,2	8,52		0,51	0,31
AB109		0	3	48	W	14	53	48	127	28,1	0,1	3,3	2010	72,4	19,2	36,3	102	130	18,6	0,05	9,39	0,77
AB110		0	4	0	W	14	53	43	306	49,9		7,0	264	76,4	90,7	185	55,4	754	83,6		6,21	8,51
AB68		0	4	44	W	14	52	54	115	3,6		4,9	34	16,4	10,2	44,5	19,9	176	17,2		0,72	1,24
AB67		0	5	5	W	14	53	8	81	4,6		1,6	133	35,8	4,7	10,8	31,0	66,1	8,63	0,08	1,92	0,29
AB66		0	5	34	W	14	52	24	169	7,4		1,7	187	22,6	12,4	25,9	24,6	76,0	26,8	0,09	1,20	1,03
AB64		0	6	6	W	14	52	31	651	5,1		4,7	37	21,8	9,9	34,5	21,5	78,4	23,5	0,06	0,69	1,72
AB65									280	11,3	0,1	3,4	45	25,0	12,6	31,2	12,0	64,7	2,41	0,03	0,63	0,67
AB63		0	6	28	W	14	52	31	277	3,9		4,9	82	23,4	8,7	22,8	23,5	55,1	13,9	0,09	1,06	0,55
AB62		0	6	45	W	14	52	29	137	11,6	0,2	3,4	827	27,0	6,0	23,0	36,2	76,9	8,83	0,23	1,96	0,54
AB8		0	7	27	W	14	52	16	615	33,7		4,5	1250	8,5	32,7	40,3	27,7	277	69,0	0,17	1,78	1,38
AB9		0	7	29	W	14	52	19	287	59,4	0,2	19,0	147	46,0	33,5	110	44,1	388	112	0,16	2,75	2,85
AB7		0	7	34	W	14	52	19	190	61,2	0,3	7,6	1240	27,2	13,7	34,3	30,2	198	48,4	0,10	3,27	1,60
AB7-1									156	25,9	0,2	6,5	102	18,0	9,7	19,7	13,5	71,6	38,2	0,08	1,38	0,41
AB6		0	7	39	W	14	52	25	390	77,4	0,4	13,3	133	19,2	37,6	101	43,2	237	47,5	0,17	3,60	1,13
AB6-1									273	72,8	0,8	8,7	441	131	25,0	80,8	95,8	158	61,9	0,18	8,94	4,82
AAB6									234	146	0,8	19,7	108	66,5	29,6	60,9	40,5	264	71,1	0,15	2,91	1,10
AB5		0	7	42	W	14	52	26	81	55,1	0,1	10,0	231	99,4	18,9	57,7	48,6	129	42,8	0,18	16,6	0,36
AB4		0	7	50	W	14	52	31	254	47,7	0,2	17,0	143	29,3	32,6	117	29,1	165	31,5	0,31	2,05	1,49
AB3		0	7	52	W	14	52	26	163	39,6	23,0	3,0	188	89,8	24,7	54,7	34,9	123	32,4	0,40	2,92	3,30
AB2		0	7	55	W	14	52	31	162	95,9	0,2	13,7	160	47,6	32,8	78,2	33,7	195	40,4	0,56	1,77	1,32
AB133									196	14,3	0,6	8,4	36	9,2	10,1	23,2	8,1	73,1	37,8		1,62	0,21
AB1		0	8	7	W	14	52	53	214	40,4	0,5	6,3	1930	46,0	31,4	47,1	137,0	156	13,8	0,60	9,23	1,12

ZONE 3	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB87		0,001	0,02	0,9	2,0	33	2		5		427	30	22,0					31,6	1,4
AB88			0,56	0,9	6,5	6			23		189	180	28,2	0,06				313	2,4
AB117		0,001		0,9	5,2		5				207	49	32,6					4,2	2,3
AB117-1		0,004		0,8	6,4	6	2,3				532	65	83,0					10,2	6,0
AB116		0,004		2,7	5,3	5					494	123	55,7	0,05				13,5	4,4
AB115		0,003		0,6	7,4	6					816	63	46,8					18,2	3,4
AB114		0,003		2,0	7,3	7					688	110	76,5			0,07		17,5	7,0
AB114-1	0,9	0,001		12,9	10,4	15					511	75	50,7	0,06		0,12	0,52	17,5	5,6
AB113	0,6	0,003	0,02	2,6	10,0	11	0,5				2252	163	122		0,2	0,09	0,09	70,4	7,6

ZONE 4	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB112		0,001		2,0	17,3	29					1066	167	62,2		0,5		0,09	121	5,8
AB111	0,4	0,001		3,2	8,0	51	3				1683	396	89,6					235	5,7
AB107			0,05	1,0	5,0		4				105	56	21,0				0,04	127	2,2
AB108				0,9	3,8	39	39,6				232	339	15,8	0,06				49,5	1,4
AB109				3,0	13,5	8					470	107	32,2			0,04	0,10	7,6	4,0
AB110	1,3	0,002		0,6	8,5	9				10	507	170	73,4		0,4		0,04	58,9	5,4
AB68		0,001		0,9	4,2	17	5,6				400	117	29,4		0,1			18,7	2,3
AB67		0,001		1,8	7,0	18	3,3				253	73	9,3					10,3	1,1
AB66		0,002		2,2	4,6	19					401	255	18,5				0,03	106	1,8
AB64		0,002	0,02	1,1	2,0	6					369	40	45,7					86,8	4,2
AB65		0,002		0,3	1,7		4,2				511	54	7,5					31,1	0,4
AB63				2,4	3,6	12					565	118	26,1					31,1	1,8
AB62				3,4	4,7	12	3,3				464	192	21,6	0,43				31,4	1,9
AB8		0,004	0,03	0,6	5,0	9	20,0				594	577	59,5		0,2			33,9	4,9
AB9		0,002		1,6	9,3	17	10,7				1699	263	81,9	0,05	0,4			42,0	7,2
AB7		0,006	0,02	1,2	7,0	17			6		1294	142	43,8		0,1			29,9	4,1
AB7-1		0,002		0,8	3,9	74			7	4	998	122	23,7					33,7	2,0
AB6		0,002	0,08	1,8	6,3	13					988	208	82,4	0,06	0,1			56,3	7,1
AB6-1	2,7	0,006	0,03	1,9	6,3	17					1077	141	57,5		0,2		0,05	25,4	7,0
AAB6	0,5	0,008	0,04	1,4	7,0	18					1529	90	119	0,06				35,7	8,6
AB5	2,3	0,002	0,04	1,2	5,2	8					550	45	54,2					14,6	5,1
AB4	0,7	0,004	0,05	1,6	3,6	9					1472	389	97,8					32,6	7,9
AB3			0,08	2,4	3,7	8	2,3				556	491	21,1				0,07	20,0	1,8
AB2		0,004	0,12	2,5	3,3	13	3,3				1008	89	56,6	0,06	0,1		0,04	24,2	4,0
AB133		0,002	0,06	0,4	6,0	6					517	85	54,4					16,7	4,4
AB1		0,001	0,08	4,2	8,9	15					925	112	30,6	0,06		0,06	0,10	34,7	3,8

ZONE 5	longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb	
	AB58	0	9	4	W	14	52	23	443	4,7		2,1	122	28,7	18,9	34,3	30,8	103	15,1	0,06	0,81	3,17
AB59								69	3,7	0,1	1,0	140	28,7	4,5	9,6	11,6	52,4	5,47	0,04	0,96	0,22	
AB60								90	3,7		5,1	474	12,7	9,9	27,8	27,9	87,4	20,9		1,33	3,17	
AB61								2190	17,2		4,3	107	19,6	72,6	145	27,0	465	13,3	0,05	1,11	1,34	
AB55	0	9	8	W	14	52	32	301	20,5	0,2	2,3	457	26,5	24,7	38,3	39,1	134	10,3	0,22	1,34	0,44	
AB56								173	15,5		2,3	502	55,9	9,9	25,5	50,6	63,6	12,7	0,12	1,77	1,88	
AB57								134	10,6	0,5	4,9	178	8,1	10,6	31,5	29,0	73,5	15,8	0,06	0,86	2,02	
AB54	0	9	15	W	14	52	30	63	52,0	0,5	4,0	1480	35,4	14,2	38,3	79,1	106	22,5	0,19	5,51	1,86	
AB52	0	9	20	W	14	52	33	182	37,1	0,1	1,9	404	24,8	16,2	23,2	32,2	53,9	6,73	0,29	4,08	0,26	
AB53								118	39,8	0,1	5,3	1430	28,2	14,8	29,5	75,3	88,4	9,63	0,19	10,9	0,64	
AB50	0	9	25	W	14	52	30	190	4,8	0,2	1,8	460	36,0	11,9	28,8	42,7	117	21,2	0,07	1,31	0,61	
AB51								106	34,3	0,1	2,6	781	47,5	15,8	36,7	78,1	156	29,1	0,04	2,12	2,11	
AB48	0	9	33	W	14	52	31	149	10,4	0,3	3,7	237	12,4	12,4	29,4	24,2	97,5	34,3		0,92	1,65	
AB49								63	2,9		0,8	201	12,2	3,2	9,6	9,6	46,4	11,2		0,47	1,83	
AB45	0	9	44	W	14	52	33	125	7,2		6,8	554	22,8	12,1	31,1	26,6	66,4	10,3	0,08	0,95	3,05	
AB46								211	9,9		7,6	322	9,3	12,8	33,2	16,4	93,0	15,9	0,06	0,81	1,83	
AB47								593	1,7		6,3	294	5,4	8,3	20,3	14,7	66,6	3,99		0,58	0,49	
AB44	0	9	57	W	14	52	40	127	2,6		6,3	1240	19,2	21,6	57,4	64,6	98,1	12,8	0,02	1,25	8,32	
AB20	0	10	36	W	14	53	32	1920	48,9	0,2	3,8	165	23,2	164	145	83,7	502	270	0,04	1,74	0,57	
AB21								344	26,4	0,2	4,7	25	31,4	38,0	53,8	23,0	272	138	0,05	0,91	0,22	
AB22								340	50,3	1,0	6,0	118	57,1	29,9	47,6	33,9	206	176	0,05	1,67	1,04	
AB31	0	10	44	W	14	52	3	385	11,7		0,6		79,8	5,0	9,4	3,2	12,3	2,35		7,53	0,82	
AB32								144	16,5		0,8		130	5,6	18,9	3,7	14,9	2,38			12,2	1,29
AB17	0	10	53	W	14	53	48	360	55,8	1,1	2,2	771	532	34,1	28,2	107	115	60,1	1,18	9,22	1,84	
AB18								432	100	0,5	1,8	70	115	63,1	38,0	52,4	203	210	0,10	4,58	1,31	
AB19								247	256	3,0	6,3	448	24,4	75,5	95,4	145	331	185	0,07	12,5	9,82	
AB 23	0	10	55	W	14	53	0	224	69,2	0,3	6,0	419	17,6	34,5	59,6	53,7	248	38,8	0,09	3,08	2,15	
AB24								166	33,9	0,2	6,1	362	15,3	24,0	44,2	58,0	163	37,9	0,08	1,85	2,74	
AB25								155	5,2	0,2	3,9	895	28,2	18,3	40,8	84,7	131	19,2	0,06	1,19	3,75	
AB29	0	11	20	W	14	52	14	206	4,0		0,6		58,6	2,2	10,1	5,8	9,6	2,45		9,72	1,03	
AB26	0	11	39	W	14	52	30	140	18,8	0,1	0,5	939	70,9	2,9	4,8	24,2	30,3	14,2	0,10	6,38	0,33	
AB27								159	42,3	1,0	0,7	1030	101	1,5	4,7	28,6	20,0	8,83	0,10	5,98	0,44	
ZONE 6	longitude				latitude			Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb	
AB89	0	10	38	W	14	58	23	1950	35,3	0,4	6,4	357	43,4	85,7	65,9	44,2	190	24,0	0,17	5,83	0,45	
AB90	0	11	12	W	14	58	49	893	83,2	0,2	5,2	227	97,5	52,8	91,5	27,2	343	11,5	0,13	7,95	0,80	
AB91	0	11	34	W	14	59	3	169	48,8		1,6	561	76,6	3,5	7,1	10,8	28,1	6,83	0,02	1,66	0,47	
AB92	0	11	36	W	14	59	27	823	146		7,8	282	106	24,1	84,1	38,0	695	646	0,04	15,4	36,9	
AB93	0	12	6	W	15	2	2	6180	4,3		1,9	20	12,0	28,1	30,1	69,9	105	5,43	0,03	0,97	0,26	
AB93-1								1400	2,3		5,9		15,6	17,8	34,5	74,8	134	6,28	0,06	1,08	0,33	

ZONE 5	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB58			0,02	1,5	4,0	32	1,4				222	322	27,8		1,2		0,03	27,6	2,3
AB59		0,001		0,7	3,6	7	1,4	2		6	143	227	8,6				0,06	28,0	0,7
AB60		0,003		1,2	7,1	18					689	97	30,9					25,8	2,5
AB61		0,003	0,03	1,0	4,7	18	2,3				319	182	73,8		0,1			46,2	5,8
AB55				2,4	6,2	14		10		6	748	386	23,8					140	2,0
AB56				1,1	3,2	16	70,3	24	8	21	382	140	16,5				0,04	26,7	1,6
AB57				0,6	3,4			5	12	10	347	72	55,7					35,3	4,2
AB54		0,004		2,8	9,0	20					670	119	32,4			0,03		19,5	3,3
AB52			0,02	1,7	8,2	12	3,3				363	73	28,5					11,2	2,5
AB53		0,004	0,02	2,3	7,8	12		3	5		787	140	19,8			0,03	0,04	17,9	2,2
AB50		0,001	0,03	3,0	7,3	33					297	166	24,2				0,03	37,4	2,3
AB51		0,001	0,02	3,6	5,5	10		9	7	11	391	66	35,8			0,03	0,06	19,2	3,5
AB48			0,05	0,6	5,2	17		3		4	323	74	46,5					42,9	3,6
AB49		0,002	0,04	0,5	1,4	6		2			173	97	6,9					20,4	0,7
AB45			0,08	0,6	3,8	10		2			621	187	30,2					51,2	2,4
AB46			0,06	0,7	5,0	10					547	107	43,6					49,9	3,0
AB47			0,06	0,1	4,6						469	77	27,2	0,06	0,1			14,3	1,9
AB44		0,003	0,07	1,9	6,0	13					583	70	48,3			0,03	0,05	19,7	4,3
AB20		0,005		1,7	7,5	40	3,7				199	266	63,5	0,07	0,2			22,8	6,9
AB21		0,002		2,8	3,4	34	6,1				747	35	84,3		0,1			13,9	4,6
AB22	0,5	0,009	0,02	3,6	5,4	63	1,9				974	70	125	0,06	0,1		0,03	34,0	9,6
AB31	3,1			0,4	0,7		8,4	3			84	211	10,7					857	0,5
AB32	6,0	0,003			0,8	11	11,6	7			86	21	2,1	0,05				117	0,1
AB17		0,003		10,1	13,7	61	9,3	2	5		603	196	27,5	0,19		0,14	0,76	29,2	4,0
AB18	3,3	0,005	0,05	3,6	5,3	55	8,8		9	5	158	302	37,5	0,06			0,05	59,4	4,9
AB19		0,004		1,4	15,9	224	4,2	3			619	31	92,0	0,05	0,1			11,2	12,3
AB 23		0,003		1,1	7,6		14,0				859	135	60,4					27,0	4,1
AB24		0,001		1,4	6,9	6	10,7	2			763	74	52,4				0,05	21,7	4,0
AB25		0,002		1,3	6,3	15	1,4				545	221	21,8				0,09	78,8	2,0
AB29	0,8	0,001		0,1	0,6	6	1,9	11			60	18	1,3					35,3	
AB26				2,5	4,1	52	6,1				520	173	3,0	0,07		0,05	0,14	17,8	0,4
AB27				3,2	3,9	38	0,9	2			866	133	3,3	0,10		0,06	0,41	31,6	0,4
ZONE 6	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB89		0,002	0,39	3,8	6,8	18		2			103	170	51,4		0,1	0,03	0,07	292	5,2
AB90	1,4		0,30	2,1	5,9	15		2			411	408	25,0	0,06	0,1			275	2,5
AB91		0,003	0,09	1,6	1,3	51		2	5		504	626	11,5					182	0,8
AB92	0,5	0,003	0,47	0,3	4,1	493					388	948	22,6		0,3	0,02	0,57	112	1,9
AB93			0,85	1,3	1,4	222		2			1032	1743	3,3	0,10	0,2			138	0,3
AB93-1			0,28	0,8	4,2	55		2			2099	51	7,0					144	0,7

AB94	0	13	31	W	15	2	8	2180	9,8	4,7	3	13,1	68,4	72,7	75,5	520	47,2	0,03	1,37	1,92
AB95	0	13	46	W	15	1	30	1040	27,8	9,1	7	11,4	24,3	201	115	442	2,78	0,03	0,97	1,14
AB95-1								922	60,2	8,9	13	19,8	33,3	196	107	503	5,88		2,22	5,28

ZONE 7	longitude			latitude	Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb			
AB97	0	20	16	W	14	50	6	483	15,8	0,1	2,8	21	32,4	5,4	6,7	2,4	25,9	16,9	0,06	3,93	1,24
AB98	0	20	23	W	14	49	35	272	14,2		3,9	161	13,9	26,8	61,8	35,7	210	4,21	0,04	3,32	1,43
AB99								153	15,9		5,7	898	52,8	51,5	225	115	440	168	0,07	14,9	7,67
AB100								3880	81,8		6,1	220	6,0	51,0	97,6	27,4	247	40,3	0,05	7,48	6,95
AB101								1020	47,2		6,1	326	26,6	127	160	87,3	668	295	0,11	18,2	6,38
AB102	0	21	36	W	14	48	23	1750	55,0		2,5	222	20,6	133	160	83,3	341	185	0,02	8,30	1,97
AB102-1								561	87,5		4,2	167	58,4	134	240	54,0	1720	131		17,3	4,73
AB102-2								2030	48,0		2,3	202	19,2	170	198	71,0	374	146		8,71	1,92
AB103								1060	51,6		1,1	229	14,9	112	164	65,3	762	125		8,28	2,13
AB104								644	62,1		1,2	492	17,2	91,1	105	96,2	911	130	0,07	6,81	5,42
AB105	0	23	3	W	14	47	13	138	24,7		21,6	59	23,7	26,4	95,9	39,8	1540	50,5	0,04	5,24	6,75

ZONE 8	longitude			latitude	Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb			
AB118	1	14	27	W	14	44	24	597	229		4,9	528	26,9	26,3	62,4	278	158	49,4		64,4	11,2
AB118-1								62	52,8	0,2	0,6	627	210	6,9	15,7	28,0	39,4	28,9	1,40	34,4	1,01
AB119	1	14	42	W	14	44	35	474	80,4	0,3	1,0	2540	77,2	18,3	35,0	55,7	62,2	42,7	0,09	66,9	2,13
AB120	1	15	33	W	14	44	47	174	10,6	0,3	0,4	379	142	2,0	4,5	19,3	18,7	30,9	0,34	6,27	0,72
AB122	1	17	10	W	14	42	37	287	59,7	0,2	3,1	410	48,3	33,0	38,7	226	79,2	67,5		32,0	5,31
AB123								769	26,9	0,3	1,4	463	31,9	13,4	27,1	120	37,7	119		19,4	5,40
AB121	1	17	17	W	14	43	0	491	246	0,2	3,7	222	177	43,6	98,7	141	195	20,2	0,03	15,1	6,07
AB121-1								720	82,1		3,0	108	32,2	43,9	133	46,4	186	48,2	0,03	38,1	8,90
AB125	1	17	37	W	14	41	34	182	57,7	0,3	6,1	324	32,1	41,3	110	197	120	13,3		18,1	7,86
AB125-1								473	93,8		7,2	230	67,1	84,8	130	107	250	144	0,05	12,3	1,41
AB124	1	17	38	W	14	41	40	334	20,4	0,2	2,1	590	23,0	29,0	65,9	276	89,1	69,1		19,6	14,1

autres	longitude			latitude	Mn	As	Se	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	Mo	Sb			
AB16	0	14	45	W	14	55	35	166	6,3	0,2	7,7	108	14,1	30,0	61,1	10,3	151	24,6	0,09	1,37	1,06
AB16-1								184	6,1	0,2	6,1	125	25,3	22,8	66,7	7,6	112	13,0	0,09	2,00	0,54
AB106	0	16	36	W	14	51	27	107	8,5	0,1	0,3	8	46,3	3,3	8,1	4,2	44,3	4,48		3,13	0,78

limite dosage

-0,1 -0,1 -1,0

-0,02

AB94	0,001	0,19	0,8	1,3	23	1,4		5			1294	74	19,8					251	1,4
AB95		0,45	0,4	3,1	205			2			1612	308	30,2		1,0			191	1,9
AB95-1	0,002	0,33	0,3	2,3	136						1129	1341	21,6		0,8			206	2,0
ZONE 7	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB97	1,1	0,002	0,08	0,4	0,9	6	1,9	2			102	149	8,2					169	0,6
AB98			0,04	0,6	9,5	18		8	5	4	113	222	16,7		0,4			28,6	0,9
AB99	0,9	0,002	0,04	0,6	10,1	5	12,1	18			270	83	15,4	0,26	0,3		0,10	15,5	1,4
AB100			0,67	1,0	5,0	23		8		4	234	595	24,5	0,18	1,0			386	1,5
AB101			0,12	3,1	10,7	39	2,3			11	665	240	57,4		0,9		0,03	32,7	4,3
AB102		0,006		0,7	5,6	7	2,3	6	19	6	427	110	71,0	0,08				17,0	4,6
AB102-1		0,006	0,03	0,6	5,6	35	4,2	7	19	7	311	91	55,4	0,43			0,05	25,5	4,0
AB102-2		0,002		0,9	6,7	5		5	19	6	369	193	79,9	0,05				16,6	4,4
AB103		0,001	0,03	0,8	5,0	15	2,3	12	34	5	364	288	16,4	0,08	0,1			21,7	1,4
AB104		0,003	0,03	1,1	6,8	21	5,6	6	46	7	427	177	18,0		0,1		0,03	19,2	2,0
AB105		0,002		0,4	3,7	7	27,9	24		14	421	98	31,6					17,6	1,7
ZONE 8	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB118		0,002		0,2	10,1	19	3,3	11	13	8	917	331	24,0	0,23			0,03	127	1,6
AB118-1		0,004		8,3	8,4	25	1,4	3	12	7	177	177	5,8	0,44		0,12	0,31	60,3	0,7
AB119		0,001		2,5	6,8	15	2,3	6			183	70	15,0	0,05		0,04	0,10	110	1,2
AB120				5,3	2,3	35	0,5	3			338	173	3,4	0,23		0,05	0,12	66,7	0,4
AB122				0,4	14,2	14	1,4	4	7		476	216	20,4	0,10			0,03	78,4	2,4
AB123		0,001	0,04	0,4	6,9	14	0,5	6	31		302	208	9,6	0,12				337	1,2
AB121				0,6	10,8	19	1,9	10			902	358	15,5	0,12	0,5		0,06	190	1,3
AB121-1	0,3		0,17	0,5	4,4	14		7	5		727	170	6,5	0,25	0,2			253	0,4
AB125		0,003		0,3	12,6				10		709	122	36,9	0,06				34,5	2,5
AB125-1				1,3	13,5	21		2			1373	131	17,8	0,13	0,7		0,03	31,4	1,3
AB124		0,004	0,03	0,3	13,9	19		6	45	7	483	168	18,9	0,05				89,3	1,6
autres	W	Re	Tl	Th	U	Hg*	Au*	Au*	Pt*	Pd*	P	S	Y	Ag	Cd	In	Te	Ba	Yb
AB16		0,001		0,8	4,5	21	13,5				316	188	60,2		0,2			40,7	4,3
AB16-1		0,006		1,1	3,3	17	9,3				342	31	71,4	0,06				10,9	6,2
AB106	0,6			0,1	0,6	12	6,1	10			38	144	4,7					315	0,2
limite dose	-0,2	-0,001	-0,02	-0,1		-5	-0,2	-2	-5	-4		-10		-0,05	-0,1	-0,02	-0,02		-0,1