

THESE

Pour l'obtention du Grade de

Docteur de l'Université de POITIERS

(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)

(Diplôme National - Arrêté du 23 Novembre 1988)

SPECIALITE: GEOCHIMIE DE SURFACE

Présentée par:

Kodjo Adika TOGBE

**LES CHAPEAUX DE FER DU TOGO. ETUDE PETROGRAPHIQUE,
MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE.**

Directeur de Thèse: Mr. Yves BESNUS.

Soutenu le 27 Septembre 1991

devant la commission d'Examen

JURY

MM J. J. TRESCASES	Professeur Université Poitiers	Président
J. M. SCHMITT	Ecole des Mines, Fontainebleau	Rapporteur
Y. BESNUS	Chargé de recherche CNRS	
A. BLOT	Directeur de recherche ORSTOM	
A. DECARREAU	Professeur Université Poitiers	Examineurs
K. F. SEDDOH	Recteur de l'Université Lomé	

Introduction

Les chapeaux de fer du Togo, localisés dans l'unité structurale de l'Atacora, sont des formations superficielles fortement ferruginisées dont les textures et les compositions chimiques sont très différentes de celles des cuirasses latéritiques et qui sont géochimiquement marquées par des anomalies fortes et systématiques en Zn.

I - Naissance du concept de chapeau de fer dans la région de Pagala.

Blot (1982) remarque des ferruginisations secondaires dans une carrière ouverte par la SATOM à l'Ouest de Pagala-Village lors de la construction de la route Langabou - Dikpéléou, ferruginisations qu'il qualifie de "cuirasse anormale".

La "cuirasse anormale" de Blot (1982) déjà signalée comme encroûtement ferrugineux (Dempster, 1965, 1966, 1967), ou brèches tectoniques (Lasserre, 1979), ou brèches ferrugineuses latéritiques (Palimé, 1979), devient rapidement un chapeau de fer (Lawson et al., 1982; Blot, 1983), quand les travaux se sont, en quelques mois, étendus du site de la carrière SATOM à de nombreux autres sites (Magat et Blot, 1984; Godonou, 1984). Ce sont alors des formations ferrugineuses décrites comme caractérisées par des teneurs élevées en éléments traces dont Ni, Co et surtout Zn.

De là a commencé un travail systématique tant au BNRM qu'à l'ORSTOM auxquels se sont associées l'Université de Strasbourg (Besnus et Pion, 1985), et l'Ecole des Mines de Paris (Godonou, 1984). L'objectif était de préciser la nature de la minéralisation du substrat responsable de ces teneurs anormales dans les ferruginisations superficielles.

C'est dans cette mouvance que s'intègre mon travail, d'abord avec un travail de DEA sur les échantillons des collections de mes prédécesseurs, puis par un travail d'observation directe sur le terrain avec des prélèvements spécifiques sur différents sites complémentaires aux recherches précédentes.

II - Les travaux et résultats acquis.

Plusieurs travaux de terrains et de laboratoire ont été réalisés et parmi ceux-ci nous pouvons citer:

- 1) des prospections systématiques effectuées par les géologues du BNRM et de l'ORSTOM dans le but de faire l'inventaire cartographique qui ont abouti à des cartes à diverses échelles: 1/50 000 (BNRM), 1/30 000 (ORSTOM) et 1/5 000 (ORSTOM).

- 2) des travaux de sub-surface consistant en des puits, des tranchées et quelques forages ont été effectués en vue de chercher le protore. 49 puits et 3 tranchées ont été réalisés sur 7 sites; 6 sondages dont 3 carottés et 2 destructeurs ont en outre été forés sur le chapeau de fer n°3 et 1 carotté sur le n° 5;

3) des travaux de laboratoire basés sur les déterminations et analyses minéralogiques, les analyses chimiques globales ou d'éléments utiles recherchés aussi bien dans les ferruginisations et les roches échantillonnées en surface, dans les puits et les sondages que dans les sols et les stream sediments.

Ces divers travaux ont fait l'objet de plusieurs rapports, notes et article (Lawson et al., 1982; Blot, 1982, 1983 a et b, 1984 a, b et c; Godonou, 1984, 1985; Magat et Blot, 1984, 1987; Togbé, 1987; Blot et Magat, 1989). Les enseignements apportés par ces nombreux travaux attestent que ces formations ferrugineuses ne sont pas des cuirasses latéritiques et que le terme de chapeaux de fer leur est appropriée. Toutefois, la nature de la minéralisation qui est à l'origine de ces chapeaux de fer est très discutée. Plusieurs hypothèses ont été avancées sur la nature probable de la minéralisation à l'origine des chapeaux de fer: minéralisation sulfurée, minéralisation stratiforme à Zn dans un contexte carbonaté, minéralisation stratiforme hydrothermale, volcano-sédimentaire, etc. En particulier Godonou (1984) évoque une minéralisation sulfurée à pyrite-pyrrhotine-chalcopyrite-blende-galène-pentlandite, etc..., disséminée dans des schistes noirs et parfois dans des carbonates. Togbé (1987), puis Togbé et Besnus (1990) privilégient la filiation carbonate-chapeau de fer.

III - Présentation du mémoire.

Le travail a porté essentiellement sur l'étude pétrographique et géochimique globale et micrositée des deux ensembles matériaux: faciès ferrugineux typiques formant les chapeaux de fer d'une part et les diverses roches qui constituent les encaissants d'autre part. Le but était d'essayer de préciser la nature du protore qui se dérobaux investigations menées jusque là et de contribuer à la compréhension de la genèse de ces formations.

Le présent mémoire est présenté en trois parties et dix chapitres.

La première partie est consacrée aux contextes et méthodes utilisées: dans les deux premiers chapitres, sont exposées des synthèses bibliographiques sur les chapeaux de fer et sur la géologie régionale des Dahomeyides. Le troisième chapitre porte sur le contexte géographique et géologique du secteur où sont localisés les chapeaux de fer étudiés d'une part et, sur la manière dont a été pratiqué l'échantillonnage d'autre part. Le quatrième chapitre résume les différentes méthodes d'analyses utilisées au cours de ce travail.

La seconde partie présente les études pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des divers objets: roches d'extension régionale qui constituent l'encaissant des chapeaux de fer et qu'on appellera "roches primaires" (chapitre V); faciès argileux blancs d'altération associés aux chapeaux de fer (chapitre VI); faciès ferruginisés et chapeaux de fer au sens strict (chapitre VII); et enfin le cas de la Cascade d'Opoblé qui a permis d'étudier le passage d'un protore sidéritique à un faciès chapeau de fer (chapitre VIII).

Le traitement (analyse statistique multivariée) des données, la discussion et les interprétations finales font l'objet de la dernière partie (chapitres IX et X).

Les diverses hypothèses qui peuvent être formulées à l'issue de ce travail sur la nature du protore, sa genèse et les mécanismes de sa transformation en chapeaux de fer, expression visible en surface, sont discutées en conclusion.

PREMIERE PARTIE

CONTEXTES ET METHODES

A - Les précurseurs

La première étape est marquée par les premières synthèses d'interprétation de la signification des couleurs, des types d'oxydes de fer, des textures et même des processus chimiques de formation des chapeaux de fer avec les travaux de Buehler et Gottschalk (1910), Gottschalk et Buehler (1912), Loughlin (1914), Blanchard et Boswell (1925), Boswell et Blanchard (1927 et 1929), Trischka et al. (1929), Blanchard (1944), etc... Il s'agit d'une approche descriptive basée le plus souvent sur l'observation macroscopique (couleur, types, textures) et sur des expérimentations (oxydation des sulfures).

Selon ces auteurs, deux types de produits sont rencontrés dans les zones oxydés. Ce sont les oxydes de fer et les carbonates métalliques secondaires tels que la sidérite, la smithsonite, la cérusite et la malachite. Les oxydes de fer sont les principaux constituants des chapeaux de fer. Divers auteurs dont Blanchard et Boswell (1925), Boswell et Blanchard (1927 et 1929) définissent deux types d'oxydes de fer: oxydes indigènes formés in situ dans la cavité autrefois occupée par les sulfures; oxydes exotiques transportés et précipités ailleurs. Selon eux, la formation de l'un ou de l'autre type dépend de la nature du sulfure. C'est ainsi que l'oxydation de la chalcoppyrite et de la pyrite donnent respectivement des oxydes indigènes et exotiques. Les carbonates secondaires sont interprétés soit comme résultant de la réaction des solutions sulfatées avec la gangue carbonatée Loughlin, (1914); Blanchard et Boswell, 1925; Boswell et Blanchard, 1927 et 1929), soit comme conséquence d'une pression de CO₂ particulièrement élevée (Trischka et al., 1929).

Par ailleurs ces auteurs signalent que les minéraux primaires, après leur oxydation, laissent dans les pseudomorphoses supergènes d'oxydes de fer, des répliques caractéristiques. Blanchard et Boswell (1925, 1927, 1929) définissent ainsi deux principales morphologies. Ce sont les morphologies cellulaires ou "boxworks" caractérisées par la forme régulière et anguleuse des cavités, et les morphologies spongieuses dans lesquelles les cavités sont arrondies et de dimensions très variables.

Cette approche minéralogique descriptive basée sur la nature des minéraux secondaires et sur la morphologie des "boxworks" permettait des prévisions sur la nature du minerai sous-jacent après examen minutieux des pseudomorphoses ferrugineuses et de leurs différentes textures.

B - La période d'approche minéralogique et chimique

Elle est marquée par le développement d'autres disciplines: recherche expérimentale, thermodynamique, études géochimiques systématiques, etc...

Garrels (1954) établit pour la première fois des domaines de stabilité théoriques des minéraux de cuivre, de zinc et de plomb des zones d'oxydation et de cimentation en fonction du Eh (potentiel d'oxydo-réduction) et du pH.

Sato (1960, a et b) mesure les pH et Eh des eaux de mines en contact avec le minerai en voie d'oxydation et avec l'air atmosphérique et définit les différentes zones. Ainsi, la limite inférieure de l'oxydation profonde se situerait à un Eh correspondant à la réduction de l'hématite en magnétite et à un pH correspondant à la réduction du fer de la goëthite en fer ferreux, tandis que la limite supérieure de la zone d'oxydation correspondrait à un Eh égal à celui de la décomposition théorique du peroxyde d'hydrogène ($2 \text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4 \text{e}^-$) au contact de l'oxygène libre et à un pH égal à 10 donné par l'équilibre du système calcite-eau.

Takahashi (1960) reprend les données de Garrels qu'il étend à d'autres minéraux et définit à son tour des domaines de stabilité des divers carbonates supergènes.

Habashi (1966), Thornber (1975, a et b), Blain et Andrew (1977), tout comme leurs prédécesseurs, suggèrent la définition du milieu d'oxydation en termes de diagrammes Eh-pH à activités ioniques spécifiques. Ils mettent l'accent sur le potentiel rédox comme facteur important de l'oxydation des corps minéralisés, surtout sulfurés. Par ailleurs, ces auteurs insistent sur la nature électrochimique des réactions d'oxydation aboutissant à la formation des chapeaux de fer, plutôt que sur les processus hydrolytiques impliqués dans l'altération chimique des roches silicatées, aboutissant à la formation des sols et des profils d'altération.

Ces réactions électrochimiques consisteraient en couples rédox de demi-réactions exigeant chacune des échanges d'électrons, le corps minéralisé jouant le rôle de conducteur. Thornber note par ailleurs une variation des valeurs de pH et Eh le long du profil d'oxydation: Eh élevé et pH modéré dans la zone d'oxydation; l'inverse au-dessous de la nappe phréatique. Il met en relation cette variation avec les zonalités minéralogiques dans les profils d'oxydation des corps minéralisés.

Blanchard (1944, 1968) donne une esquisse de la géochimie multiélémentaire des oxydes de fer. Il s'agit de vingt "limonites" types de provenances variées, dont les gammes de teneurs en Fe_2O_3 et SiO_2 vont respectivement de 11.4 % à 73.1 % et 72.6 % à 13.5 %. Les analyses portent sur 14 éléments à savoir Si, Al, Fe, Mn, Ca, Mg, K, S, C, Cl, Pb, Zn, Cu et As. A travers ces résultats, il montre que les oxydes de fer dérivés de l'oxydation des sulfures renferment en trace des éléments sous forme minéralogiquement exprimée qu'il qualifie "d'impuretés". Ce sont, outre des oxydes hydratés de manganèse, des minéraux tels que gypse, jarosite, scorodite, mimétite et massicot pour lesquels il détermine la composition normative en se basant sur les données chimiques et l'observation microscopique de matériaux broyés. Ces résultats illustrent bien les grandes variations dans les compositions chimiques et minéralogiques des matériaux constituant les chapeaux de fer.

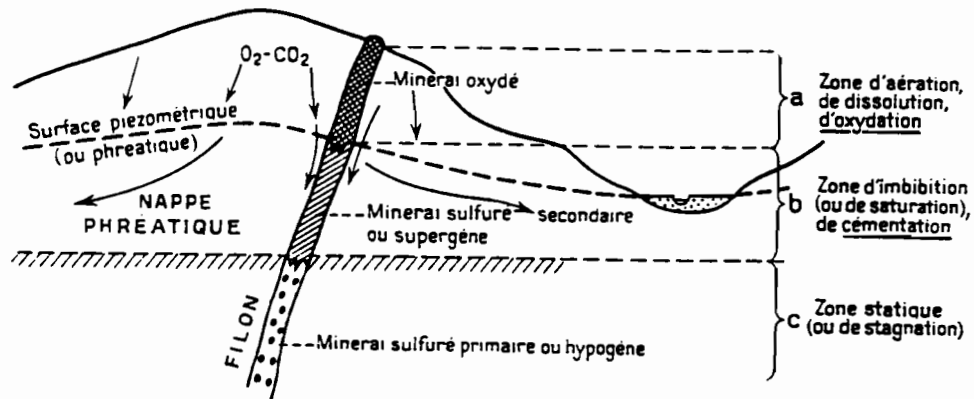


Figure 1 - Schéma idéal des zones de circulation de l'eau en terrains homogènes. (Routhier, 1963).

Routhier (1963) définit les principales zones rencontrées dans un profil d'oxydation d'un gisement sulfuré et met un accent particulier d'une part sur le rôle joué par les eaux souterraines (eaux de circulation, nappe phréatique) (fig. 1), d'autre part, sur celui exercé par les facteurs locaux, nature de la minéralisation et de l'encaissant, facteurs climatiques et morpho-tectoniques, sur la formation de ces diverses zones.

Ainsi, dans le sens de la circulation des eaux, les diverses zones susceptibles d'être rencontrées sont:

- Le chapeau de fer ou *gossan*, essentiellement composé d'hydroxydes de fer (gœthite et hématite) se rattache à la partie supérieure de la zone d'oxydation.
- La zone oxydée, toujours lessivée dans sa partie supérieure, mais pouvant receler des minéralisations enrichies en oxydes dans sa partie profonde. Elle est limitée vers le bas par la surface hydrostatique de la région.
- La zone de cémentation ou zone de précipitation de sulfures secondaires, située le plus souvent en-dessous de la surface hydrostatique.
- Le gisement primaire ou *protore* dont la composition minéralogique n'a pas été perturbée par la circulation des eaux superficielles.

Le but de ces approches physico-chimiques est la prévision, compte tenu des conditions de Eh et de pH données, de la stabilité de certaines phases sulfurées et de la coexistence des paragenèses supergènes. Cependant l'absence ou le nombre insuffisant de données chimiques, de Eh, de pH et de température sur les profils naturels d'oxydation rend cette application délicate.

C - La période d'approche géochimique multiélémentaire

L'approche géochimique multiélémentaire vient compléter les observations minéralogiques et les données de terrain, avec des techniques d'études plus performantes (l'analyse multi-élémentaire des éléments traces, la micro-analyse et la diffractométrie des rayons X). Cette étape a été marquée par les travaux de Wilhelm et Kosakévitch (1979), Kosakévitch et al. (1980), Sornein (1980), Thornber (1981, 1985), Mathéus (1982), Panirzadeh-Echraghi et al. (1982), de Walque et al. (1983), Kosakévitch (1983), Taylor et al. (1983 a et b), Liao Shifan et al. (1983), Andrew (1984), Sanzalone et Domenico (1985), Nickel et Daniels (1985), etc...

Kosakévitch (1979), reprenant le problème de terminologie du terme "chapeau de fer", le généralise à des minéralisations autres que sulfurées et carbonatées. Wilhelm et Kosakévitch (1979) établissent une classification des chapeaux de fer en termes de bons, mauvais et faux chapeaux de fer, en se basant sur des critères économiques.

D'après ces auteurs, le terme de "bons chapeaux de fer" s'emploie pour les chapeaux d'oxydation surmontant des minéralisations à intérêt économique notamment les gîtes d'amas sulfurés riches en métaux de base (Pb, Zn, Cu, Ag, ...). Les "mauvais" chapeaux de fer correspondent à des gîtes sans intérêt économique en particulier des minéralisations polymétalliques disséminées, ou à stock sulfuré faible ou celles essentiellement pyriteuses. Enfin, le terme de "faux chapeaux de fer" désigne les formations issues de l'altération latéritique. A ce dernier, s'oppose celui de "vrais chapeaux de fer" pour caractériser ceux provenant de gisements uniquement sulfurés, ou carbonatés (sidérite-ankérite), ou mixtes (sulfures-sidérite; sulfures-calcite), ou, enfin silicatés.

Sornein (1980) décrit deux chapeaux de fer: chapeaux de fer de Batère et celui de Sain-Bel développés respectivement sur sidérite et sur pyrite. Il met en évidence l'évolution du chimisme du milieu au cours de l'altération des deux principaux minéraux ferrifères qui engendrent la majeure partie des prospectés. Il n'a pas cependant pu mettre en évidence le comportement des métaux non ferreux faisant l'objet de prospections minières. Par ailleurs, il met l'accent sur la connaissance des mécanismes d'oxydation des corps

minéralisés pour une bonne interprétation du comportement des métaux mobiles en milieu supergène comme le cuivre, le zinc, le manganèse, etc...

Kosakévitch (1983) fait une synthèse des données texturales acquises au cours d'études des chapeaux de fer menées par le laboratoire de Minéralogie du B.R.G.M., avec une approche "altérologique". Cette approche "altérologique" consiste en la reconstitution du milieu d'altération. Il essaie de dégager des critères morphogénétiques qui permettraient un décryptage des textures supergènes des chapeaux de fer sur sulfures et carbonates de fer. Il met l'accent sur la micro-analyse multiélémentaire des différents types morphologiques d'oxydes de fer, en vue de leur discrimination, qu'il considère comme susceptible d'apporter une solution plus complète au problème géochimique posé par l'interprétation des chapeaux de fer.

L'analyse géochimique a donné des indications capitales sur d'éventuelles minéralisations situées en profondeur, en particulier lorsque l'altération est telle qu'il ne subsiste plus de minéraux secondaires, ni de boxworks caractéristiques de structures particulières qui sont les habituels critères de différenciation. L'analyse des éléments traces est par ailleurs un guide pour la distinction de divers types de chapeaux de fer, selon la nature des protores qu'ils peuvent indiquer (Butt 1979; Taylor et Andrew, 1980, 1982, a et b, 1983, a et b; Andrew, 1984, Sanzolone et Domenico, 1985).

Tableau I - Etude comparée des résultats de deux ensembles d'analyses multi-élémentaires du chapeau de fer de Jabal Sayid (Arabie Saoudite)

		Min.	Max.	Moy	Ec.-Type
Cu	1.	70	40 000	2 400	6900
	2	62	1 000	332	271
Pb	1	6	2 000	200	600
	2	10	2 400	355	600
Zn	2	30	3 700	880	900
	2	57	300	160	87
Ag	3	0.2	5.8	1	1
	2	0.1	11.2	1.7	2.4
Au	4	< 0.2	8.8	1	2
	2	0.050	12.5	0.6	2.5
As	5	4	3 000	350	540
	2	10	850	160	70
Sb	6	2	24	10	7
	2	30	30	30	-
Bi	7	<	-	-	-
	2	<	-	-	-
Hg	8	2	800	70	140
	2	0.03	0.19	0.11	0.13
Ba	9	40	740	200	190
	2	82	5 000	1 240	1 780
Mo	10	2	8	3	2
	2	1.5	300	60	70
Sn	11	2	110	20	29
	2	20	300	40	60
Co	12	< 10	30	20	7
	2	5	5	5	-
Ni	13	< 20	20	15	5
	2	2.5	3	3	-
Mn	14	20	4 700	330	850
	2	20	45	21	5

(teneurs exprimées en ppm à l'exception de Hg en ppb)

(1) Ryall et Taylor (1981) n = 32; (2) Wilhelm et Kosakévitch (1979) n = 24

De ces études, il ressort les points suivants:

Les compositions chimique et minéralogique des chapeaux de fer, très variées, ont tendance à être spécifique de la nature de la minéralisation du protore, et leur connaissance autorise à préciser les objectifs des prospections minières, quoique d'autres paramètres interviennent (nature de l'encaissant, climat...).

L'hétérogénéité des teneurs peut d'ailleurs conduire à des vues fort différentes du même chapeau de fer suivant la méthode d'approche. Ainsi le chapeau de fer de Jabal Sayid en Arabie Saoudite, sujet de deux études, apparaît à travers celles-ci comme deux objets géochimiquement différents (tableau I).

Aujourd'hui la connaissance des chapeaux de fer a atteint un niveau très évolué avec le développement des techniques d'études évoquées ci-dessus. La micrographie des textures, la minéralogie et la géochimie multiélémentaire globale et microsituée (micro-analyse) pratiquées ensemble, constituent les moyens d'investigations les plus efficaces des chapeaux de fer. Ce dernier apparaît aujourd'hui de façon générale indépendante de l'intérêt économique comme une formation supergène qui se rattache à une minéralisation sous jacente. De ce fait, son étude constitue une approche essentielle en recherche minière.

II - Les chapeaux de fer. Définition - Genèse

A - Définition

Si Foucault et Raoult (1988) ont adopté la définition suivante: "le terme chapeau de fer désigne la zone exposée en surface et oxydée d'un gisement métallifère et présentant un aspect plus ou moins alvéolaire et de teintes jaunâtres à brun rouge"; celle-ci résulte d'un compromis et d'une évolution dont l'histoire a été notamment retracée par Kosakévitch (1979).

"Pour Lacroix (1912), le terme chapeau de fer était employé pour désigner les zones oxydées développées sur des gisements de sidérite."

"D'autres auteurs dont Krishtofovitch (1960), Fesenko et al.(1972) l'appliquèrent uniquement aux affleurements oxydés des minéralisations sulfurées; pour eux, les vrais chapeaux de fer ou "gossans" sont uniquement développés sur des sulfures."

- "Bétecktin (1968) donne un sens beaucoup plus large au terme et l'emploie pour des formations résiduelles dérivées de l'altération chimique supergène des gîtes minéraux utiles."

A la suite de cette revue bibliographique, Kosakévitch propose de définir les chapeaux de fer comme des formations résiduelles fortement enrichies en minéraux ferrifères supergènes, et qui proviennent de l'oxydation météorique de corps minéralisés ou de roches présentant une forte concentration initiale de minéraux riches en fer.

Cette définition est satisfaisante car elle tient compte non seulement des zones d'oxydation des divers gisements de sulfures de fer ou de carbonates de fer, mais aussi des roches très riches en fer, où le fer peut être contenu dans des sulfures, dans des carbonates ou dans des silicates.

Un chapeau de fer ou gossan est donc une formation de surface très riche en minéraux de fer secondaire (gœthite-hématite) qui coiffe en profondeur un corps minéralisé appelé "protore" dont il est issu. Le protore peut être sulfuré, carbonaté ou silicaté.

Les minéralisations à l'origine des chapeaux de fer les plus souvent décrits sont de type filonien, surtout pour les protores sulfurés, et de type stratiforme dans le cas des sidérites.

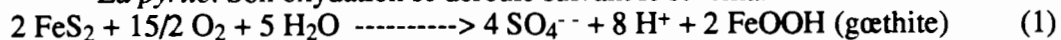
B - Genèse des chapeaux de fer

- Mécanisme de formation d'un chapeau de fer

Le mécanisme général responsable de la formation du chapeau de fer est l'oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) et sa précipitation sur place. Cette oxydation suivant la nature du minéral en jeu, libère ou non de l'acide (ion H^+); lequel va favoriser la dissolution des carbonates, l'oxydation d'autres sulfures, l'hydrolyse des silicates...

A titre d'exemples seront données les réactions d'oxydation de certains minéraux sulfurés et carbonatés.

- *La pyrite*. Son oxydation se déroule suivant le schéma:

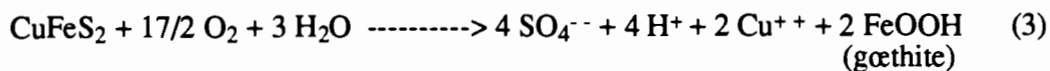


ou



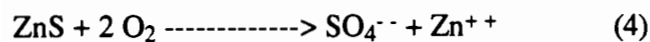
Cette réaction s'accompagne d'une libération importante d'acide (8H^+). Elle conduit, suivant le nombre de molécules d'eau impliquées dans la réaction, à la formation de g\ae thite (1) ou d'h\ae matite (2).

- *La chalcopirite*. La réaction d'oxydation peut s'écrire ainsi:



Là encore il y a production d'acide mais en quantité moindre (4H^+) et formation de la g\ae thite.

- *La blende et la galène*. Les réactions peuvent s'écrire ainsi:



et



L'oxydation de ces deux minéraux ne fournit ni d'acide ni de minéraux ferri-fères.

1.- *La sidérite*. L'oxydation de la sidérite peut s'écrire ainsi:



Cette réaction s'accompagne d'une légère acidification du milieu suite à la libération de deux ions H^+ avec formation de g\ae thite.

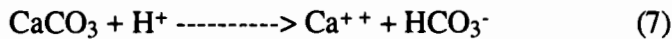
De toutes ces réactions, seule l'oxydation de la pyrite fournit un milieu très acide. Les acides ainsi libérés vont réagir différemment suivant la nature de la roche encaissante ou l'éponte.

Réactions avec les épontes

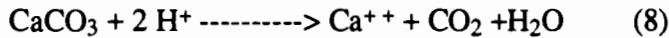
Les principales réactions avec les épontes sont la neutralisation, la précipitation et la dissolution.

- La neutralisation. Elle se produit au contact d'une éponte carbonatée (calcite, dolomite et sidérite) Elles réagissent avec le carbonate initial (par exemple la calcite) par

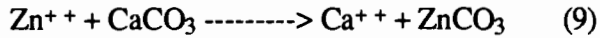
consommation des ions H^+ pour donner, selon l'acidité, de l'acide carbonique (7) ou du gaz carbonique et de l'eau (8) suivant les réactions:



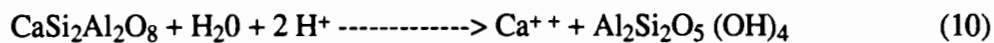
ou



- La précipitation. Dans un milieu carbonaté, lorsque la solution contient des ions métalliques comme Zn^{++} par exemple, ces derniers vont remplacer le calcium (Ca^{++}) et donner du carbonate de zinc suivant le schéma:



- L'hydrolyse. Elle concerne surtout les silicates. Considérons une roche encaissante riche en anorthite; au contact de la solution acide, l'anorthite est hydrolysée pour donner la kaolinite. C'est aussi une réaction de neutralisation car il y a consommation d'ions H^+ .



Précipitation du fer

C'est la précipitation du fer in situ qui est à l'origine du chapeau de fer. Cette précipitation du fer in situ est contrôlée par le pH du milieu environnant, le pH étant à son tour régi par des facteurs tels que la nature du minéral en jeu et celle de l'éponte.

Prenons comme exemple la réaction d'oxydation de la pyrite qui est très acide. Deux cas se présentent. - En milieu actif, c'est-à-dire neutralisant: carbonates ou roches feldspathiques (Blanchard et Boswell, 1925; Boswell et Blanchard, 1927, 1929; Blain et Andrew, 1977, Ryall et Taylor, 1981), l'acide libéré est rapidement neutralisé favorisant l'élévation du pH. Le fer en solution sous forme ferrique précipite alors à la place du minéral oxydé sous forme de goëthite ou d'hématite indigène. - En milieu neutre ou inerte (gangue quartzreuse), l'acide libéré n'est pas neutralisé et empêche la précipitation du fer. Ce dernier reste en solution, migre hors des limites du minéral avant de précipiter. Il se forme ainsi de la goëthite exotique.

Par contre, la réaction d'oxydation de la chalcopyrite ou de la sidérite ne libère que peu d'acide, et par conséquent, donne un milieu à pH modéré. Dans ces conditions le fer ferrique en solution ne migre pas et précipite sur place sous forme de goëthite indigène.

Il est à noter que les goëthites ou hématites indigènes procèdent par pseudomorphose des minéraux parents disparus préservant ainsi leurs textures. Par contre, les espèces exotiques ne présentent aucune texture.

- Facteurs contrôlant le développement d'un chapeau de fer

a - La nature de l'encaissant

Comme il a été évoqué plus haut (réactions avec les épontes), les roches encaissantes interviennent différemment. Certains d'entre elles réagissent avec les composés actifs dissous dans les eaux souterraines baignant le gisement, les neutralisent bloquant ainsi le processus de transformation. C'est le cas des roches carbonatées qui agissent sur les solutions sulfatées de la zone d'oxydation des minerais sulfurés. D'autres comme les quartzites, grès et, partiellement, roches ignées demeurent inertes par rapport aux substances dissoutes dans l'eau et ne perturbent pas l'évolution de l'oxydation des gisements.

b - Effets du climat

Les aspects climatiques susceptibles d'influencer sur le développement du profil d'un chapeau de fer sont essentiellement la pluviosité et la température. Guinsburg (*In Smirnov; 1954*) a montré que le développement de la zone d'oxydation d'un même type de gisement (ici amas pyriteux) ne se fait pas de façon identique sous tous les climats. En effet, les conditions les plus favorables à l'oxydation intense des parties superficielles des gisements est le climat torride et chaud avec précipitations modérées et régulières. Le climat polaire est peu favorable au phénomène; le climat sec et désertique ne favorise de même pas ces transformations.

c - Effets de vitesse d'érosion

La zone d'oxydation ne peut se développer que dans les conditions géomorphologiques pour lesquelles la vitesse de sa formation est supérieure à celle de l'érosion. Aussi dans les régions de hautes montagnes très disséquées, où l'érosion des pentes est très rapide, les corps des gîtes minéraux peuvent affleurer à l'état peu transformé ou absolument intact.

3 - Maturité des chapeaux de fer

En raison du grand nombre de facteurs affectant le développement du profil d'un chapeau de fer, les profils d'oxydation sont extrêmement variés. Blain et Andrew (1977), puis Nickel et Daniels (1985) se basant sur les paragenèses minérales, définissent deux types de profils:

- Un "profil mature" caractérisé par la présence de quatre zones qui sont de haut vers le bas: une zone superficielle très souvent lessivée et essentiellement composée de goëthite et d'hématite avec un peu de quartz, constituant le chapeau de fer sensu stricto; une zone oxydée riche en oxydes ferriques et en minéraux secondaires (sulfates, phosphates, arsénates ou carbonates); une troisième zone à sulfures supergènes encore appelée zone de cémentation; enfin une quatrième et dernière zone correspondant au minerai primaire sain. L'épaisseur de chacune de ces zones est très variable. Ce schéma correspond à un cas idéal qui ne se rencontre que rarement, en fait exclusivement sur les protores à sulfures de cuivre et de nickel.

- Un "chapeau de fer immature" est celui dont les quatre zones ne sont pas bien développées, soit faute de temps, soit à cause des conditions défavorables, soit par suite du démantèlement érosif de la partie supérieure d'un chapeau de fer mature.

III - Principales caractéristiques des chapeaux de fer

En raison de la grande diversité des paragenèses minérales qui existent dans la nature et dont sont issus les chapeaux de fer, ces derniers sont très variés et différents les uns des autres par leur minéralogie et leur chimisme. De ce fait, après avoir présenté de façon générale, leurs caractéristiques principales, une description schématique sera donnée pour deux types: chapeaux de fer issus de l'oxydation d'amas sulfurés et ceux provenant de gîtes sidéritiques.

A - La composition minéralogique des chapeaux de fer

La constitution minéralogique d'un chapeau de fer dépend de celle de la minéralisation primaire et de la gangue d'une part, et du degré de maturité du chapeau de fer d'autre part. Elle varie donc d'un contexte à l'autre, et suivant le type de minéralisation. Cependant, on peut classer leurs minéraux constitutifs en deux catégories: les minéraux

résiduels et les minéraux secondaires néoformés au cours des processus de formation et d'évolution des chapeaux de fer.

1 - Les minéraux résiduels

Ce sont des minéraux primaires très peu ou pas affectés par l'altération. Ce sont surtout des minéraux de la gangue dont principalement le quartz et quelques minéraux phylliteux (Ryall and Taylor, 1981; Taylor et al., 1983). Le quartz est de loin le plus abondant, ceci à cause de sa résistance élevée à l'altération. Selon le degré de maturité du chapeau de fer, des sulfures résiduels peuvent aussi être présents. Les sulfures résiduels se rencontrent en inclusions dans du quartz, dans des chapeaux de fer très matures (Nickel et Daniels, 1985). De la marcassite peut aussi s'y rencontrer, à cause de sa résistance à l'altération.

2 - Les minéraux secondaires

Très souvent les minéraux secondaires se présentent sous forme bien cristallisée ou sous forme d'incrustations massives de couleurs vives et constituent de ce fait des objets de collections de musées de minéralogie. Ce sont généralement des oxydes secondaires, des sulfates, des carbonates, des phosphates, des silicates, etc, rencontrés dans les zones profondes des chapeaux de fer très évolués ou en surface dans ceux immatures. Dans ce qui suit, seront décrits les minéraux secondaires constituant les chapeaux de fer au sens strict.

a - Les oxydes de fer

Ce sont les oxydes de fer qui donnent le nom à la formation superficielle définie comme "chapeau de fer". Ils sont caractéristiques de la zone superficielle le plus souvent très lessivée, à cause de leur stabilité dans les conditions de surface. Il s'agit principalement de goëthite et l'hématite, et rarement de lépidocrocite. Ils proviennent de l'oxydation des minéraux ferrifères. Pour Routhier (1963), Blain et Andrew (1977), Nickel et Daniels (1985) etc., la goëthite se formerait directement à la suite d'une hydrolyse et oxydation lentes du fer ferreux en fer ferrique tandis que l'hématite proviendrait de la déshydratation de la goëthite. Cependant il a été démontré expérimentalement (Schwertmann, 1983) que l'hématite et la goëthite pourraient se former à partir de la ferrhydrite $[Fe_5(O_4H_3)_3]$, l'hématite par déshydratation à température élevée et à pH neutre, la goëthite par évolution à pH faible dans des conditions humides et en présence de carbone organique. La ferrhydrite est aussi considérée comme un des précurseurs des oxydes bien exprimés (Kosakévitch, 1983). La rareté de la lépidocrocite s'explique par son instabilité par rapport à la goëthite dans les conditions supergènes d'après Schwertmann et al. (1972) *in* Nickel et al. (1985). Cependant la lépidocrocite peut caractériser les chapeaux de fer sur sidérite (Sorwein, 1980) et, parfois, les pseudomorphoses supergènes de pyrite (Kosakévitch, 1983).

b - Les oxydes et hydroxydes de manganèse

Les plus fréquents sont la pyrolusite, la manganite, le psilomélane et aussi le cryptomélane. Ce sont des minéraux provenant surtout de l'altération des minéraux de la gangue ou de l'encaissant, silicates ou carbonates. Les minéraux de manganèse sont de bons indicateurs de pH relativement élevés (Kosakévitch, 1980). Par leur rôle de "piège" à éléments traces par adsorption dans les réseaux ou sur les surfaces, les oxydes et hydroxydes de manganèse (en particulier les complexes manganésifères) ont une influence sur la géochimie des chapeaux de fer. Les oxydes de manganèse peuvent pseudomorphoser les structures des minéraux initiaux disparus (Nickel et Daniels, 1985). Cependant, ces pseudomorphoses sont plus rares que celles des oxydes de fer.

c - Autres minéraux secondaires

Du quartz secondaire peut être rencontré dans les chapeaux de fer. Nickel et Daniels (1985) attribuent au quartz secondaire les faciès siliceux des chapeaux de fer. Outre les principaux minéraux ci-dessus décrits, on peut rencontrer des oxydes de cuivre (ténorite, cuprite) et de plomb (massicot, minium); leur présence traduit alors leur abondance dans la minéralisation primaire (Nickel et Daniels, 1985). Des minéraux argileux, des hydroxydes d'alumine, sont également décrits (Ryall et Taylor, 1981).

B - La géochimie des chapeaux de fer

L'image géochimique d'un chapeau de fer est fonction de la maturité du profil, du degré de stabilité des minéraux secondaires formés au cours de son évolution et de la capacité de rétention des oxydes de fer et de manganèse.

Les mécanismes de rétention sont complexes. La rétention d'un même élément se présente sous plusieurs formes différentes. Les éléments piégés dans les oxydes de fer résistent aux lessivages superficiels et persistent même dans les fragments d'oxyde de fer remaniés et disséminés dans les sols où ils fournissent les anomalies de dispersion mécanique (Kosakévitch, 1980). La coprécipitation d'un élément avec de l'hydroxyde ferrique dépend de nombreux facteurs: état de valence de l'élément, dimension des ions, état ionique et faculté de complexation. Il a été démontré que la goëthite a un pouvoir de rétention d'éléments traces plus élevé que l'hématite. La goëthite pouvait contenir jusqu'à 6 % de Cu, 2,5 % de Zn, 4 % de Pb et 1,5 % de As d'après Nickel, (*In* Mathéus, 1982). Mathéus (1982) et Kosakévitch (1983) voient une corrélation entre la capacité d'adsorption et la cristallinité des oxydes de fer. En effet Kosakévitch (1980, puis 1983) signale une diminution systématique des teneurs d'éléments traces dans les variétés de goëthites cristallisées appartenant à un même agrégat.

Ce sont donc la forte rétention des métaux sur les oxydes de fer et de manganèse d'une part, et éventuellement quelques minéraux résiduels en inclusions dans les oxydes de fer d'autre part, qui conduisent aux concentrations élevées constituant ainsi les anomalies géochimiques des chapeaux de fer.

C - Les figures de répliques.

Etant donné que la précipitation des oxydes de fer indigènes procède par pseudomorphose, elle laissera parfois subsister un motif cellulaire qui pourra revêtir certains aspects particuliers. La recherche des figures de remplacement a marqué le début l'histoire de la recherche sur les chapeaux de fer. L'identification de ces pseudomorphoses dans ces formations supergènes a été déjà utilisée pour l'estimation ou l'évaluation des gîtes sulfurés profonds. En effet, la forme des pseudomorphoses, lorsqu'elles est bien conservée, indique évidemment la forme des minéraux altérés ou disparus, alors que la nature indigène ou exogène des oxydes de fer correspond à la nature primitive des minéraux (Blanchard et Boswell, 1925, 1927, 1929; Blain et Andrew, 1977; Andrew, 1980; ect..). Cependant, la bonne expression et préservation des figures de remplacement dans les oxydes supergènes dépendent de la nature de la minéralisation primaire et de celle de la gangue. C'est ainsi que la forme des minéraux primaires serait d'autant mieux conservée que ceux-ci sont disséminés dans une gangue plus inerte principalement quartzreuse (Blanchard et Boswell, 1925, 1927)

D - Description de deux types de chapeaux de fer

1 - Chapeaux de fer développés sur gîtes sulfurés

Ce sont les mieux étudiés pour la prospection minière à cause de nombreux métaux de base (Zn, Cu, Pb, Ni, Ag, ...) que recèlent la zone de cimentation et le protore. Ils sont très variés et diffèrent les uns des autres par leurs compositions minéralogiques et géochimiques. Ces différences sont les conséquences de la nature de la paragenèse primaire du gisement. Les tableaux II et III donnent respectivement la constitution minéralogique et les anomalies géochimiques dans quelques chapeaux de fer sur sulfures.

Tableau II - Constitution minéralogique de quelques chapeaux de fer développés sur sulfures

Gîte	Localité	Paragenèses primaires	Minéralogie des zones superficielles		Quelques anomalies géochimiques
			a	b	
Mount Isa (Black Rock)	Australie	Pyrite Pyrrhotine chalcopyrite	Cuprite - Cuivre Chrysocolle malachite Chalcocite	Absent	
Mount Isa (Black Star)	Australie	Galène Blende Pyrite Galène	Cérusite Pyromorphite Smithsonite Smithsonite Anglésite- Argent	Gœthite Jaspe Cérusite	
Mount Oxide	Australie	Pyrite Chalcopyrite	Malachite-Azurite Atacamite-Chalcocite Bornite-Cuprite Ténorite-Malachite	Absent	Cu: 20 %
Broken Hill	Australie	Blende Galène Argentite Chalcopyrite	Kaolinite-Quartz Embolite-Argent Iodargyrite Chlorargyrite	Gœthite-Hématite Psilomélane- Quartz Kaolinite-Cérusite Embolite	Pb: 18 % Ag: 700 ppm
Kambalda	Australie	Pentlandite Pyrrhotine Chalcopyrite Pyrite	Gœthite-Hématite Soufre-Gaspéite Magnésite niche en Ni	Absent	Ni: 9200 et Cu: 2600ppm Pd: 1,1 ppm; Pt: 0,35 " Co: 300 et As: 220 " Cr, Mn, Zn, Pb faibles
Rio Tinto	Espagne	Chalcopyrite Pyrite Blende	Hématite Gœthite Pyrite		Cu: 0,2 % Ag: 42 ppm As: 1,0 %
Porte-aux-Moines	France	Pyrite Blende Chalcopyrite Galène	-	Gœthite-Hématite Quartz- Rutile Kaolinite- Chlorite Muscovite-Ilite	Pb: 630 ppm Zn: 113,2 ppm Cu: 237,7 ppm
Jabal Sayid	Arabie Saoudite	Pyrite Pyrrhotine Chalcopyrite Blende Galène Magnétite		Quartz Hématite Gœthite Calcite-Gypse Jarosite-Basanite	Cu: 790 ppm Pb: 44 ppm Zn: 510 ppm

a) Zone d'oxydation enrichie (sulfates, carbonates et oxydes)

b) Chapeau de de fer

La première remarque porte sur la minéralogie selon le développement du chapeau de fer. Dans les chapeaux de fer bien exprimés et matures, la minéralogie est dominée par la quasi présence de gœthite et de manière subordonnée d'hématite et de quartz. Accessoirement, se rencontrent la cérusite (sur galène dominante) et la jarosite; cette dernière souligne la présence en teneur notable de pyrite, de pyrrhotine, ou de chalcopyrite dans la minéralisation primaire. Parfois, des minéraux phylliteux peuvent être présents. Dans les zones oxydées, coexistent à côté de la gœthite et de l'hématite, des minéraux métalliques supergènes tels que des sulfates (anglésite), des carbonates (malachite, cérusite, smithsonite), des silicates (chrysolle), des oxydes (cuprite), des métaux natifs (argent) et des sulfures résiduels.

La seconde remarque concernent la répartition des anomalies géochimiques. On peut noter que les chapeaux de fer issus de l'oxydation de la pyrite massive sont plus pauvres

en éléments traces que ceux développés sur sulfures polymétalliques. La stérilité des premiers peut s'expliquer par l'absence d'éléments traces dans la pyrite et par le lessivage important qu'ils subissent à cause de la forte acidité engendrée par l'oxydation de la pyrite. Au sein des chapeaux de fer polymétalliques, les anomalies géochimiques sont très variées. On peut constater un lessivage sélectif de Zn dans les différents chapeaux de fer, même ceux à blende dominante. A titre d'exemples, on peut retenir les particularités suivantes: - les chapeaux à Cu-Zn sont caractérisés par des valeurs très fortes en Cu, Ba, Ag et faibles en Zn, Pb; ceux à Zn-Cu présentent des teneurs élevées en Zn et Pb, et basses en Cu et Ba; enfin, ceux à Pb-Zn montrent d'importantes anomalies en Pb et en Mn et des valeurs modérées en Cu, Zn, Ba.

Tableau III - Composition géochimique de quelques types chapeaux de fer sur sulfure (d'après Blain et Taylor, 1977)

Type	n	p	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Ni ppm	Co ppm	Mn ppm	Cr ppm	As ppm	Pd ppm	Pt ppm	Ba ppm	Ag ppm	Cd ppm
Chapeau à Cu-Zn	50	1)	1800	90	250	27	70	110	-	-	-	-	1800	8	2
		2)	800 à 3400	40 à 170	125 à 650	25 à 50	40 à 120	40 à 250	-	-	-	-	110 à 9400	2 à 12	1 à 4
Chapeau à Pb-Cu	5	1)	330	800	3800	30	40	3300	50	-	-	-	720	9	-
		2)	75 à 15500	160 à 2840	480 à 7500	19 à 35	20 à 60	170 à 7000	20 à 90	-	-	-	380 à 1500	3 à 32	-
Chapeau à Zn-Cu	19	1)	115	600	6200	24	25	360	65	-	-	-	260	7	7
		2)	40 à 220	210 à 1910	420 à 22500	13 à 30	10 à 35	110 à 760	40 à 100	-	-	-	55 à 660	3 à 17	8 à 10
Chapeau à Cu	11	1)	15200	50	220	270	240	330	45	-	-	-	50	3	6
		2)	5500 à 22500	30 à 90	150 à 315	80 à 750	60 à 460	90 à 920	25 à 80	-	-	-	20 à 90	2 à 4	5 à 8
Chapeau à Ni	16	1)	2600	30	-	9200	300	500	800	220	1.1	0.35	-	-	-
		2)	900 à 6000	10 à 120	-	900 à 24200	60 à 1050	50 à 1700	60 à 3000	7 à 860	0.15 à 4.5	0.04 à 0.6	-	-	-
Chapeau sur pyrite	12	2)	45 18 à 75	45 20 à 80	30 15 à 40	25 20 à 40	30 12 à 30	70 20 à 270	25 12 à 35	-	-	-	30 15 à 40	-	-

Les chapeaux de fer à Cu, Cu-Zn, Pb-Cu, Zn-Cu proviennent de l'Afrique du Sud; ceux à Ni d'Australie.
n = nombre d'échantillons analysés; p = paramètres statistiques avec 1) moyennes, 2) minimum et maximum.

Les principales textures des ferruginisations indigènes, supergènes, issues de l'oxydation des sulfures ordinaires sont données dans la figure 2. Ce sont:

- *réseau maillé cellulaire* ou "*cellular boxwork*", (fig. 2a) c'est une texture cellulaire anguleuse à parois cellulaires liées. Si les cellules ont un diamètre supérieur à 1,5 mm, on parlera de "*réseau maillé cellulaire grossier*". Si le diamètre ne dépasse pas 1,5 mm, on parlera de "*réseau maillé cellulaire fin*". Ce type de texture est fréquemment fourni par la galène, la chalcopyrite, la blende.
- *éponge cellulaire* ou "*cellular sponge*", (fig. 2b) cette texture se distingue du précédent essentiellement par le fait que les cellules sont arrondies. Elle indique plutôt la présence de sulfures en grains disséminés, transformés dans le chapeau de fer par pseudomorphose. Elle est caractéristique des gîtes renfermant la pyrrhotine associée à la pyrite.

L'étude des cavités de dissolution permet de tirer quelques informations supplémentaires.

- La *pyrite* laisse des cavités fréquemment vides de forme cubique, parfois zonées ou des pseudomorphoses cubiques (fig. 2c).
- La *pyrrhotine* fournit des cavités soit grossièrement hexagonales avec parois minces jointives, soit en hiéroglyphe faiblement jointive, ou des pseudomorphoses curvilamellaires ou sphérolitiques (fig. 2d).
- La *chalcopyrite* donne des cavités occupées par la goëthite indigène de forme souvent rectangulaire avec des parois cellulaires transverses à 95-110° (fig. 2e).
- La *blende* engendre des cavités anguleuses bien jointives avec des parois transverses à 45° formant des réticules triangulaires caractéristiques. La cavité est vide lorsque la

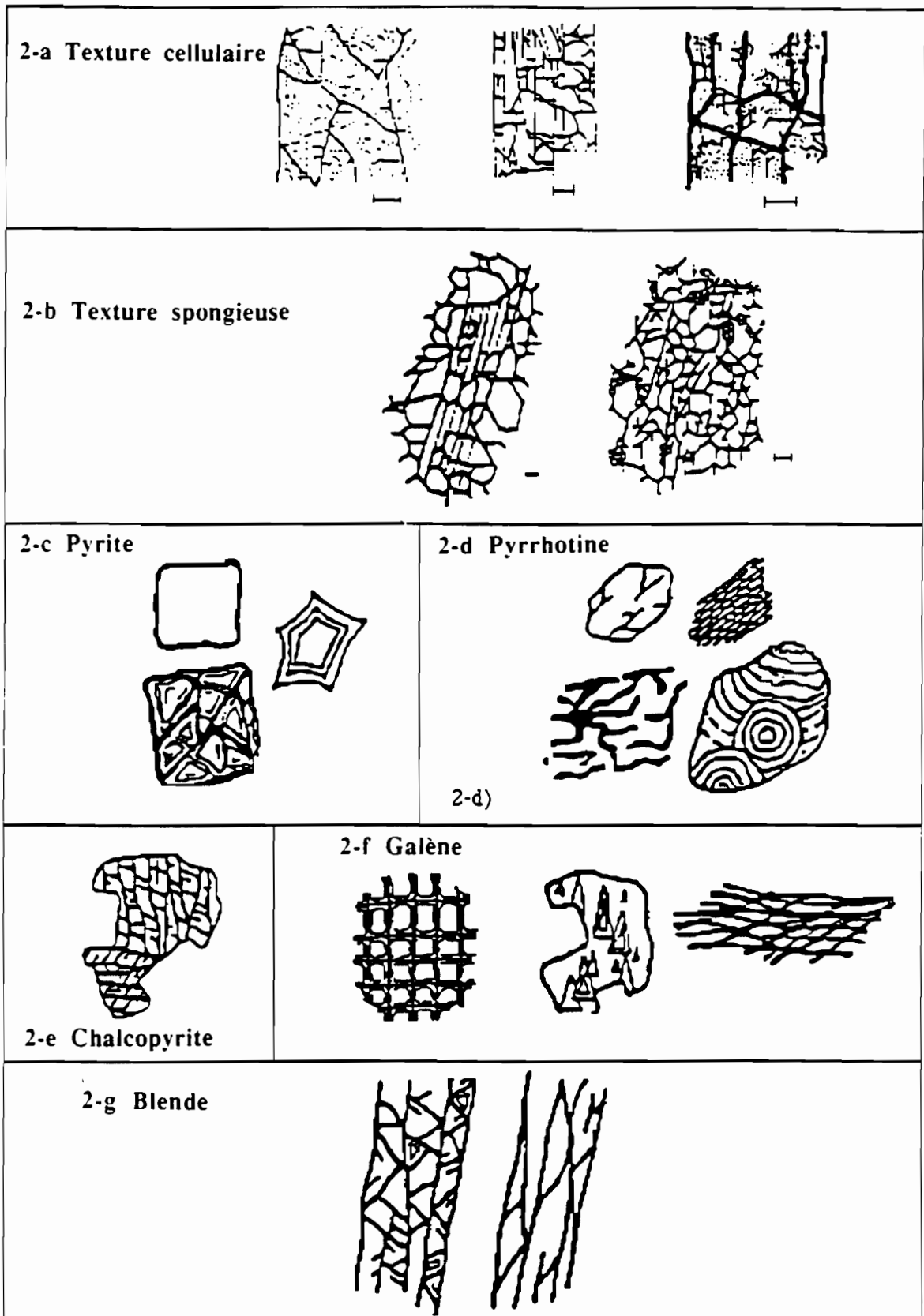


Figure 2 - Pseudomorphoses laissées quelques sulfures communs d'après Blanchard (1968); (l'échelle est 1 mm).

dissolution se produit dans une gangue inerte, elle est occupée par la goëthite indigène dans le cas d'une gangue active (fig. 2f).

- Enfin, la *galène* produit à la dissolution soit des cavités cubiques plus régulières que la pyrite, soit des cavités en gradins, soit des cavités rhomboédriques lorsqu'il s'agit de la cérusite. Dans tous les cas, les cavités sont occupées par la goëthite et l'hématite indigènes (fig. 2g).

En résumé, les chapeaux de fer sur sulfures sont caractérisés par une constitution minéralogique dominée par l'abondance de goëthite et accessoirement d'hématite, parfois de jarosite et de minéraux métalliques supergènes, une composition géochimique très influencée par la paragenèse minérale primaire et les phénomènes de lessivage, et enfin, par des pseudomorphoses très caractéristiques.

2 - Chapeaux de fer développés sur gîtes sidéritiques

Il en existe très peu d'exemples décrits dans la littérature. Les quelques exemples connus, sont ceux de Batère, de Paradise Creek et de Western Guizhou. Du fait de son insolubilité plus élevée que celle des épontes, le chapeau de fer se développe généralement là où affleure la sidérite. Le tableau IV résume les principales caractéristiques minéralogiques et géochimiques de ces trois sites.

Tableau IV - Quelques traits caractéristiques des chapeaux de fer dérivés de la sidérite

Gîte	Localité	Paragenèses primaires	Minéralogie des zones superficielles		Caractéristiques chimiques
			a	b	
Batère	France	Sidérite dolomite ankérit. Quartz, Chlorite Muscovite	-	Goëthite, ± Hématite Lépidocrocite Pyrolusite-Muscovite Quartz, ± Chlorite	Fe: 47 % Mn: 3 %
Paradise Creek	Australie	Sidérite magn. dolomite, Quartz Feldspaths Chlorite Muscovite Traces de pyrite et de chalcoppyrite	-	Goëthite, ± Hématite Pyrolusite-Manganite Quartz-Muscovite	Fe: 56 % Cu: 250-2000 ppm Zn: 60 ppm S: 0,005-0,01 ppm
Western Guizhou	Chine	Sidérite grise fine	Hydro-hématite Sidérite grise jaunâtre	Goëthite-Hématite Pyrolusite Manganite Quartz	Fe: 48-62 % Mn: jusqu'à 3 % Cu: 0,004-0,15 % Zn: 0,01-0,017 % Pb: 0,001-0,015 % S: 0,045-0,51 %

a) Zone d'oxydation enrichie (sulfates, carbonates et oxydes)

b) Chapeau de de fer

La minéralogie des formations ferrugineuses supergènes provenant de l'oxydation de la sidérite est dominée par la grande abondance de goëthite à laquelle s'associe l'hématite en teneur subordonnée. Des minéraux manganésifères (pyrolusite, manganite) y sont fréquents, de même que les quartz, les muscovites. Les caractéristiques chimiques de ce type de chapeau de fer sont les fortes teneurs en Fe (48 à 62 %) et en Mn (jusqu'à 3 %). A Western Guizhou a été noté un léger appauvrissement en S, P, Pb, Zn, tandis que dans les ferruginisations de Paradise Creek, des enrichissements partiels en Al et K liés à l'augmentation des teneurs en micas dans les niveaux ferrugineux ont été signalés. Enfin, les figures de répliques typiques sont des pseudomorphoses rhomboédriques fréquemment occupées par la goëthite indigène.

IV - Conclusion

Une minéralisation primaire riche en fer, sulfuré, carbonaté ou silicaté, soumise à l'altération météorique, induit de nouveaux matériaux spécifiques de sa nature et de l'intensité de l'altération. Ces matériaux secondaires donnent une formation appelée "chapeau de fer", dont la texture et la structure sont particulières, et les compositions minéralogiques et chimiques spécifiques. Des caractères des matériaux secondaires sont hérités, d'autres sont typiques des transformations subies. L'analyse de ces matériaux peut donc fournir des informations sur la nature de la minéralisation primaire et les conditions de transformation.

Chapitre II

LE CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL DES CHAPEAUX DE FER DE PAGALA

Le Togo est situé dans la zone mobile de l'Afrique de l'Ouest correspondant à la Chaîne des Dahomeyides. Les premières études géologiques fondamentales au Togo et dans les pays voisins datent du début du siècle avec Koert (1910); elles se sont poursuivies avec Robertson (1921, 1924, 1925), Arsandaux (1925), de Chetelat (1928), Kouriatchy (1931, 1932, 1934), Katchinsky (1933-1935), Chermette (1949) et Aicard (1951, 1959).

Ces travaux, essentiellement descriptifs et à but d'inventaire, ont permis de préciser la stratigraphie de l'Afrique de l'Ouest. C'est ainsi que, d'après Aicard (1959) dont les travaux tentaient de confirmer les hypothèses de Roques (1948), les connaissances géologiques peuvent être résumées de la façon suivante: du Sud vers le Nord du Togo se rencontrent successivement le Dahomeyen constituant le socle précambrien sur lequel reposent en discordance les formations de couvertures plissées, l'Atacorien et le Buem; et non plissée, le Voltaïen.

Les travaux récents, avec une approche structurale à l'échelle du Togo et de la région, ont été ceux de Affaton (1971, 1975, 1987), Simpara (1978), Bessoles et Trompette (1980), Drouet (1986, 1989), et plus récemment les travaux cartographiques du DGMG-BNRM par Godonou et al. (1986), Sylvain et al. (1986 a et b).

Dans cette voie, la vue d'ensemble synthétique présentée par Affaton (1987) sera résumée ici afin d'esquisser le cadre des recherches menées sur les chapeaux de fer à l'échelle de la sous-région et avec une approche dynamique (fig.3). On distinguera le bassin des Volta et la Chaîne des Dahomeyides.

I - Le bassin des Volta

Il correspond à l'avant-pays de la Chaîne des Dahomeyides. C'est la couverture sédimentaire d'âge protérozoïque supérieur à paléozoïque inférieur, déposée au cours de la taphrogenèse responsable du découplage lithosphérique et de l'individualisation des cratons ouest-africain et bénino-nigérian et d'un proto-océan panafricain (Affaton, 1987). Elle est constituée en majeure partie de matériels détritiques. Plusieurs formations, réparties en trois supergroupes séparés chacun par une discordance y ont été définies.

A - Les supergroupes du bassin des Volta

1- Le supergroupe de Boumbouaka

Il affleure très bien au Nord-Togo et au Ghana et comprend essentiellement des grès variés et des shales. A ce supergroupe correspond le massif de Gambaga représenté par les cuestas des Monts Boumbouaka au Togo. Il est en discordance fondamentale sur le substratum birrimien.

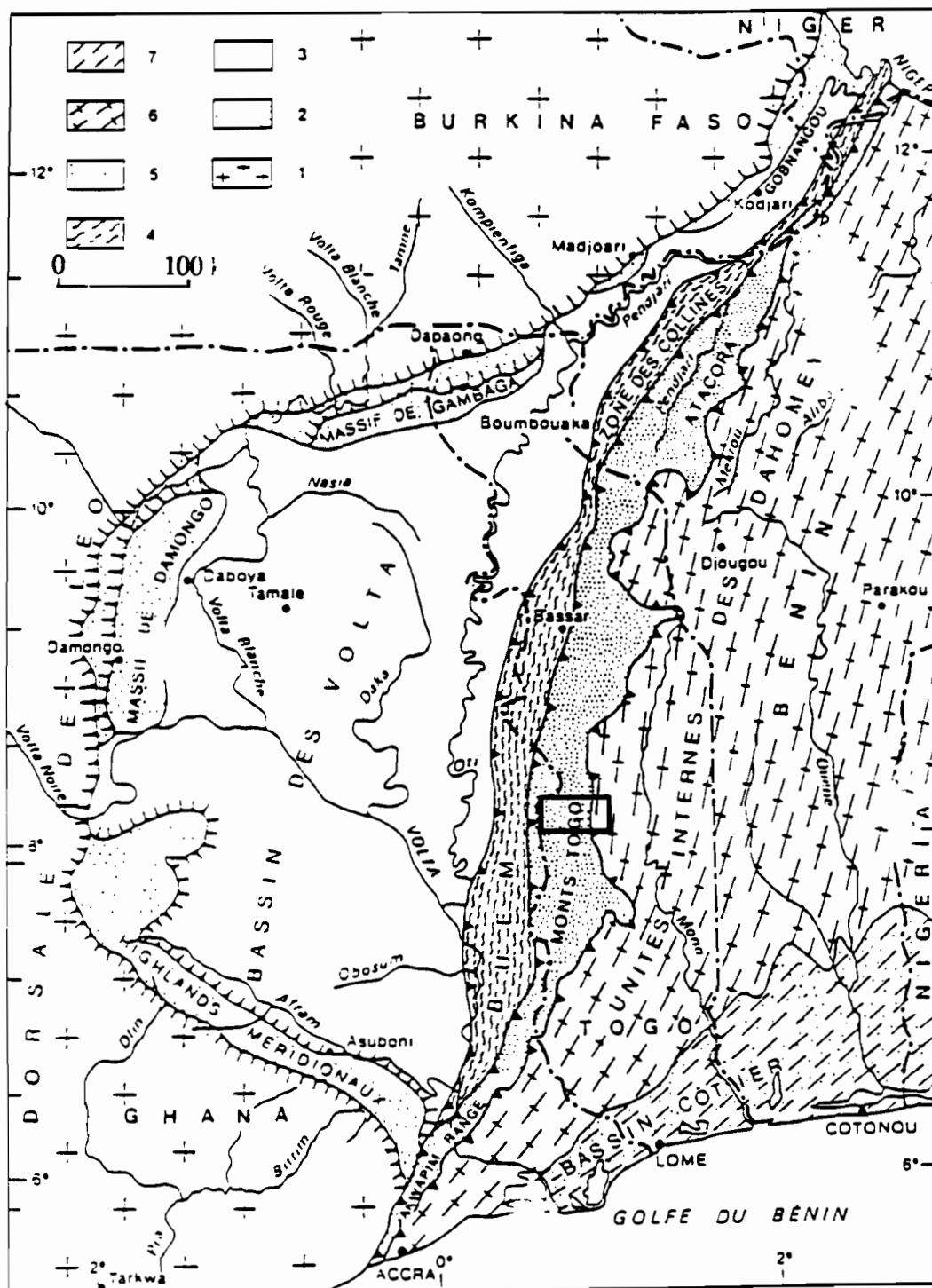


Figure 3 - Principales unités structurales et géomorphologiques des Dahomeyides d'après Affaton (1987), et zone d'étude.

1) - Socle birrimien; 2) - Supergroupe de Boumbouaka; 3) - Supergroupes de l'Oti et de Tamalé; 4) - Unité structurale du Buem; 5) - Unité structurale de l'Atacora; 6) - Unités internes des Dahomeyides; 7) - Formations tertiaires.

2 - Le supergroupe de la Pendjari (ou de l'Oti ou de l'Afram)

Il affleure au Ghana, Nord-Togo, Bénin et au Sud-Est du Burkina Faso. Ses caractéristiques lithologiques sont: - à la base, la triade tillite - carbonate - silicite; - au sommet, des shales et siltstones variés et des grès à lentilles phosphatées. Il est en discordance de ravinement glaciaire sur le supergroupe inférieur. Il correspond à la partie centrale plate du bassin des Volta au Togo.

3 - Le supergroupe de Tamalé

Connu seulement au Ghana, il est constitué de sédiments molassiques provenant du démantèlement des Dahomeyides, en particulier des unités structurales du Buem et de l'Atacora. On y distingue des conglomérats polygéniques, des shales et siltstones, des diamictites, des grès feldspathiques plus ou moins argilo-micacés à intercalations de shales et de siltstones.

Le bassin des Volta représente l'une des principales unités structurales de l'Afrique de l'Ouest. Il est caractérisé par une structure monoclinale, à faible pendage vers le SE, qui devient intensément plissée à l'approche de la Chaîne des Dahomeyides.

B - Les ressources minérales dans le bassin des Volta

Les ressources minérales y sont rares et sont généralement localisées dans le supergroupe de la Pendjari: ce sont des calcaires à barytine, des minerais de manganèse et des phosphates.

II - Les Dahomeyides

Les Dahomeyides correspondent à la partie sud-occidentale de l'orogène panafricain. Il s'agit d'une chaîne résultant de la collision entre la plaque ouest-africaine et la plaque bénino-nigériane. Cette chaîne comprend les unités structurales du Buem, de l'Atacora et de la Plaine du Bénin. Les unités structurales du Buem et de l'Atacora seraient des équivalents latéraux plissés et métamorphiques du bassin des Volta au Togo.

A - L'unité structurale du Buem

Elle représente l'unité la plus externe de l'orogène panafricain des Dahomeyides et correspond à une zone de collines moutonnées. C'est une zone large en moyenne de 15 km, allongée et orientée N-S à NNE-SSW, allant depuis le "W" du Niger jusqu'au Sud du Ghana. Elle est limitée à l'Ouest par le bassin des Volta qu'elle chevauche et à l'Est par l'unité structurale de l'Atacora qui la chevauche. Le Buem affleure au SE du Burkina Faso, Nord du Bénin, et Nord du Togo qu'il traverse en écharpe pour disparaître au Sud du Ghana.

Les données lithologiques recueillies dans les diverses régions, en particulier au Nord-Togo, ont permis de définir des groupes et des formations au sein du Buem. Ces formations ont leur équivalent dans le bassin des Volta.

A la base, des shales, des grès micacés et des grès moyens feldspathiques à stratifications obliques sont l'équivalent de la partie supérieure du supergroupe de Boumbouaka.

Au dessus, l'équivalent du supergroupe de la Pendjari y est composé de mixtites grossières à fréquentes intercalations de grès-quartzites et de rares passées de calcaires dolomitiques, puis des hématites microconglomératiques polygéniques à lentilles de silexites, de shales et de grès passant latéralement à des silexites plus ou moins hématitiques et comportant parfois des volcanites à affinités calco-alcalines.

Enfin des shales et siltstones à intercalations de grès et de calcaires occupent la partie supérieure de la séquence. On y rencontre également des lentilles de métavolcanites et de serpentinites chromifères.

L'unité structurale du Buem est donc constituée en partie par des équivalents latéraux, tectonisés et anchimétamorphiques, des formations du supergroupe de la Pendjari et des groupes supérieur et moyen du supergroupe de Boumbouaka.

Au Nord et à l'Est, le Buem est caractérisé par des manifestations métamorphiques et par le développement d'un important réseau de filonnets de quartz et de calcédoine dans les grès-quartzites (Simpara, 1985). Deux phases de plissement correspondant à deux phases tectoniques y ont été décrites. La première phase, ductile, est matérialisée par des plis isoclinaux à schistosité de flux liée à un anchimétamorphisme. La seconde phase, plus cassante, est caractérisée par des plis déversés ou en chevrons centimétriques à schistosité de fracture et un intense écaillage.

Le Buem occidental comprend les formations définies plus haut. Il est indemne de tout métamorphisme. Il est caractérisé par des plis à grand rayon de courbure déversés vers l'WSW. Il présente peu de veinules et filonnets de silice.

B - L'unité structurale de l'Atacora

Elle constitue la seconde unité structurale externe des Dahomeyides. Elle s'étend depuis les environs du "W" du Niger au Nord jusqu'au Golfe de Guinée au Sud. Elle couvre ainsi la chaîne de l'Atacora au Bénin, les Monts-Togo au Togo, et l'Akwapim Range au Ghana. Elle est constituée par une couverture plissée, allant du faciès anchizonal au faciès schiste vert. Elle chevauche le Buem à l'Ouest et est chevauchée à l'Est par l'unité structurale de la Plaine du Bénin. Au Sud-Est du Ghana, l'Atacora est en contact direct avec le bassin des Volta.

Les différents faciès lithologiques le plus souvent rencontrés sont des quartzites, des schistes et des micaschistes, répartis en deux grands ensembles: les "quartzites de l'Atacora" au sens strict" et les "schistes de l'Atacora ou le complexe de Kanté" (Affaton, 1987). Sur le plan lithostratigraphique, les seconds reposent en discordance de ravinement pro-parte glaciaire sur les premiers.

1 - Les quartzites de l'Atacora au sens strict

Ils correspondent à l'Atacorien des anciens auteurs. Les divers termes lithologiques sont des grès-quartzites et des quartzites variés à passées de quartzoschistes, de micaschistes variés et de métavolcanites. Des filons de quartz sulfurés et aurifères ont été retrouvés au sein de ces quartzites. Tout comme les schistes, les quartzites sont plissés et forment des anticlinoriums comme à Tchakalakou et à Kotopounga (Affaton, 1987).

2 - Les schistes de l'Atacora ou le complexe de Kanté

Cet ensemble est considéré par Affaton (1987) comme la série de Kandé de Pognet (1957) et Aicard (1957). Depuis la latitude de Natitingou au Nord-Bénin jusqu'au Sud-

Ghana, les faciès rencontrés sont presque identiques. Ce sont surtout, d'Ouest en Est, des séricitoschistes, des chloritoschistes, des quartzoschistes ou schistes ardoisiers et des quartzites sériciteux. Par ailleurs, on observe localement des métasilexites, des métavolcanites, des serpentinites chromifères, des méta-arkoses et des cipolins calcaire-dolomitiques. Par endroits, des métamixtites ou métaconglomérats polygéniques ont été rencontrés à la base des schistes de l'Atacora. C'est dans les schistes de l'Atacora que sont localisées les métaphospharénites découvertes par Blot en 1985, et les minéralisations de type itabirite à Labo et Dako (Kpalma et Seddoh, 1983). Ces schistes sont plissés, dessinant parfois des synclinoriums comme celui de Toucountouna.

En résumé, l'unité structurale de l'Atacora est composée de deux ensembles séparés par des métatillites ou métamixtites. Il s'agit d'un ensemble inférieur dénommé "quartzites de l'Atacora", et d'un ensemble supérieur appelé "complexe de Kanté".

Du point de vue structural, Affaton (1987) décrit dans cette unité, quatre phases tectoniques:

- une première phase P₁ avec des plis isoclinaux couchés, centimétriques à métriques, et une schistosité de flux S₁ correspondant au plan principal de débit, avec un métamorphisme à faciès schiste vert croissant de l'Ouest vers l'Est;
- une seconde phase P₂, induisant des plis centimétriques à kilométriques, ouverts ou déversés vers l'Ouest, une schistosité de fracture S₂ et un métamorphisme anchizonal;
- une troisième phase P₃, responsable des anticlinoriums et synclinoriums cylindriques à coniques, droits ou déversés vers l'Ouest;
- une quatrième phase P₄, localisée à la bordure orientale de l'unité structurale de l'Atacora, se traduit par des virgations, notamment dans les unités internes des Dahomeyides.

En conclusion, les roches de l'unité structurale de l'Atacora ne sont pas seulement plus métamorphosées que celles du Buem, mais elles sont aussi plus déformées. Le métamorphisme et les déformations croissent de l'Ouest vers l'Est. L'unité structurale de l'Atacora chevauche l'unité structurale du Buem. Le plan de chevauchement présente un pendage relativement fort, et est par endroits matérialisé par des brèches et mylonites généralement riches en filonnets et veinules de quartz (Affaton, 1987).

C - L'unité structurale de la Plaine du Bénin

Elle s'étend à l'Est de l'unité structurale de l'Atacora, et est à cheval sur le Sud-Est du Ghana, le Togo, le Bénin et le Nigéria. Elle se présente sous la forme d'une pénéplaine gneissique, parsemée d'inselbergs et charriée sur l'unité structurale de l'Atacora.

Quatre grands ensembles lithologiques y sont décrits (Affaton, 1987):

- Un ensemble métasédimentaire composé de micaschistes et de quartzites micacés à disthène, longtemps attribués à l'Atacorien par les anciens auteurs (Pouget, 1957; Aicard, 1957; Robertson, 1921, 1924, 1925; etc.), associés à des marbres dolomitiques, des paragneiss, des amphibolites et orthogneiss variés et des pegmatites. Ces métasédiments forment dans le paysage des crêtes ou chaînes allongées généralement NNE-SSW. C'est un ensemble beaucoup plus métamorphosé que ceux de l'Atacora. Il repose en discordance angulaire ou fondamentale sur l'unité migmatitique d'Afem.
- Un ensemble orthogneissique comprenant des orthogneiss micacés et à grenat, des pegmatites et de rares amphibolites. Ce sont les orthogneiss de Kara - Niamtougou, de Kouandé et une partie du complexe de Mô (orthogneiss), d'âge éburnéen (1677 ± 220 à 2064 ± 90 Ma) et remobilisé au Panafricain (Caen-Vachette et al., 1979).
- Un ensemble migmatitique représenté par les migmatites d'Afem, de Kpédomé, d'Agramarou ou de Nikki, d'âge birrimien (2000 ± 250 Ma) et remobilisé au Panafricain (600 ± 50 Ma).

- Un ensemble essentiellement granulitique, basique à ultrabasique, représenté par les massifs Kabyé, Dérourarou et Djabatouré, les Monts Lato et Agou, et les unités d'Anié et de Titigbé constituant la zone de suture des Dahomeyides (Affaton, 1987).

On rencontre, associés aux faciès de socle remobilisé, des intrusions très souvent de composition granitique, renfermant des diorites et syénites. Ce sont des granitoïdes dénommés "Older Granites" par opposition aux "Younger Granites" jurassiques du Plateau de Jos au Nigéria. Ces granitoïdes sont mis en place au sein des trois premiers ensembles de l'unité interne des Dahomeyides et ont un âge compris entre 780 ± 40 Ma et 446 ± 30 Ma (Affaton, 1987). Au Nigéria, ils sont associés à des charnockites dans les secteurs d'Ibadan et de Bauchi.

L'unité structurale de la Plaine du Bénin a subi cinq phases de plissements dont une première serait propre au substratum polycyclique; les quatre dernières ont été bien définies dans l'unité structurale de l'Atacora. Il s'agit d'une phase de déformations P_n , avec une schistosité S_n et un métamorphisme M_n à faciès amphibolite à granulite.

III - Les ressources minérales au sein des unités structurales des Dahomeyides

A - Les ressources minérales dans le Buem

Très peu de ressources minérales sont connues dans le Buem. Les principales sont les phosphates, le manganèse, le fer et la chromite.

B - Les ressources minérales de l'Atacora

- L'or est connu au Nord-Bénin à la latitude de Natitingou, dans la région de Perma (Affaton, 1987). Il est sous forme alluvionnaire et filonienne. L'or primaire se rencontre dans les filons de quartz blanc laiteux, intercalés dans les quartzites de l'Atacora. Ces filons aurifères renferment en outre des sulfures de type pyrite, chalcopyrite, galène, blende.

- Le fer est connu sous forme de nombreux indices de petite quantité au Nord-Togo dans les secteurs de Bassar et de Bafilo. Des faciès analogues ont été observés dans les schistes du synclinorium de Toucountouna au Nord-Bénin (Affaton, 1987). D'autres indices ont été observés au Togo à Lalamila-Tintchro (secteur de Pagala).

- Le rutile. Il s'agit des minéralisations en hématite et rutile à Konda dans la région de Kpalimé. Cette minéralisation renferme aussi des éléments radioactifs de type uranium et thorium. Les teneurs moyennes en Fe_2O_3 et TiO_2 sont respectivement comprises entre 40 et 83 %, 3 et 50 %. Ce type de gisement, unique en son genre en Afrique de l'Ouest (Ilavsky, 1972), serait d'origine sédimentaire. Par ailleurs, des dépôts alluvionnaires et éluvionnaires existent dans les rivières drainant l'Atacora et son contact avec le socle.

- Des indices d'uranium ont été décelés à Pagala.

- Le marbre est connu au Togo dans les secteurs de Djamdé et Pagala. Ce sont des marbres dolomitiques, souvent associés aux schistes de l'Atacora, à grain fin et de couleurs variées. Les plus importants gisements sont ceux de Pagala et de Djamdé.

- Des métaphospharénites et des quartzites phosphatés sont découverts récemment dans la région de Bassar (Blot, 1985). Ils constituent des intercalations métriques à décimétriques dans les schistes de la Kama. Ces métaphospharénites sont à grain fin, et le plus souvent à structure massive. Leur teneur en P_2O_5 est de 34 à 36 % pour les quatre

gîtes de Bassar. Il s'agit essentiellement de fluoroapatite. Les réserves estimées sont inférieures à 5 Mt pour chacun d'eux (Pascal et Arégba, 1989).

D'autres indices ont été signalés, toujours dans l'Atacora, dans la région de Pagala plus au Sud. Il s'agit de phosphates oolithiques cuprifères associés à des phosphates de baryum éluviaux dans un contexte également schisteux.

- *Les chapeaux de fer polymétalliques.* Ce sont des indices de surface très riches en zinc. Ils sont connus en grand nombre dans la région de Pagala au centre-Togo. Ils sont localisés dans les schistes de la "série de Pagala". Ils présentent des anomalies importantes en Zn, Ba, Pb et Cu. Ces indices de surface sont peut-être des marqueurs d'importantes minéralisations polymétalliques dont la nature est jusqu'alors inconnue. *Ce sont ces chapeaux de fer qui constituent le sujet de ce travail.*

C - Les ressources minérales dans l'unité de la plaine du Bénin

Contrairement au Birrimien volcanosédimentaire très minéralisé à l'Ouest, la Plaine du Bénin, essentiellement gneissique, présente un potentiel minier très faible. Ce fait peut être interprété comme dû, d'une part à la faible proportion de roches basiques à ultrabasiques au sein du socle et, d'autre part, à sa nature polycyclique engendrant de vastes zones non propices aux minéralisations, bien que la réactivation panafricaine ait favorisé en de rares endroits, l'enrichissement en certains éléments (Wright et al., 1985).

- L'or est connu au Nigéria et au Togo. Il s'agit d'or alluvionnaire ou éluvionnaire et d'or filonien. On trouve du fer au Nigéria et au Togo à Bagbé, et du manganèse au Nigéria. Des gîtes de chromite sont très souvent liés aux roches basiques et ultrabasiques de type serpentinite qui jalonnent la suture des Dahomeyides. On en connaît au Nigéria, au Bénin et au Togo. A ces corps basiques chromifères, sont souvent associées des minéralisations en talc (Dempster, 1967). Des indices d'uranium ont été décelés dans les orthogneiss de Niamtougou et de Sarakawa au Togo.

Après ce bref inventaire des différentes minéralisations connues dans les unités structurales des Dahomeyides et du bassin des Volta, on peut dire que le potentiel minier de cet ensemble n'est pas négligeable, même s'il n'égale pas celui du domaine occidental (le Birrimien du Ghana ou du Burkina Faso). Les massifs basiques et ultrabasiques et la chaîne de l'Atacora sont les plus minéralisés. De plus, les chapeaux de fer polymétalliques, récemment découverts à Pagala, peuvent être des indicateurs de minéralisations intéressantes comme c'est le cas dans un tout autre contexte (Birrimien) à Perkoa au Burkina Faso où ces chapeaux de fer coiffent des minéralisations sulfurées massives essentiellement de zinc. D'autre part, les indicateurs d'un volcanisme qu'on rencontre dans l'Atacora peuvent être un contexte favorable à d'importantes minéralisations dans le secteur, lorsqu'on sait que les formations volcano-sédimentaires sont d'une grande importance du point de vue métallogénique. Ainsi une meilleure connaissance de la géologie de cette zone mobile et des recherches systématiques pourront améliorer la connaissance du potentiel minier du domaine panafricain oriental, lequel n'est pas forcément dépourvu d'intérêt minier comme on l'a souvent prétendu.

IV - Cadre géologique du secteur à chapeaux de fer de Pagala.

Le secteur à chapeaux de fer de Pagala fait partie de l'unité structurale de l'Atacora. Kouriatchy (1932) découvre des dolomies cristallines à l'Ouest de Pagala et en donne une description sommaire. Kpalimé (1979) fait un levé géologique de ces dolomies en vue de leur évaluation. Il précise leur contexte lithologique: il s'agit de schistes graphiteux, de micaschistes et de quartzites micacés. Par ailleurs, il signale la présence de formations

ferrugineuses qu'il qualifie de brèches ferrugineuses à carapaces latéritiques déjà décrites comme encroûtement ferrugineux (Dempster, 1965, 1966, 1967) et brèches tectoniques (Lasserre, 1979, 1980).

Dans le secteur de Pagala, Godonou et al. (1984, 1986), Magat et Blot (1984, 1987), Blot et Magat (1989) distinguent trois grandes formations qui sont, d'Ouest en Est, les séries de Kandé, de Pagala et de l'Okou (fig. 4). Magat et Blot (1987) établissent par ailleurs une carte géologique au 30 000^e qui porte uniquement sur la série de Pagala.

A - La série de Kandé.

Elle comprend des schistes chloriteux plus ou moins sériciteux, des schistes feldspathiques et carbonatés, des quartzites et grès-quartzites ferrugineux assimilables à des itabirites, des métasilexites, des serpentinites à magnétite, pyrite et calcite. Elle renferme des filonnets de quartz.

B - La série de Pagala.

Elle a été définie par Godonou et Blot (1984). Elle est limitée à l'Ouest par la Série de Kandé et à l'Est par la Série de l'Okou. D'après ces auteurs, elle correspond à l'Atacorien au sens strict. Les différents termes lithologiques rencontrés sont des quartzites à muscovite et feldspaths, des micaschistes à grenats ou à feldspaths (surtout albite), des schistes micacés puissants qui constituent le faciès le plus développé, comportant des niveaux de schistes noirs, de micaschistes, de chloritoschistes, de cipolins, de phospharénites et un cortège de roches à chimisme tholéïitique. C'est dans cette série que sont localisés les chapeaux de fer qui ne semblent pas être associés à aucun faciès particulier. Lorsqu'ils existent, on les trouve dans un contexte schisteux, ou parfois juxtaposés à des carbonates ou à des quartzites.

C - La série de l'Okou

Les principaux faciès lithologiques rencontrés sont des gneiss à amphibole, des amphibolites, des gneiss à deux micas, avec ou sans grenats, et des niveaux de quartzites à muscovite et disthène. Godonou et al (1984) voient cette série comme volcano-sédimentaire par ses faciès, et comme faisant partie d'un grand contact tectonique, par la présence de quartzites mylonitisés formant des collines parfois sécantes à la direction structurale générale et par l'existence de migmatites, de micaschistes et de gneiss qui font penser à une remontée du socle par écaillage.

Ces auteurs notent d'Ouest en Est, un métamorphisme mésozonal avec une retromorphose. Ils y ont également décripté deux phases tectoniques. La première phase constitue l'élément structural majeur représenté par la schistosité S_1 générale comprise entre $N 0^\circ$ et $N 20^\circ$. La seconde phase est liée aux virgations des micaschistes et aux plis métriques à décamétriques, voire hectométriques, qui affectent indifféremment les unités lithologiques.

D - Les extensions de l'Atacora au Sud de Pagala.

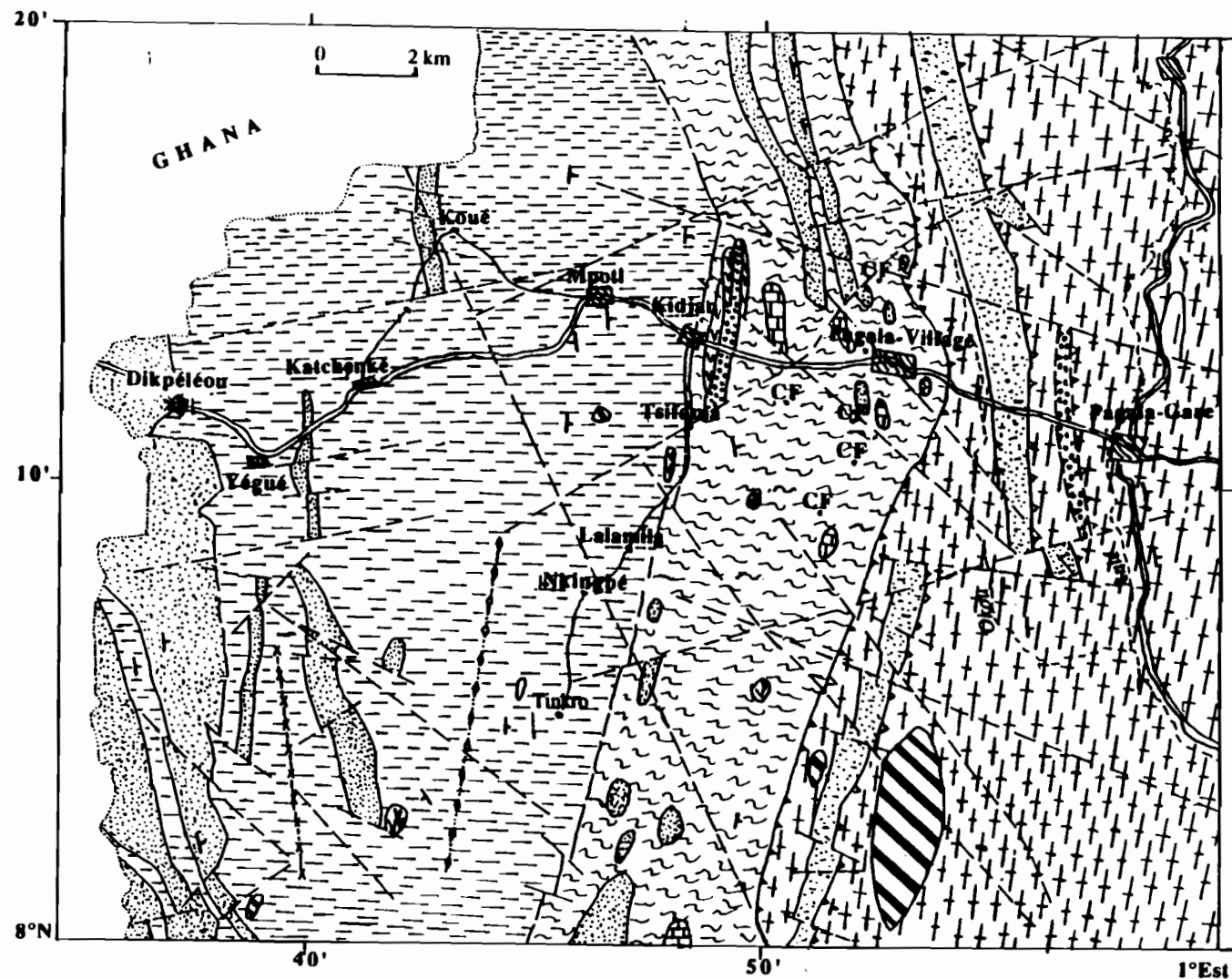


Figure 4 - Carte géologique schématique au 200 000^e du secteur de Pagala.(extrait de la feuille de Sokodé au 200 000^e d'après Godonou et al., 1986).

Lassère, avec la collaboration de Hottin, (1979) établit une lithostratigraphie du secteur de Kabagny, situé à 35 km au Sud de Pagala. Il définit ainsi quatre séquences lithostratigraphiques qui sont de bas en haut ou encore d'Ouest en Est:

- Une séquence de base (séquence 'a'). Elle est composée de quartzites à muscovite en bancs décimétriques à métriques, séparés par des interbancs de micaschistes quartzeux à muscovite, très plissotés. Il considère ces quartzites comme des quartzites atacoriens sensu stricto.

- Une séquence à affinité volcano-sédimentaire (séquence 'b'). Elle comprend essentiellement des micaschistes souvent quartzeux, à muscovite et chlorite, avec des intercalations de métalaves basiques (ortho-amphibolites dérivant probablement de basaltes ou d'andésites), des schistes noirs pyriteux et des schistes albitiques à chlorite, muscovite, parfois à grenat. Il signale la présence d'écaillés de socle rétomorphosé composées par des amphibolites à grenat et par des faciès feldspathiques. Il fait un parallélisme entre cette série et la série de Kandé.

- Une séquence intermédiaire (séquence 'c'). Elle comprend à sa base des quartzites, sous forme d'une barre constituant un ressaut dans le paysage, puis des schistes quartzeux à muscovite comportant localement des niveaux millimétriques ferrugineux et / ou des niveaux de schistes noirs pyriteux.

- Une séquence sommitale (séquence 'd'). Elle est essentiellement composée de micaschistes sombres, à grenat, assez plissotés, d'aspect noduleux, avec des passées d'amphibolites, et des intercalations de dolomies. L'aspect noduleux est dû aux grenats constituant de grandes plages pœcélitiques disloquées. Les micaschistes renferment par ailleurs des biotites relictuelles très souvent chloritisées.

Sur le plan structural, il définit deux domaines séparés par une bande à replis isoclinaux serrés d'orientation Nord-Sud:

- un domaine oriental peu tectonisé débutant par une structure anticlinale déversée vers l'Ouest dans sa partie sud et passant sur le flanc est de l'anticlinal à des séries non plissées monoclinales, faiblement pentées vers l'Est;

- un domaine occidental à plis isoclinaux ou monoclinal à fort pendage Est, se développant dans la séquence volcanosédimentaire.

Il interprète le style tectonique dans le domaine oriental comme celui d'une série adhérente au socle, et dans le domaine occidental comme un style de couverture épaisse, à tectonique de serrage accentuée, indépendante du socle. Quant à la bande médiane à replis isoclinaux, elle correspondrait à une manifestation, dans la couverture, d'un approfondissement vers l'Ouest du toit du socle par un jeu de failles inverses dans un serrage Est-Ouest.

Par ailleurs il signale l'absence de chevauchement des schistes par des quartzites dans la région, tel que connu plus au Nord. Le métamorphisme est de faible degré dans la zone à biotite avec une rétomorphose dans la zone à chlorite. La schistosité acquise dans le premier temps est affectée par une schistosité de crénulation (strain-slip) accompagnant la rétomorphose.

Magat et Blot (1984) établissent une corrélation entre les secteurs de Kabagny et de Pagala de la façon suivante:

- les quartzites à muscovite de base de la séquence "a" de Kabagny correspondent à ceux de Pagala;
- la séquence "b" volcano-sédimentaire de Kabagny correspond à la Série de Pagala;
- les quartzites francs de la séquence "c" correspondent à la Série de l'Okou;

- par contre les schistes quartzeux, les métalaves et les dolomies de la séquence "d" n'ont pas d'équivalent dans le secteur de Pagala d'une part, et d'autre part, les migmatites et les orthogneiss du secteur de Pagala ne sont pas connus à Kabagny.

Chapitre III

LE SECTEUR DE PAGALA. LITHOLOGIE - STRUCTURE ET ECHANTILLONNAGE

I - Cadre géographique

A - Situation géographique

Les chapeaux de fer qui font l'objet de ce mémoire ont été trouvés dans un secteur situé à l'Ouest de Pagala-Village dont les coordonnées géographiques sont 8°12'45" de latitude Nord et 0°52'40" de longitude Est. Ce secteur se présente en un rectangle de 13 km de long sur 10 km de large soit d'une superficie de 130 km². Il est localisé dans la région centrale du Togo, plus précisément au Sud-Ouest de l'agglomération de Blitta (fig. 5).

B - Géomorphologie

La région à chapeaux de fer appartient à la chaîne des Monts Togo correspondant à la partie méridionale de la chaîne de l'Atacora. Trois unités morphologiques (fig.6) y ont été définies (Blot et Magat, 1990).

- La zone des plateaux de l'Adélé. Elle s'étend entre les barres de quartzites de Kidjan jusqu'à la frontière avec le Ghana. Elle correspond à une ancienne surface souvent cuirassée, d'altitude variant entre 700 et 600 m environ, parfois surplombée par des reliefs réguliers un peu déjetés vers l'Ouest et bien marqués atteignant 800 m. D'autre part, elle subit une érosion régressive dépendant des cours d'eau qui la drainent. Dans cette zone les chapeaux de fer sont très discrets.

- La zone intermédiaire. Elle présente un dénivelé important (600 à 350 m) avec des pentes allant de 20 à 30 %. Elle correspond au raccord entre les plateaux, témoins d'une ancienne surface et le niveau de base que représente la plaine de l'Okou-Anié. Ce raccord est brutal donnant ainsi lieu à des falaises ou activement érodé. C'est dans ces conditions de dissection du raccord qu'apparaissent les affleurements de chapeaux de fer entre cette zone décapée d'extension réduite qu'ont été observés les chapeaux de fer.

- La plaine de l'Okou. Elle s'étend jusqu'à la rivière Anié à l'Est. Elle ne présente pas de dénivelé majeur (350 à 250 m d'altitude) et rejoint au Nord comme au Sud directement la zone des plateaux. Elle constitue le socle érodé, localement cuirassé à dominante amphibolo-gneissique. Elle est drainée par l'Okou, tributaire de l'Anié, et est traversée par le massif de Gabangala dont font partie les Monts Balam constitués de quartzites à disthène. Il n'y existe apparemment pas de chapeaux de fer.

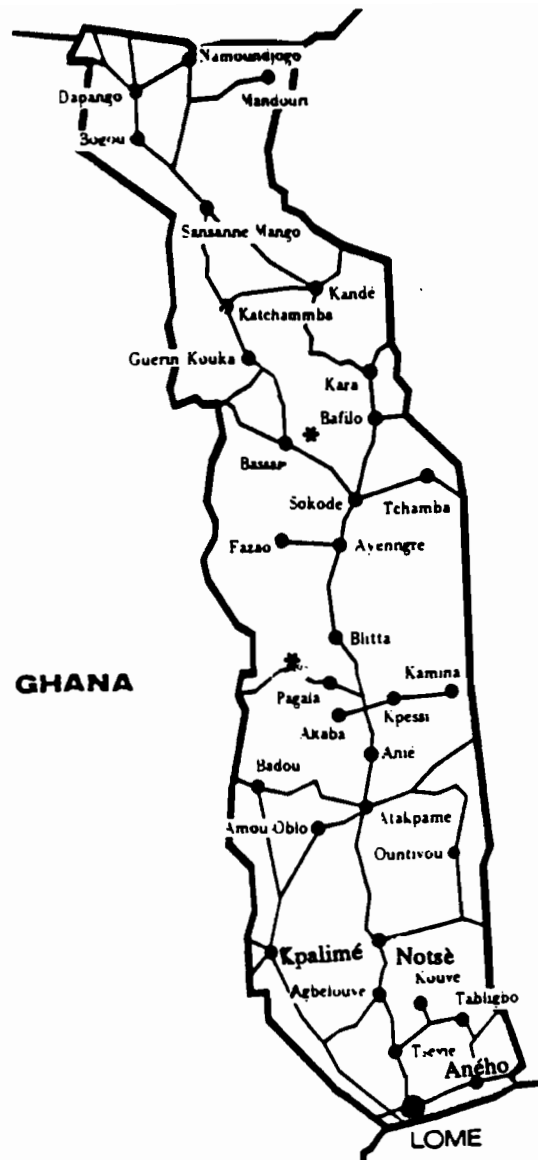


Figure 5 - Carte du Togo et zones d'étude*.

C - Hydrographie

Les principaux cours d'eau peuvent être regroupés en deux grands réseaux hydrographiques.

- Le réseau de Kélébo avec ses multiples affluents coulant N-S drainent le plateau de l'Adélé à l'Ouest ; ce réseau fait partie du bassin de la Volta.

- Le réseau de l'Okou à l'Est dont les principaux affluents sont l'Anamanié, dont le Pagala est un des tributaires, et le Pintiololo plus au Sud qui coulent d'Ouest en Est. L'Okou est tributaire de l'Anié. L'ensemble de ces cours d'eau appartient au bassin du Mono. Ces cours d'eau sont pérennes.

D - Climat et végétation

1 - Climat

Le secteur de Pagala jouit d'un climat intermédiaire tendant vers le type subsoudanien. Ce climat est caractérisé par une saison de pluie plus longue (mars à octobre) que la saison sèche (3 à 4 mois) comme l'illustrent les courbes de la figure 7 portant sur les données pluviométriques de deux stations de la région. Les précipitations sont importantes; la pluviométrie moyenne annuelle est de 1300 mm environ avec des écarts soumis à de fortes variations selon les années. La température interannuelle est de 24-25 °C; l'humidité relative est rarement inférieure à 60-70 %.

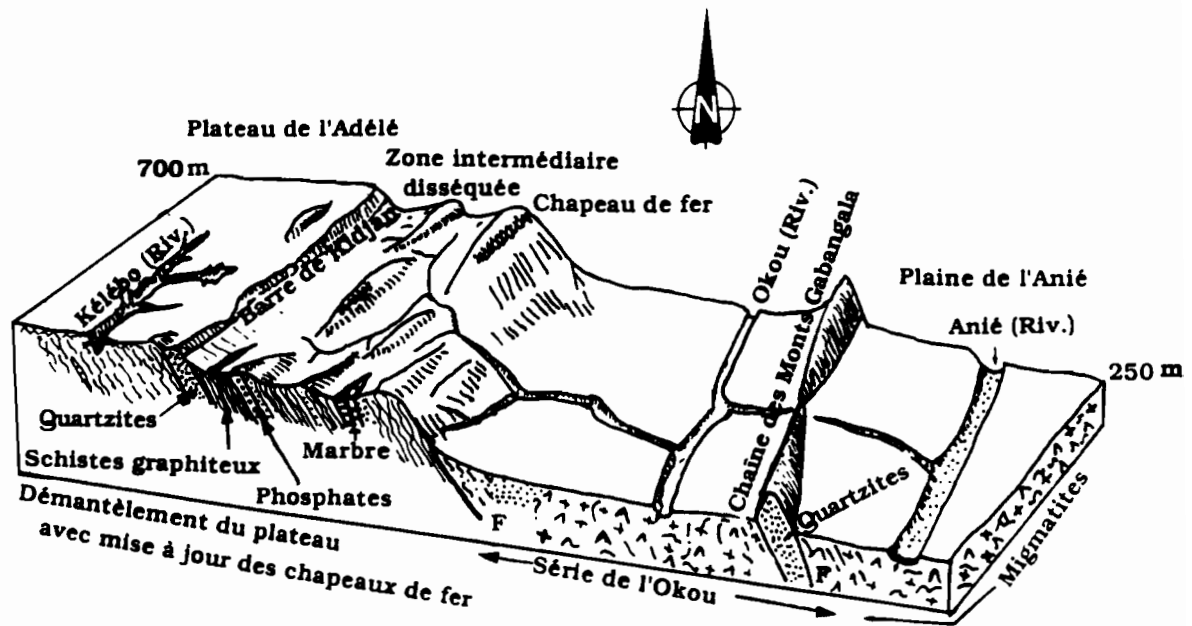


Figure 6 - Bloc diagramme montrant les principales unités géomorphologiques du secteur de Pagala. (Blot et Magat, 1990).

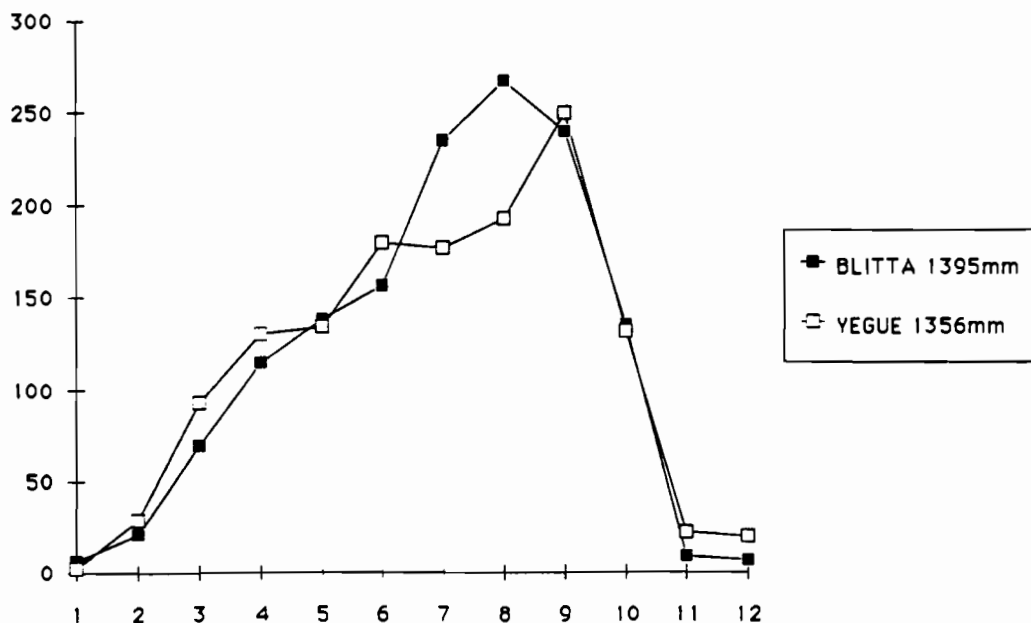


Figure 7 - Courbes pluviométriques de deux stations

2 - Végétation

C'est une mosaïque principalement composée de forêts de type soudanais à Sterculiacées et Sapotacées, des forêts galeries et de divers groupements de savanes souvent très arborées. Les forêts galeries renferment quelques essences exploitées comme bois d'oeuvre.

E - Géographie humaine

1 - Population

Le secteur d'étude est peuplé par divers groupes ethniques dont les plus représentés sont les Anyangas et les Adélés autochtones, cohabitant avec les Akposso, les Éwés, les Lossos et les Kabyés. Ces populations se concentrent dans des villages (Pagala, Tiéfouma, Mpoti) et de nombreuses fermes disséminées le long de la route bitumée. C'est une zone aujourd'hui en plein essor démographique en raison de la mise en exploitation des terres et des forêts.

2 - Activités économiques

L'agriculture demeure l'activité vitale de la population. Les principales cultures sont le maïs, l'igname, le manioc et la banane dont une partie est destinée à la consommation familiale et l'autre partie est vendue sur les marchés locaux. Le coton et accessoirement le café, et le cacao sont aussi cultivés pour l'exportation. Outre l'agriculture traditionnelle en extension grâce à des mouvements migratoires, l'exploitation forestière artisanale est bien développée. L'élevage se réduit à l'exploitation du ranch de l'Adélé (bovins) en dehors de la production à caractère familial d'ovins, de caprins et de volailles.

F - Voies de communication

Le secteur de Pagala est situé à l'Ouest de l'axe routier international Lomé - Ougadougou (Burkina Faso) et de la voie ferrée Lomé - Blitta. Il est traversé par une route goudronnée Langabou-Dikpéléou (61 km) qui constitue avec le tronçon Kidjan - Tiéfouma asphalté (2 km), les principales voies de communication. Pagala-Village est à 10 km de la voie ferrée au niveau de Pagala-Gare. Le reste des voies est constitué de pistes carrossables et de sentiers qui desservent les agglomérations.

II - Coupe géologique du secteur de Pagala

Les chapeaux de fer de Pagala sont localisés dans l'unité structurale de l'Atacora (Godonou et al., 1986, Magat et Blot, 1986, 1987, 1989). En vue de situer les ferruginisations secondaires dans un cadre géologique précis, une coupe effectuée suivant la route goudronnée construite en 1982 qui relie la frontière du Ghana à Pagala Gare, soit une coupe de 41 km environ. La coupe traverse d'Ouest en Est les séries de Kandé, de Pagala et de l'Okou. Les différentes formations traversées sont très altérées et affleurent mal.

A -Description de la coupe (fig.8 et tableau V)

Une description lithologique est donnée sous forme d'un tableau (tableau V) où figurent chacun des bancs et faciès avec, à chaque fois que la qualité de l'affleurement a

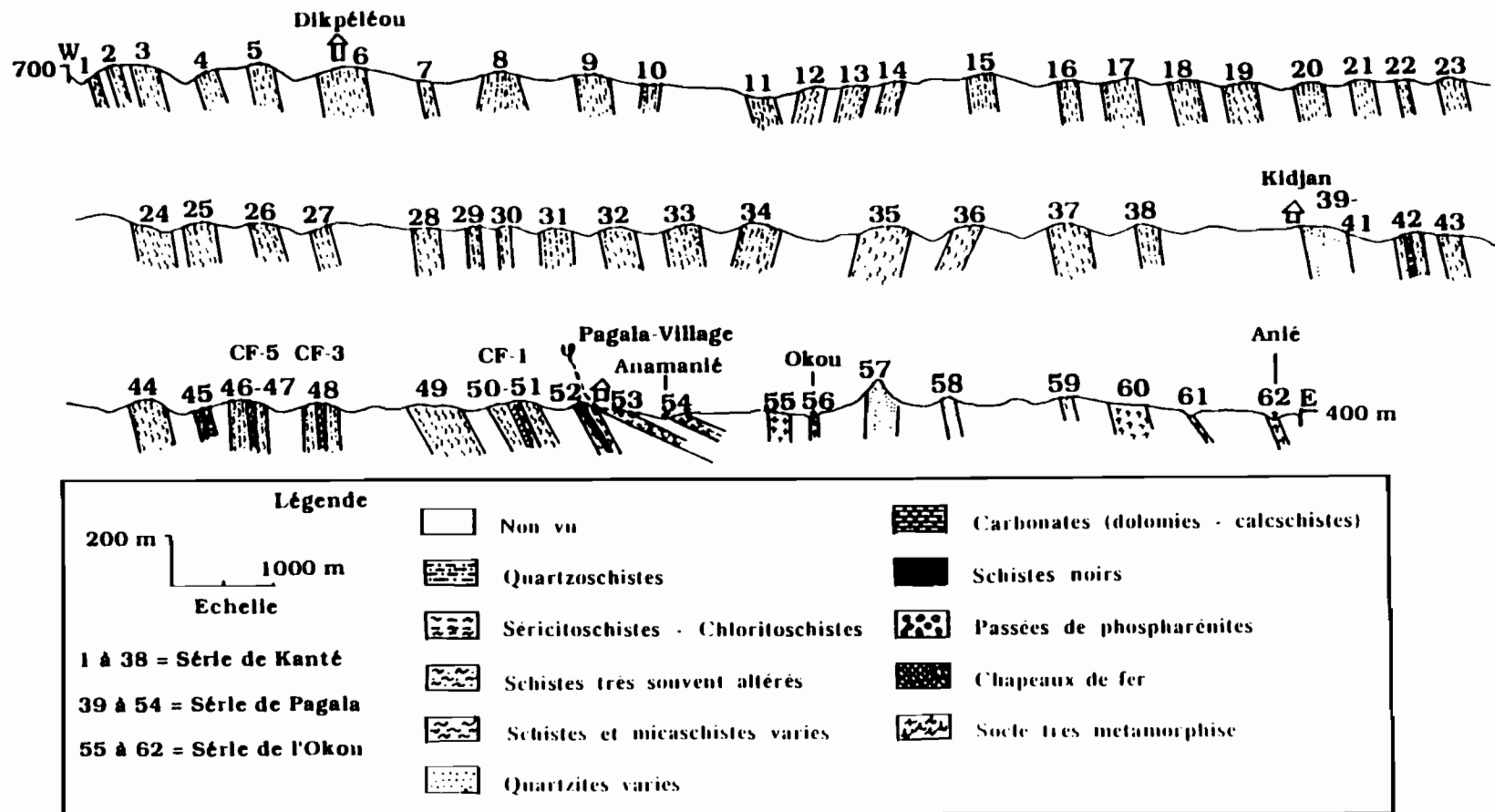


Figure 8 - Coupe schématique de la frontière du Ghana à Pagala-Gare.

Tableau V

Description lithologique de la coupe frontière Ghana - Pagala-Gare

Stat.	Ech.	Analyses	Caractéristiques pétrographiques
1			<i>Séricitoschistes quartzeux</i> sub-affleurant à pendage Est
2	1		<i>Quartzoschistes sériciteux</i> blanchâtres à jaunâtres parcourus par des veines de quartz d'épaisseur allant jusqu'à 1m. Ils sont également parcourus de fractures transversales N85° à 90° avec un pendage subvertical (87-90°N). La schistosité est N18°-35°E
3	2, 3		<i>Quartzoschistes sériciteux</i> et <i>séricitoschistes</i> à cassure blanchâtre parcourus de veines de quartz parfois boudinées. Ils présentent une structure schisto-amygdalaire et des linéations minérales. La schistosité varie entre N0° et N35° avec des pendages allant de 15° à 65°E. La largeur d'affleurement (L.A.) est de 50 m
4	5	L.M	<i>Quartzoschistes sériciteux</i> et <i>chloriteux</i> , et <i>séricitoschistes</i> plus ou moins quartzeux et plus ou moins graphiteux à veines et amandes de quartz, avec des lentilles ferruginisées de type chapeau de fer, des passées de quartzites sériciteux et des filonnets de quartz boudinés. Des plis isoclinaux ont été observés.
5	6	L.M.	<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> à chlorite, orientés N173°-62°E, montrant des fractures transversales dans l'ensemble. Ces fractures sont remplies de quartz et sont dues à un système cisailant N-S.
6			<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> à grains fins très feuilletés, orientés N175°-60°E à verticale. Ils constituent le substratum du village de Dikpéléou. L.A. : 400m.
7			<i>Séricitoschistes</i> à galets centumétriques de quartz et de quartzites, orientés N15°-68°E, et montrant des veines de quartz boudinées. L.A. : 50 m.
8			<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> parcourus de veinules et de filonnets de quartz. Ils présentent divers degrés d'altération sur leur largeur d'affleurement et des pendages opposés: N175°-70°W à vertical et N05°-54°E. L.A. : 250-300 m
9	7 8	L.M.	<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> à veines de quartz boudinées formant des amygdales. Une passée sub-verticale de métasilexites de 50 cm d'épaisseur y a été observée. De même, des plis B ₂ déversés vers l'Est avec des axes plongeant de 28°-42° vers le Sud y ont été mesurés.
10	9	L.M.	<i>Quartzoschistes chloriteux</i> et <i>sériciteux</i> en gros bancs orientés N165°-80°W avec des plis B ₂ difficiles à mesurer. L.A. : 40 m.
11	10		<i>Quartzoschistes chloriteux</i> montrant des <i>séricitoschistes</i> et des <i>chloritoschistes</i> avec prédominance de passées chloriteuses. Dans l'ensemble la schistosité varie de N12°-67°E à N170°-90°. Des fractures E-W à pendage 50°N y sont présentes. L.A. : 80 m.
12			<i>Séricitoschistes</i> sub-affleurants très altérés. Les mesures faites donnent N10°-90° et N172°-75°W. L.A. : 70 m.
13			<i>Quartzoschistes chloriteux</i> . L.A. : 20 m.
14			<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> altérés de couleur jaune à rouille très friables. Les mesures faites sont N175°-90° à N165°-85° W. L.A. : 80 m.
15	11, 12		<i>Quartzoschistes</i> et <i>séricitoschistes</i> à veinules de quartz parfois boudinées. Les <i>séricitoschistes</i> sont souvent très altérés. Ils sont orientés N10°-60°E, N15°-55° à 66°E. L.A. : 300 m.
16			<i>Quartzoschistes</i> pauvres en micas orientés N15°-82°E. L.A. 100m.
17			<i>Quartzoschistes</i> pauvres en micas, parcourus de veines de quartz, et à passées de <i>schistes graphiteux</i> . On note par endroits des plissements de faible amplitude. S ₁ = N10°-75°E à N20°-70°E. L.A.: 150 m.
18			<i>Quartzoschistes</i> probablement très altérés. S ₁ = N15°-48°E. L.A. : 55 m.
19	13	L.M.	<i>Séricitoschistes</i> à veines de quartz, et par endroits plissés. Il s'agit de plis décimétriques dissymétriques, avec des axes B ₂ orientés N165°-35°S. S ₁ = N10° à 15-70°E.
20	14		<i>Quartzoschistes chloriteux</i> , <i>séricitoschistes</i> à veines de quartz, et par endroits plissés avec des axes B ₂ orientés N 15°-12° S, et des fractures E-W à pendages variables N115°-85°S, N110°-90°, ect. Un phénomène de cisaillement dextre dont le plan oxydé est orienté N15°-24°W y a été noté. L.A. : 80 m.
21			<i>Quartzoschistes</i> à veines de quartz. S ₁ = N15°-60°E. L.A. : 70 m.
22-24			<i>Séricitoschistes</i> : S ₁ = N175°-40°E; N12°-55°E; N10°-40°E. L.A. = 240 m.

25	15	L.M.	<i>Séricitoschistes</i> renfermant des lentilles décimétriques de <i>quartzites ferrugineux</i> à faciès itabirite (15). Ils sont parcourus de fractures E-W (D 82 à 90°-80° à 84°S) le plus souvent ouvertes et remplies de quartz. Par ailleurs, ils présentent des plis isoclinaux (N170°-55°E et N175°-30°W) avec des axes B ₂ orientés N155° horizontaux ou N 160°-10° S. La schistosité générale varie entre N20°-50°E et N0°-55°E; L.A. = 400m
26			<i>Schistes</i> altérés très friables, de couleur rouille. S ₁ N175°-70°E; L.A.= 50 m
27			<i>Schistes</i> altérés (N20°-70°E), renfermant des veines et des filons de quartz. Ces schistes sont très souvent surmontés d'un profil latéritique où s'observe bien l'horizon B. L.A. = 200 m
28	105	L.M.	<i>Séricitoschistes</i> et <i>quartzoschistes</i> à nombreuses veines de quartz. Des structures tronquées liées à des phénomènes de fauchage ou troncature des couches dû à l'altération donnant ainsi l'impression de plissements spectaculaires y ont été observées. L.A. 400-500 m
29-32			<i>Schistes</i> altérés de couleur jaune. Ils sont souvent surmontés d'un profil d'altération rouge latérite, avec quelques veines de quartz. La schistosité (S ₁) est très variable N08°-85°E, N10°55°E, N 158°-65°E. La largeur d'affleurement est estimée à plus de 400 m en tout.
33-34	16	L.M.	<i>Schistes</i> altérés de couleur jaune à rouge latérite parcourus de veines de quartz blancs. Au sein de ces schistes altérés s'intercalent des schistes quartzeux de 50 m de large, qui sont parcourus de fractures transversales parfois remplies de quartz, et montrent des plis en chevrons. Dans les schistes altérés, s'observent souvent de plis décimétriques dissymétriques à flancs ouest laminés. La schistosité est N165°-75°W, les largeurs d'affleurement (L.A.) sont de l'ordre de 200 à 300 m pour chacun des affleurements.
40	106	CHIMIE	
35-36			<i>Schistes</i> altérés N173°-70°W; N35°-40°W avec des plis décimétriques déjetés vers l'Ouest (N163°-35°E et N05°-50°W) avec des axes B2 plongeant faiblement vers le Nord (N172°-34°N; N165°-25°N; N154°-23°N); L.A. = 150 m
37-38	94	L.M.	<i>Schistes</i> altérés de couleur jaune à jaune safran à nombreuses veines de quartz le plus souvent boudinées. Ils sont surmontés d'une mince couche de sol brun à rouge. La schistosité y est N178°-55°E; L.A. = 200 m
39	E95		<i>Schistes</i> très diversement altérés. Les faciès moins altérés sont gris tachetés de rouille, et renferment de nombreuses veines de quartz. Les faciès altérés constituent la réserve d'eau potable du village de Kidjan. La schistosité est N35°-50°E; L.A. = 120 m
40	17, 18, 19, 96	L.M.	<i>Quartzites micacés</i> à minéraux automorphes oxydés (pyrite?) parfois renfermant des passées de schistes. L.A. = 150 m.
41	97 100	L.M.	<i>Quartzites à feldspaths</i> , orientés N 35°-40° E. Ils constituent les grandes barres de quartzites de Kidjan. Ces barres sont décrochées E-W par un système de cisaillement senestre. L.A. = 200 m.
42	98	L.M.	<i>Schistes</i> altérés à passées de <i>phospharénites</i> et de <i>schistes noirs</i> ; ils sont orientés N-S et ont un pendage variant de 40° à 60°E; L.A. = 250 m. C'est dans ce niveau qu'est localisé un <i>chapeau de fer</i> associés aux phospharénites.
43	99	L.M.	<i>Schistes</i> altérés de couleur jaune et à fantômes cubiques. La schistosité S ₁ est N15°-50°E. Vers l'Est ces schistes sont de plus en plus altérés et présentent un aspect friable très poreux et sont de couleur gris cendre.
44	101,107 102	CHIMIE. L.M.	<i>Schistes micacés</i> montrant divers degrés d'altération et renfermant des veines de quartz et une passée de <i>calcschistes</i> et de <i>quartzites</i> . Les veines de quartz présentent par endroits des renflements simulant des tuyaux d'écoulement. Les calcschistes montrent aussi des débuts d'altération et des plis isoclinaux. Ces roches sont orientées dans l'ensemble N -S et pendent de 36° à 40°E. L.A. = 200 m.
45	78	L.M.	<i>Schistes noirs</i> ; S ₁ = N178°-35°E. L.A. = 200 m. Un <i>chapeau de fer</i> a été observé intercalé dans cette formation à ce niveau.
46-47	80	L.M.	<i>Schistes</i> altérés de couleur jaune safran à intercalations de <i>dolomies</i> plissées et à <i>niveaux ferruginisés</i> (CF5 et 4); S ₁ = N0° à 10-70 à 90°; L.A. = 300 m.
48	109, 111	L.M. L.M.	<i>Schistes micacés</i> altérés à faciès sous forme d'éléments englobés dans un faciès sol latéritique rouge. On observe des minéraux noirs automorphes de forme cubique. Des enracinements ferrugineux en relation avec le <i>chapeau de fer</i> n°3 sont intercalés entre les schistes et le faciès latéritique.
49	E103	L.M.	<i>Schistes à albite</i> renfermant des filons de quartz plissés; S ₁ = N163°-40°E; L.A. = 1200 à 1500 m.
50			<i>Micaschistes</i> ; S ₁ = N 158°-40° E; L.A. = 200m
51	104	L.M.	<i>Micaschistes</i> à intercalations de <i>dolomies</i> et de <i>schistes noirs</i> . Par ailleurs ces micaschistes renferment des minéraux automorphes oxydés (pyrite?). La schistosité y est N0°-60°E; L.A. = 400-500 m.

Tableau V - Suite

52	134	L.M.	<i>Micaschistes</i> à intercalations de <i>schistes noirs</i> et à passées de <i>calcschistes</i> identiques à la station 44. $S_1 = N 173^\circ-50^\circ E$. L.A. = 200m
53	124	L.M.	<i>Micaschistes</i> avec/ou sans grenats. Les <i>micaschistes</i> à grenats affleurent par endroits à Pagala-Village. Les grenats sont gros. La schistosité (S_1) est $N173^\circ-22$ à $35^\circ E$; L.A. = 400m.
54			<i>Micaschistes à minéraux noirs</i> en voie d'altération. $S_1: N165^\circ-22^\circ E$; L.A. = 50 m.
55	125		<i>Gneiss</i> avec / ou sans grenat à intercalations de bancs décimétriques de <i>quartzites</i> et à passées d' <i>amphibolites</i> et de <i>gneiss à amphibole</i> très finement cristallisée. A l'affleurement ces gneiss sont très altérés. On note la présence de veines de quartz. $S_1 = N5^\circ-65^\circ E, N15^\circ-70^\circ E, N20^\circ-70^\circ E$; L.A. = 800 m.
56	127 128	L.M.	<i>Amphibolites</i> à intercalations de <i>gneiss à amphibole</i> et de <i>quartzites</i> de couleur violette en bancs verticaux décimétriques. $S_1 = N20^\circ-80^\circ E$ à vertical. Elles affleurent dans la rivière Okou et sur la rive droite. L.A. = 50-80 m.
57	129	L.M.	<i>Quartzites micacés feldspathiques</i> très diaclasés avec des diaclases transversales verticales. Ils sont parcourus de failles plates $N 15^\circ-55^\circ E$ donnant au système sub-vertical un faux pendage Est et sont aussi intercalés d'une passée de roches tendres finement cristallisées et beaucoup plus riches en micas que l'ensemble. L.A. = 200 m.
58	131	L.M.	<i>Quartzoschistes francs</i> à passées de quartzites micacés très diaclasés. Les quartzites francs sont à grains grossiers. Par ailleurs s'observent des plis métriques qui semblent n'affecter que les faciès compétents. L.A. = 50-80 m.
59	132	L.M.	<i>Quartzites broyés</i> très finement lités ou feuilletés (schistosité soulignée par de fines paillettes de muscovite). $S_1 = N17^\circ-65^\circ E$; L.A. = 50-80m.
60			<i>Amphibolites</i> à nombreuses veines de quartz. Elles sont très altérées à l'affleurement. $S_1 = N178^\circ-60^\circ E$. L.A. = 900 m.
61			<i>Gneiss à muscovite</i> affleurant dans la petite rivière avant le centre des Américains. $S_1 = N05^\circ-30^\circ E$; L.A. = 30 m.
62	133	L.M.	<i>Amphibolites</i> affleurant sur la rive gauche et dans le lit de la rivière Anié. $S_1 = N05^\circ-40^\circ E$. L.A. = 50 m.

Légende : L.M. = lame mince; L.A. = largeur d'affleurement; Stat. = Station d'observations portée sur la coupe

permis de les mesurer, l'indication des largeurs d'affleurement et des directions structurales. Par ailleurs, dans le tableau sont indiquées les études faites pour ce travail.

Une description pétrographique détaillée des divers faciès lithologiques traversés par la coupe fait l'objet de la seconde partie de ce travail.

Les principaux faciès lithologiques rencontrés sont:

- Des *quartzoschistes sériciteux* fins à moyens. Ils affleurent entre les stations 1 et 21. Ce sont des roches de couleur blanchâtre ou grisâtre présentant une structure feuilletée ou schisteuse et un débit en plaques ou dalles. Ils sont parcourus de veinules de quartz.
- Des *quartzites micacés* parfois à feldspaths. Ils affleurent aux stations 41, 42 et 57. Ils forment fréquemment des barres rocheuses à relief marqué avec un débit en dalles donnant un style chaotique caractéristique de l'Atacora. Au niveau de Pagala, ils constituent en partie la barre de Kidjan et l'essentiel du Mont Balam.
- Des *schistes variés* constituant le faciès dominant rencontré le long de cette coupe. Ce sont:
 - * des *séricitoschistes chloriteux* ou *chloritoschistes sériciteux* et *quartzeux* alternant souvent avec les quartzoschistes décrits ci-dessus; ils renferment aussi des veinules de quartz; c'est au sein de ces séricitoschistes qu'ont été observées des passées décimétriques à métriques de *métamixtites* (galets de quartz et de quartzites), de *métasilexites* et de *quartzites ferrugineux* respectivement aux stations 7, 9 et 25;

* des *schistes micacés* très souvent altérés à l'affleurement et d'aspect friable; ils affleurent entre les stations 26 et 48; l'altération leur donne une teinte jaune-moutarde à brune ou rouille; ils sont parcourus de nombreuses veines de quartz; c'est dans ces schistes qu'est intercalée une passée décimétrique de *méta-phospharénites* altérées associées à des fossiles de types oncholites (station 42);

* des *schistes à albite* fréquemment altérés; ils affleurent tout comme les autres schistes en bancs métriques;

* des *micaschistes* variés renfermant soit de l'albite soit des grenats; ils sont moins altérés que les schistes micacés;

* des *schistes noirs* affleurant sous forme de passées décimétriques à métriques, voire pluridécimétriques au sein des schistes micacés et des micaschistes (stations 42, 45, 51 et 52); ils se présentent en couches noires, peu altérées de faible dureté; ils ont un débit en fines plaquettes et sont plissotés;

* des *calcschistes* métriques à décimétriques souvent intercalés dans les schistes micacés altérés, leur dureté relative les rend plus aisément repérables en affleurement; ce sont des roches de couleur claire, blanchâtre avec des lits micacés à reflets verdâtres;

* des *carbonates*; de forme lenticulaire, ils sont intercalés dans les schistes et micaschistes; il s'agit de dolomies cristallines massive de couleur grise, blanche ou gris-bleuté; leur qualité marbrière permet leur exploitation.

Remarque. C'est dans ce contexte schisteux très varié (allant des stations 42 à 54) que sont intercalés les chapeaux de fer.

- Enfin des *gneiss* et des *amphibolites*. Ce sont des roches sombres, moyennement altérées.

Ces divers faciès lithologiques peuvent être rassemblés dans deux grands domaines différents entre eux par le degré de métamorphisme: un domaine occidental épimétamorphique à dominante schisteuse (stations 1-54), et un domaine oriental très métamorphisé (stations 55-62). Le contact entre les deux domaines est tectonique.

Le domaine occidental épimétamorphique est très étendu dans l'espace (depuis la frontière Ghana-Togo jusqu'à Pagala-Village), et comprend d'Ouest en Est, des quartzoschistes, des chloritoschistes, des séricitoschistes, des schistes variés avec ou sans albite à intercalations de quartzites à feldspaths, des micaschistes avec ou sans grenat à intercalations de dolomies cristallines. Ce domaine à dominante schisteuse correspond aux séries de Kandé (stations 1-40) et de Pagala (stations 40-54) d'après Godonou et al. (1984, 1986) et Magat et Blot (1987, 1989), ou au "complexe de Kanté ou schistes de l'Atacora" de Affaton (1987). Sur un profil E - W passant par Pagala, seuls les formations du complexe de Kanté sont très bien représentées dans la portion togolaise, les quartzites de l'Atacora ne prenant une extension importante que dans la partie ghanéenne. Dans ce domaine occidental, se note une grande abondance de muscovite et de chlorite, avec disparition de la séricite de l'Ouest vers l'Est. De même l'albite devient de plus en plus fréquente dans le même sens. Enfin le grenat fait son apparition vers l'Est. Tout ceci témoigne de l'accroissement de l'intensité du métamorphisme vers l'Est.

Le domaine oriental, à l'Est de Pagala-Village, comprend des faciès très métamorphisés (amphibolites, gneiss à amphibole ou à disthène, des métadiorites, des métarhyolites, des quartzites à disthène, etc.). Il correspond au vieux socle très complexe dans son histoire comme dans sa lithologie. C'est une zone caractérisée par un fort métamorphisme à faciès amphibolite.

B - Synthèse des données structurales (fig. 9)

Les différentes mesures de schistosité S_1 , de divers axes de microplis et de plans de microfractures prises le long de la coupe ont été reportées sur des stéréogrammes (fig. 9). L'analyse de ces stéréogrammes conduit aux remarques suivantes:

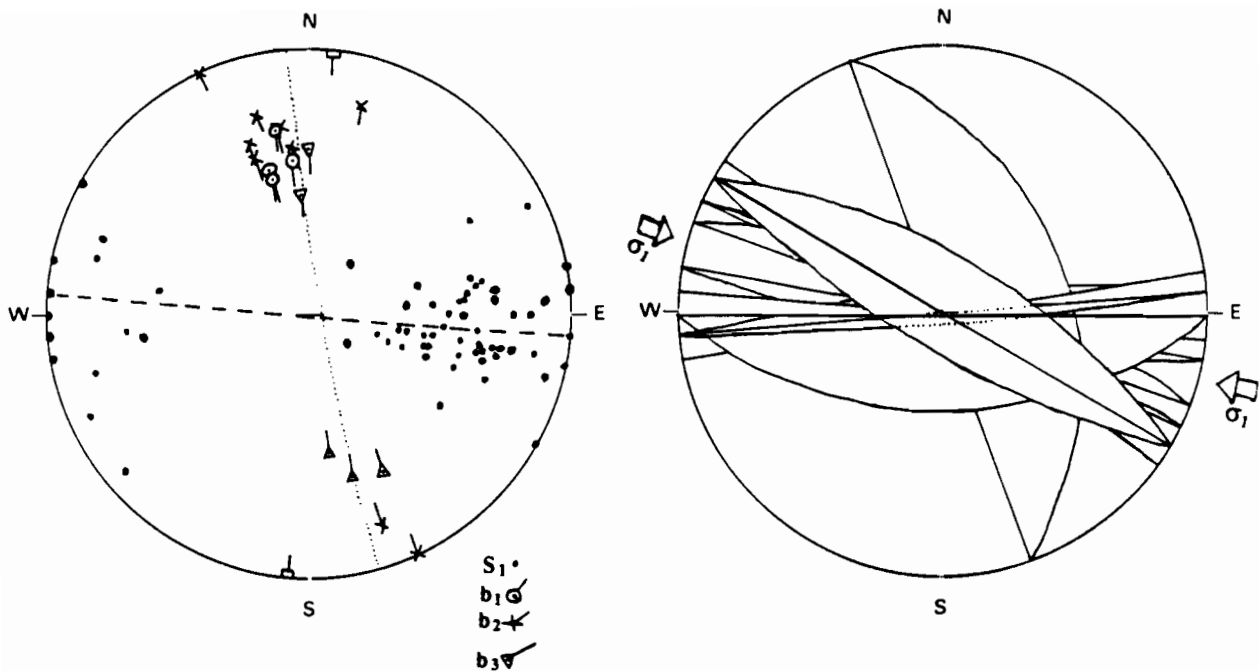


Figure 9 - Stéréogrammes des données structurales mesurées le long de la coupe.
 a) Synthèse des éléments structuraux; b) Représentation des microfractures par leurs traces cyclographiques

La plupart des plans de schistosité S_1 qui sont dans l'ensemble subméridiens (fig. 9a) ont un pendage vers l'Est variant de 20°E à 90° . Les autres plans de schistosité S_1 présentent un pendage relativement fort vers l'Ouest (50°W à 90°). L'ensemble des plans de schistosité S_1 se répartit en une zone admettant un axe $N5^\circ$ -horizontal. Cet axe ne correspondrait pas à un axe B_1 .

Les axes B_1 sont généralement subméridiens et plongent de 20° à 35° vers le Sud (l'axe B_1 moyen est $N168^\circ-30^\circ\text{S}$). Les axes B_2 sont subhorizontaux à 35°S ou 10°N . Leur direction va du $N154^\circ$ à $N14^\circ$. La plupart des axes B_2 se superposent aux axes B_1 . Les plis P_1 et P_2 sont donc coaxiaux, ce qui ne facilitera pas leur distinction sur le terrain. Les autres axes probablement B_3 plongent de 22° à 42° vers le Nord ou vers le Sud, avec des directions allant du $N154^\circ$ à $N180^\circ$. Ils semblent se répartir sur un petit cercle indiquant probablement un pli conique à 85° d'ouverture. Il s'agirait d'un pli B_3 comparable à ceux définis par Affaton (1987). L'axe du pli défini par les plans de schistosité S_1 pourrait appartenir à cette génération.

En résumé, les trois générations de plis présentent des axes pratiquement subparallèles, ce qui ne facilite pas leur distinction sur le terrain. Cependant, les axes B_1 et B_2 sont soulignés respectivement par des linéations minérales et des crénelations. A ces plis sont associées des schistosités S_1 , S_2 , et S_3 mises en évidence en lames minces.

Enfin, les pôles des microfractures observées sont pour la plupart grossièrement superposables à ceux des axes, notamment ceux des microfractures à pendage nord. Ces microfractures seraient donc des témoins des fractures transversales comparables à celles définies par Affaton (1987) dans les unités structurales de l'Atacora et du Buem. Seule la microfracture $N160^\circ-38^\circ\text{W}$ pourrait appartenir à la famille des fractures longitudinales. Nous n'avons pas accordé une attention particulière au sens de déplacement des lèvres des microfractures sur le terrain. Cependant, le stéréogramme (fig. 9b) montre que les microfractures observées sont à rapprocher de celles dues à une contrainte principale ESE-WNW à la latitude de Défalé (Affaton et al., 1991).

III - Observations de terrain et présentation de l'échantillonnage

A - Description

1 - Description du paysage des chapeaux de fer

Il s'agit de préciser le contexte d'altération générale dans lequel se localisent les chapeaux de fer. Bien que nous n'ayons pas accordé une attention particulière à cet aspect sur le terrain, nous essaierons de donner quelques indications sur la nature de l'altération régionale du secteur.

Fréquemment des cuirasses latéritiques et localement bauxitiques (à l'Est de Tinkro) se rencontrent sur le plateau de l'Adélé. Cependant aucun profil type n'y a été jamais décrit. Même les puits de prospection antérieure réalisés dans le cadre de recherche de bauxite n'ont pas atteint la roche-mère et n'ont pas été décrits. De plus, la route transversale qui épouse les contraintes hydrographiques ne fournit pas de coupes de grande amplitude pouvant servir de profils d'altération étudiables.

Dans la plaine de l'Okou, il n'y a apparemment pas de cuirasse et les sols paraissent peu épais. Les alluvions sont très limitées à la rivière Anié et quasi inexistantes dans les autres.

Dans la zone intermédiaire, les cuirassements sont extrêmement rares. Le contexte d'altération des chapeaux de fer est constitué de schistes variés diversement altérés et des altérites; une altérite étant un matériau argileux de couleur brun rouge à jaunâtre montrant par endroits des fantômes de structure, des quartz, des micas, de la kaolinite et de la gèthite dispersés. Là aussi, il n'existe pas de travaux spécifiques ayant étudié les profils d'altération.

Cependant des puits et quelques sondages réalisés en vue de préciser l'extension et l'enracinement des corps ferrugineux permettent de tirer certaines informations. La première remarque est l'absence de profil présentant un gradient d'altération. Les altérites à divers degrés d'altération sont juxtaposées sans qu'il ne soit possible de lever l'ambiguïté de variation de faciès dans la roche d'origine, ou d'évolution successive des matériaux issus de la même roche. Elles sont de couleur brun rouge à jaunâtre, friable ou meuble, parfois gravillonnaire. On y observe souvent des blocs disjoints enrobés de matériel meuble. Les taux de récupération sont très faibles ou nuls jusqu'à 10-25 m et plus, avant de rencontrer du matériel relativement cohérent constitué de schistes plus ou moins altérés intercalés de dolomies cristallines.

Par ailleurs, dans la zone intermédiaire on peut noter en dehors des altérites normales des profils d'altération sur les schistes, la possibilité, sporadique, d'existence de faciès particuliers. Ce sont des faciès d'altérations argileuses blanches, massives, compactes et cohérentes. Ces argiles blanches constituées de kaolinite et de métahalloysite ont été rencontrées pour le moment sur un seul site (CF-3) où elles semblent former une enveloppe autour des corps ferrugineux (fig. 16).

2 - Description des divers sites (observations de terrain) (tableau VI)

A la suite des travaux de prospection réalisés par les géologues du BRNM et de l'ORSTOM, 150 chapeaux de fer ont été reconnus dans l'Atacora du Togo sur une extension N-S d'au moins 270 km (Lawson, 1982; Blot, 1982, 1983a et b, 1984a, b et c, 1985; Godonou, 1984, 1985; Magat et Blot, 1984, 1987, 1989, etc.). La plupart de ces chapeaux de fer sont localisés à l'Ouest de Pagala-Village, dans une aire limitée de 80 km² environ, correspondant à la zone de raccordement disséquée comprise entre la dépression de l'Anié ou la plaine de l'Okou à l'Est et les plateaux de l'Adélé à l'Ouest.

Tableau VI

Description des différents affleurements de chapeaux de fer du Togo.

N° du site	Situation topographique.	Forme et dimensions	Affleurement	Aspect	Min. Visibles	Remarques
1	marque une colline de 470 m	allongée l: 30m; L: 300-500 m	gros blocs ferrugineux de 10 cm à 1 m	massif, scoriacé, enduit de goëthite	goëthite-hématite-quartz- micas	présence de cuirasses
2	marque une colline, position médiane	allongée	gros blocs ferrugineux de 10 cm à 2 m	cendriers très contournés,	goëthite-quartz	
3	marque une colline, position médiane		idem	idem	idem	association des faciès du cortège léger
4	position médiane (520 m)	allongée	blocs ferrugineux de 50 cm	bréchiques à éléments de grès et de schistes	idem	
5	position médiane (525 m)	allongée l: 8 m; L: 50-75 m	bancs ferrugineux observables au niveau de la coupe de la route	massif et scoriacé	idem	
11	position médiane (440 m)	allongée l: 10-15m; L: 100 m	blocs ferrugineux de 10 cm à 2m	bréchiques, massifs cendriers	goëthite et gros quartz d'exsudation	cuirasse en bas de pente
14	marque une colline de 480 m	sans forme	gros blocs ferrugineux de 50 cm à 2 m	bréchique, microcendriers	goëthite-quartz blanc - micas	
15	sommet d'une colline de 560 m	allongée l: 10-15 m; L: 400 m	gros blocs ferrugineux de 10 cm à 1 m	bréchique, scoriacé	goëthite-quartz	
16	position haute due à une ondulation de terrain	allongée l: >20 m; L: 100 m	blocs disloqués orientés N-S avec pendage E	massif, bréchique, scoriacé cendriers	goëthite-quartz- micas	
17	position haute et flanc d'une colline (520 m)	allongée l: 10-15 m; L: 400 m	blocs ferrugineux de 10 cm à 1 m	massif	idem	
21	position médiane (560 m)	sans forme	blocs ferrugineux de 10 à 50 cm	massif, schiste ferruginisé	idem	
62	position médiane (525 m)	sans forme	gros blocs ferrugineux	massif, bréchique	goëthite fibroradiée- micas	
124	position basse (500 m)	sans forme	blocs de 10 cm	massif, bréchique	goëthite- micas	
Tchoun- Tchoun	marque une colline et flanc NE	sans forme	gros blocs ferrugineux de 50cm à 2 m et plus	massif, parfois lité	goëthite fibroradiée-quartz	cuirasse en bas de pente
Tintchro	position basse	sans forme	gros blocs ferrugineux de 50 cm à 1 m	massif gréso-micacé	goëthite-quartz-micas	cuirasse dans le voisinage
A	marque le sommet de trois collines	allongé	blocs ferrugineux présentant un certain alignement et orientation de N 20-30°	massif, pseudo-bréchique	idem	
B	marque le sommet d'une colline	sans forme définie	blocs ferrugineux de taille variable	massif, poreux, pseudo-bréchique	hématite	
C	marque le flanc d'une ondulation de terrain	sans forme	blocs ferrugineux de 50 cm	lité et cendriers		
D	position basse	sans forme	quelques blocs dispersés çà et là dans le paysage	massif, poreux, pseudobréchique	goëthite-quartz-micas	
E	position élevée due à une ondulation de terrain	sans forme	blocs ferrugineux dans le paysage	cendriers, schistes ferruginisés	goëthite, hématite, quartz, micas	
F	position basse	sans forme	petits blocs dispersés çà et là	lité, bréchique	idem	
G	position haute due à ondulation		gros blocs de type cuirasse	type cuirasse		
H	marque le flanc d'une ondulation de terrain	allongée	bancs orientés N-S parfois fragmentés en blocs de plus de 2 m de diamètre	bréchique, lité	hématite, quartz, micas	

I	flanc d'une ondulation de terrain	allongée	blocs ferrugineux de 10 à 2 m	massif	idem	
J	position basse	allongée	bancs ferrugineux orientés N-S	cendriers et cloisonnements	idem	
K	position haute due à une ondulation de terrain	allongée	bancs ferrugineux orientés N 60° fragmentés en blocs de 50 cm à 1 m	cendriers contournés	gœthite-quartz d'exsudation, micas	
L	idem	idem	idem	idem	idem	
M	mi-pente d'une ondulation	sans forme	blocs de 30 cm de diamètre	bréchique à éléments de schistes	gœthite-quartz-micas hématite	
N	position basse		blocs ferrugineux de taille allant jusqu'à 2 m	bréchique	idem	
O	flanc d'une ondulation de terrain	allongée	bancs ferrugineux orientés N 10° pendage 70 à 90°	massif	gœthite-quartz	
P	position basse (bas de pente)	sans forme	blocs de taille variable	scoriacé, bréchique	gœthite-quartz	
Q	position basse	sans forme	blocs ferrugineux sans organisation	massif	idem	
R	idem	sans forme	blocs ferrugineux de taille variable	massif	idem	
S	idem	sans forme	blocs ferrugineux de quelques dm	massif	idem	
T	colline due à une ondulation	allongée de terrain	bancs ferrugineux orientés N 60°	massif souvent fragmentés en blocs	idem	
U	idem	idem	idem	bréchique, massif	gœthite-quartz-micas	
V	idem	idem	idem	cendriers	idem	
W	marque une colline	idem	idem	massif	idem	cuirasse
X	position basse	allongée N-S	gros blocs ferruginisés de taille variable	idem	hématite, quartz d'exsudation-micas	
Y	idem	allongée	blocs de plus de 1 m	idem	gœthite-quartz-micas	
Z	sommet d'une ondulation de terrain	allongée	bancs ferrugineux de plus de 100 m orientés N-S	bréchique, cloisonné	gœthite-quartz d'exsudation micas	
A1	position basse	sans forme	énormes blocs pouvant atteindre 3 m	bréchique	hématite, gœthite, quartz-micas	
B1	idem	sans forme	blocs ferrugineux de 50 cm, parfois plus	bréchique	gœthite fibroradiée, micas-quartz	
C1	flanc d'une colline	sans forme	blocs ferrugineux de quelques dm	massif	gœthite-quartz micas	
D1	position basse	sans forme	blocs de quelques dm	bréchique		
F1	idem	allongée	bancs ferrugineux orientés N-S fragmentés en blocs	type cuirasse		
G1	mi-pente	allongée	idem	massif		
H1	ressaut dans le paysage	allongée	bancs discontinus orientés N-S	idem		
J1	position haute due à ondulation	idem	bancs orientés N-S en blocs de taille variable	idem	gœthite	
J1-1	position médiane	sans forme	blocs ferrugineux sans organisation	bréchique		
K1	position basse	allongée	bancs orientés N-S	schistes ferruginisés		
L1	position basse	sans forme	blocs ferrugineux décimétriques	massif, cendriers	gœthite fibroradiée	
Cascade	idem	sans forme	très énormes blocs de 4 m, même plus	bréchique, massif, cendriers	gœthite-quartz-micas	
Dikpéléou			petits blocs	massif	gœthite, hématite, quartz	
Tchatchami*	position médiane	allongée sur 2 km	banc orienté N-S	massif, cloisonné	hématite, gœthite, quartz	
AB 657*	idem	sans forme	blocs ferrugineux de taille variable	bréchique, massif	gœthite-quartz-micas	

Légende : * Région de Bassar; Tchatchami* = Tchatchaminadé. Les autres sites sont localisés dans le secteur de Pagala.

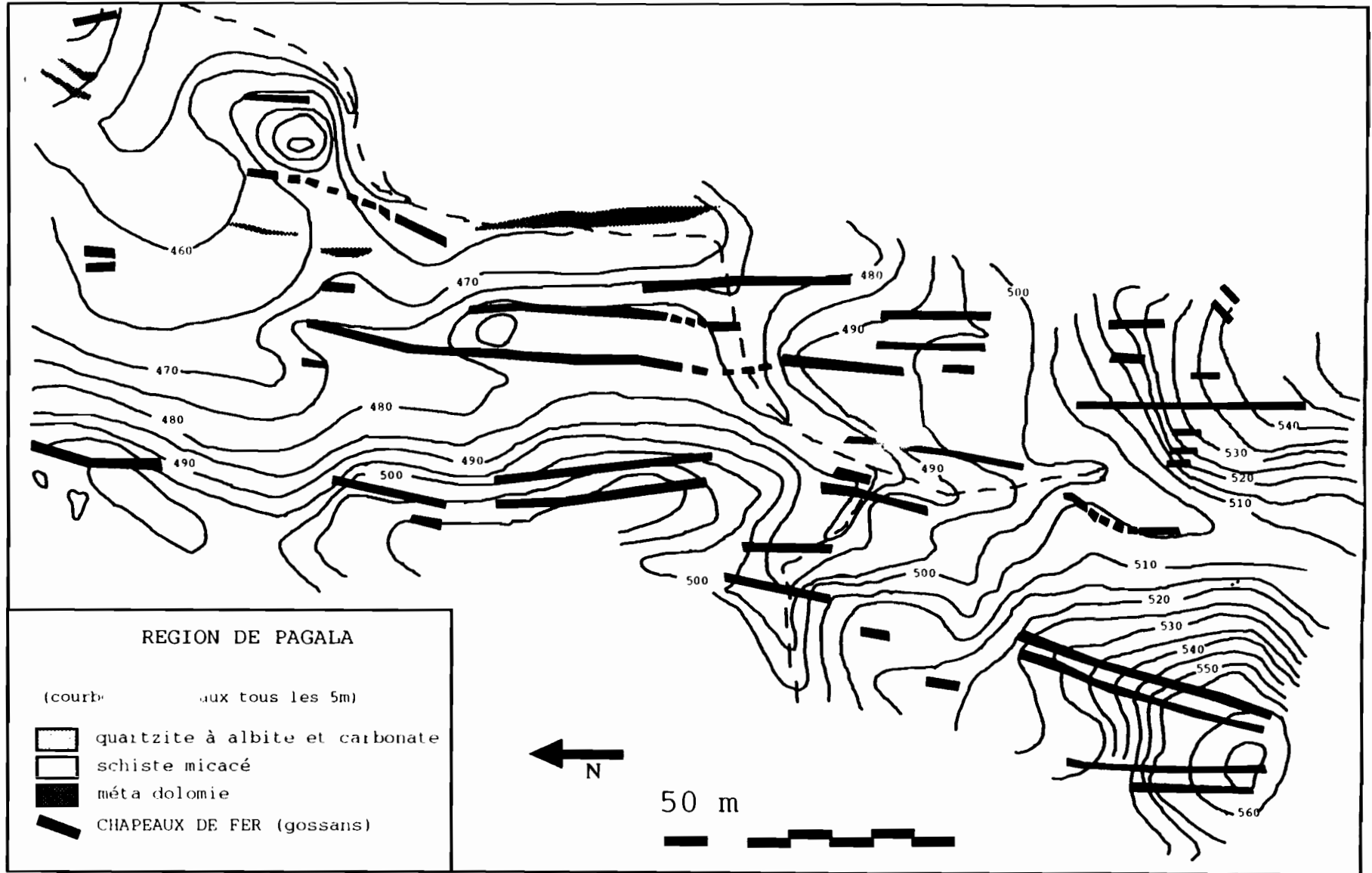


Figure 10.-Cartographie schématique du secteur Opoblé d'après Magat et Blot (1987)

Quelques aspects, situations topographiques, formes, faciès, etc..., que présentent les différents sites ou chapeaux échantillonnés sont donnés dans le tableau VI. Les remarques suivantes peuvent être faites.

a - La forme des chapeaux de fer

Les formations ferrugineuses se présentent à l'affleurement sous des formes variables dont les dimensions ne peuvent pas être précises sans travaux de terrassement en raison de l'importance de la végétation. Néanmoins, des observations faites en surface sur plusieurs sites notamment dans la zone cartographiée d'Oprobé (fig. 10) montrent que ces ensembles ferrugineux sont le plus souvent sous forme de "bancs". Cette notion de "bancs" a été déjà évoquée par les prédécesseurs dont Godonou et al (1983,1984, etc..), Magat et Blot (1984, 1987, 1989).

Leurs dimensions sont de quelques décimètres à des hectomètres de long pour quelques décimètres de puissance (CF-1: 300-500 m de long sur 30 m de puissance). Leur direction variant entre N15° à N170° est concordante avec la schistosité générale des schistes variés, des quartzites et des carbonates qui les encaissent. Les bancs ferrugineux sont souvent disloqués en blocs de taille variable allant du décimètre à quelques mètres, donnant ainsi à l'affleurement un aspect chaotique. Ces corps ferrugineux présentent des enracinements visibles au niveau des coupes de la route ou dans les tranchées. Cet agencement en surface et en profondeur leur donne une allure de "champignon". Ces caractères confèrent aux chapeaux de fer allongés un aspect stratiforme, sans pour autant qu'une relation stratiforme avec l'encaissant n'ait jamais été vérifiée.

b - Les faciès

Les faciès sont très variés sur le même site et d'un site à l'autre: ce sont des faciès en "cendriers" ou en "pelure d'oignon", massifs, scoriacés, schisteux cloisonnés, schistes ferruginisés, gréseux, brèchiques ferruginisés à éléments de schistes ou de quartzites, etc... En coupe fraîche, les couleurs sont franches: brun, ocre, rouge, violet, orange, gris, noir, blanc, avec tous les intermédiaires possibles. L'abondance des oxy-hydroxydes de fer bien cristallisés (gœthite mamelonnée bien développée) donne fréquemment un éclat métallique ou semi-métallique. On verra dans les prochains chapitres qu'on peut les ramener à un nombre de cas plus limité que les observations de terrain ne le laissent prévoir.

c - La topo-indépendance

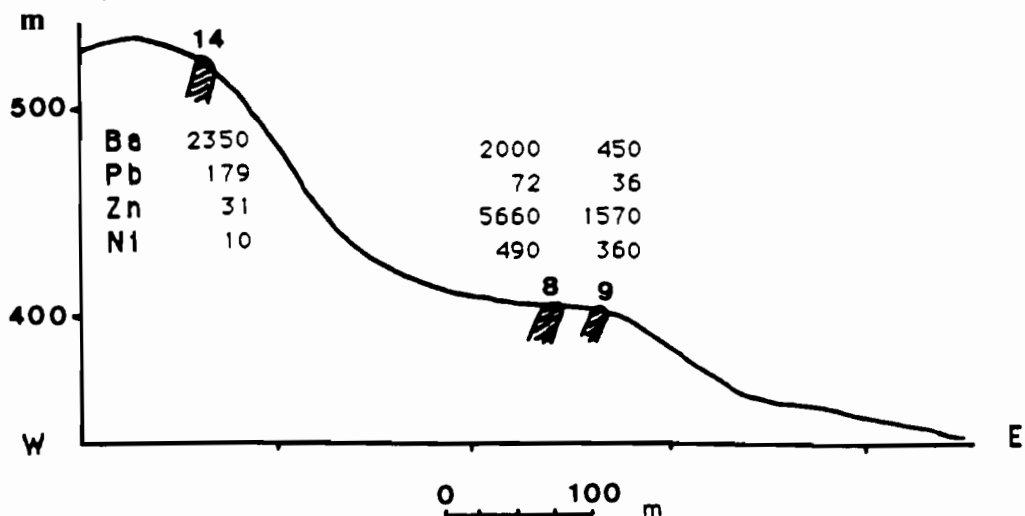


Figure 11 - Position des affleurements de chapeaux de fer d'après le relevé du layon 6 de la prospection de Magat et Blot (1987, 1990); n° d'échantillon et teneurs en Ba, Pb, Zn, Ni

La répartition des chapeaux de fer dans le paysage ne semble pas obéir à la topographie. En effet, leur position est fort variable du haut des collines au lit actuel des rivières pérennes ou temporaires. Dans tous les cas, la compétence et la résistance à l'érosion induisent une ride ou un ressaut constituant l'affleurement comme le montre la figure 11 qui représente l'itinéraire suivant un des layons transversaux de la zone cartographiée d'Opblé. Dans les cours d'eau, leur présence se traduit par une cascade au même titre que les quartzites et les dolomies cristallines.

En résumé, les chapeaux de fer se présentent sous forme de corps ferrugineux allongés en bancs et d'orientation conforme à la schistosité générale des roches encaissantes (schistes et carbonates). Rien ne permet de montrer l'existence ou non d'une éventuelle relation entre ces corps ferrugineux et l'encaissant. Par ailleurs, ils présentent des faciès très variés (faciès en cendriers ou en pelures d'oignon, massifs, scoriacés, géodiques, schistes ferruginisés, brèchiques) tant sur le même affleurement et d'un affleurement à l'autre. Enfin, tout en guidant l'évolution du relief, ces ferruginisations secondaires ne marquent pas forcément les points les plus hauts de la topographie. Blot et Magat (1990) voient à travers tout ceci, une inversion du relief et l'antériorité de l'expression des ferruginisations secondaires au paysage actuel dirigée par une érosion régressive.

B - Echantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé sur divers matériaux. D'une part, il a porté sur les matériaux de ferruginisations de divers sites, d'autre part, il a concerné la plus grande variété possible de faciès de roches du contexte régional.

1 - Mode d'échantillonnage

Les échantillons étudiés dans le cadre de ce travail proviennent des collections de mes prédécesseurs Messieurs GODONOU, BLOT, MAGAT, BESNUS et PION, d'une part, et de mes deux missions sur le terrain d'autre part. Les échantillons ont été pour la plupart prélevés à l'affleurement. Cet échantillonnage de surface a été complété par des prélèvements effectués dans 48 puits, 10 tranchées et 4 sondages. La répartition des travaux de sub-surface est indiquée dans le tableau VII. Les puits ont une profondeur allant de 0,5 à 15 m. Quant aux forages, leur profondeur va de 35 m à 85 m pour le plus profond. Les puits ont été creusés par les géologues de l'ORSTOM et du BNRM. Les forages carottés ont été effectués par le BNRM.

Tableau VII - Inventaire des travaux de sub-surface et de sondage

Nature	CF 2	CF 3	CASC	CF 5	CF15	CF17	CF 21	CF 81	Total
Puits	9	28	1	-	6	4	-	-	48
Tranchées	-	7	-	-	-	-	1	2	10
Forages	-	3	-	1	-	-	-	-	4

Légende : CF = Chapeau de fer; CASC = Cascade

2 - Nature et nombre d'échantillons étudiés

Ce sont des échantillons de natures diverses qui ont été analysés par les méthodes décrites plus loin. Il s'agit d'une part de roches du contexte régional, et d'autre part des matériaux composant les chapeaux de fer et principalement de faciès ferrugineux oxyhydroxydés. Le tableau VIII donne un détail de la répartition des échantillons entre les divers types de matériaux et le nombre d'échantillons étudiés.

	Ech. de surface, de puits, de tranchées et de sondages carottés				Total
	F. ferruginisé	Sidérite	Argiles blanches	Roches	
CH/RX	318	10	14	96	438
Lam. min.	55	8	-	71	134

Légende : CH. = analyses chimiques macroscopiques; RX = détermination minéralogique par diffraction RX.

En tout 438 échantillons dont 318 faciès ferrugineux ont été étudiés en chimie et par diffractométrie des rayons X et 134 lames minces ont été confectionnées et étudiées. Le tableau IX donne un détail du nombre d'échantillons pour chacun des faciès ferrugineux analysés en chimie et par diffraction des rayons X.

Tableau IX - Répartition des 318 échantillons analysés en chimie et par diffraction RX entre les différents faciès ferrugineux.

Nature	Abbréviation	Nombre	Nature	Abbréviation	Nombre
Schistes ferruginisés	SF	35	Schist. fer. cloison.	SFC	5
Brèches ferruginisées	BF	56	Faciès scoriacés	FSC	39
Faciès cendriers	FCE	28	Faciès massif	FMS	155

Tableau X Localisation des échantillonnages pour les études pétrographiques et chimiques: sites des chapeaux de fer (CF) près de Pagala et de Bassar*, sites d'échantillonnage des roches^x.

Site	Pétrographie	Chimie	Site	Pétrographie	Chimie
CF 1	5	4	CF 2	4	12
CF 3	9	81	CF 4		6
CF 5	5	6	CF 8	2	3
CF 11		4	CF 14	5	2
CF 15		9	CF 16	1	2
CF 17		4	CF 21	9	15
CF 62		3	CF K'		2
CF 124		4	Zone d'Opoblé	10	100
Cascade	16	24	Tchoun-Tchoun	1	4
Dikpéléou		3	Tintchro		7
CF A	1	2	CF B	1	2
CF C	1	2	CF D		1
CF E		3	CF F		4
CF L'		3	CF H		2
CF I		3	CF J		4
CF K		3	CF L		2
CF M		2	CF N	3	5
CF O	2	4	CF P		3
CF Q		2	CF R		2
CF S		4	CF T		4
CF U		3	CF V	1	4
CF W	1	3	CF X	1	4
CF Y	1	4	CF Z		5
CF A'		5	CF B'		2
CF C'		1	CF D'		3
CF G'		4	CF J'		2
CF. Tchatchaminadè*	5	17	CF AB-657*	1	4
Coupe de la route ^x	41	5	Rivière Anamanié ^x		2
John-Kopé ^x	1	2	Coupe C2 ^x	1	1
Coupe C5 ^x	3	2	Coupe C7 ^x		2
Pagala ^x		2	Lalamila ^x	3	2

Les échantillons de ferruginisations proviennent en tout de 54 différents sites dont 52 sont localisés dans la région de Pagala. La figure 12 montre la localisation de la plupart des

sites du secteur de Pagala. Il en manque 8 sur la carte qui sont d'une part des sites éloignés (Tchoun-Tchoun, Dikpéléou, Tinkro) et d'autre part des sites dont la localisation exacte n'a pas pu être assurée. Le tableau X donne la liste des différents sites échantillonnés et le nombre d'échantillons analysés pour chacun d'eux.

On peut noter une répartition inégale de l'échantillonnage. En effet certains sites ont été beaucoup plus travaillés que d'autres. C'est le cas par exemple de CF 3 et des sites de la zone cartographiée par Magat (1987). Ceci est dû aux nombreux travaux réalisés sur ce site par les géologues de l'ORSTOM et du BNRM.

Chapitre IV

METHODES ANALYTIQUES

Les principales méthodes utilisées au cours de la réalisation de ce travail sont basées sur deux approches distinctes: une approche pétrographique, minéralogique et morphogénétique d'une part; une approche géochimique globale et microsituee d'autre part.

L'analyse chimique multiélémentaire macroscopique a été effectuée au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface (C.S.G.S.) de Strasbourg. La diffraction des rayons X a été faite en partie au C.S.G.S. de Strasbourg et complétée à l'ORSTOM à Bondy. Il en est de même pour les travaux à la microsonde électronique effectués au Service Inter-Universitaire à Nancy, et complétée à l'ORSTOM à Bondy. Enfin la microscopie électronique à balayage a été faite en grande partie à l'ORSTOM ainsi que les analyses par spectroscopie infra-rouge. Les analyses thermiques ont été effectuées à l'INRA à Versailles. Dans ce qui suit, seront exposées les différentes techniques ci-dessus énumérées et leurs apports.

I - Les méthodes d'analyses pétrographiques, minéralogiques et morphologiques

Cette approche a été pratiquée au moyen d'appareils optiques, électroniques et de diffractométrie des rayons X

A - La loupe binoculaire

C'est un outil de base d'une très grande importance. Elle permet une observation de l'échantillon en vue de rechercher des structures macroscopiques particulières, par exemple des minéraux secondaires géodiques, des cavité automorphes, etc... L'observation globale de l'échantillon guide parfois dans la démarche à suivre pour l'étude de l'échantillon, c'est-à-dire qu'elle permet de choisir la portion de l'échantillon à prélever pour les analyses, chimie, RX, et lames minces polies si besoin est. Elle a permis d'étudier la structure d'ensemble des lames minces en pétrographie (photo Pl.).

B - Le microscope optique pétrographique et métallographique

Du fait de la nature opaque ou très peu transparente de la plupart des matériaux des chapeaux de fer, le microscope métallographique est un outil indispensable pour l'étude de ce genre de matériaux. Avec son double système permettant d'observer les sections polies en lumière transmise ou en lumière réfléchie, il permet aussi bien de travailler sur les minéraux opaques que sur les minéraux transparents.

Dans ce travail, l'examen des minéraux en lumière réfléchie ont porté principalement sur la gœthite et l'hématite et accessoirement sur quelques sulfures (pyrite surtout). Gœthite

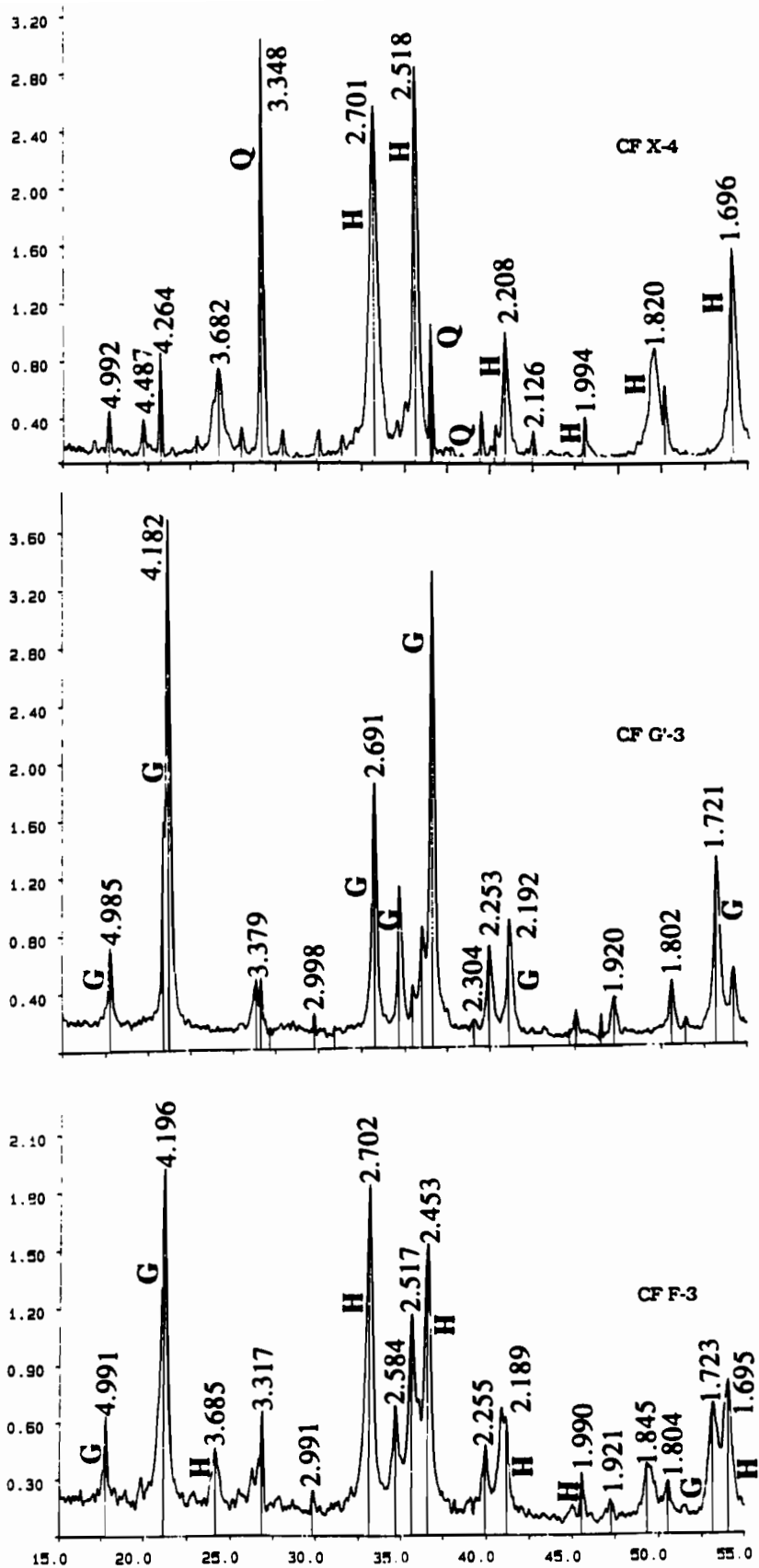


Figure 13 - Diffractogrammes RX obtenus sur trois échantillons de chapeau de fer riches en goéthite et en hématite. G: goéthite; H: hématite; Q: quartz.

et hématite se distinguent par leurs caractères optiques. En lumière transmise, la goëthite est en général beaucoup moins opaque que l'hématite avec des colorations brunes, alors que l'hématite, si elle n'est pas tout à fait opaque, présente des colorations rouge cerise caractéristiques. En lumière réfléchie, la goëthite a un pouvoir réflecteur plus faible que celui de l'hématite. L'hématite se présente sous deux formes très distinctes: une forme massive macrocristalline parfaitement éteinte sans coloration en lumière réfléchie polarisée (LRP); une forme en amas microcristallins montrant en LRP des colorations rouges intenses.

Par ailleurs le microscope optique a permis de caractériser d'une part les phases minéralogiques (phases primaire résiduelle et secondaire ferruginisée), et d'autre part de définir les figures de remplacement (structures et textures) avec possibilité de mesurer à l'aide d'un oculaire microgradué la taille des objets observés (photo Pl.). De même, il a été utilisé dans l'étude pétrographique des roches encaissantes.

C - La diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique de base pour la détermination des espèces minérales, quelle que soit leur taille, entrant dans la composition d'un échantillon. La seule contrainte est le degré de cristallinité de l'espèce à déterminer. Ainsi un minéral est d'autant plus difficile à déterminer qu'il est plus mal cristallisé.

Au C.S.G.S. de Strasbourg, la diffraction des rayons X se fait soit sur roche totale, soit sur fraction fine ou argileuse (< 2 microns) après extraction. Toutes les informations relatives aux modes opératoires sont réunies dans Larqué et al. 1978. Les déterminations par diffraction des rayons X sont avant tout qualitatives.

Pour ce travail, la détermination minéralogique a été réalisée pour la plus grande partie à Strasbourg comme à l'ORSTOM, sur roche totale. Ce mode d'analyse a été choisi du fait de l'abondance insignifiante des argiles dans les faciès ferruginisés. Même si elles existent, leur extraction nécessiterait des kilogrammes de matériaux. Cependant des fractionnements ont été réalisés sur quelques échantillons de roches et de termitières dans le but de lever le doute sur l'existence d'interstratifiés de type smectite supposés sur certains diagrammes de rayons X; les résultats n'en seront pas présentés ici car n'ont pas d'intérêt pour le sujet traité.

Par ailleurs une estimation semi-quantitative des abondances relatives de goëthite et d'hématite a été faite par une méthode adaptée par Besnus (1975-1977), confrontant les pics de diffraction caractéristiques et la composition chimique. Elle consiste à mesurer les rapports des hauteurs des pics à 4.18 Å de la goëthite et 2.70 Å - 2.51 Å communs à la goëthite et à l'hématite (fig. 13). En étalonnant avec des échantillons du même lot à forte dominance de l'un puis de l'autre de ces minéraux, on arrive à une estimation satisfaisante.

D - L'analyse thermique (ATD et ATP)

L'analyse thermique est une technique utilisée le plus souvent pour la détermination quantitative d'un grand nombre de minéraux, en particulier de ceux qui possèdent des hydroxydes (Mackenzie 1970, Robert 1977). Son principe de base est soit une perte de poids accompagnée d'un effet endothermique, soit un gain de poids suivi d'un effet exothermique au cours du chauffage, soit un changement de phase cristalline sans changement de poids accompagné d'un effet exothermique. La perte de poids est surtout due au départ des hydroxydes (OH) des hydroxydes et des silicates et au CO₂ des carbonates.

En ATD, les phénomènes endothermiques, caractérisant des départs d'éléments volatiles mis en évidence par l'ATP, sont spécifiques des relations entre ceux-ci et un cation

métallique ou un édifice plus complexe (Robert, 1977). Les phénomènes exothermiques traduisent un phénomène de destruction, d'oxydation ou de recristallisation. De manière concomitante, l'ATP autorise à quantifier les pertes d'OH spécifiques: H₂O moléculaire en dessous de 100 °C, OH des hydroxydes métalliques entre 250 et 350 °C, OH des silicates argileux entre 500 et 550 °C, et enfin le CO₂ des carbonates vers 470 °C. La supériorité de cette méthode sur la diffraction des rayons X provient du fait que les phénomènes thermiques sont non seulement fonction de la structure, mais aussi de la composition cristallographique des minéraux, ce qui est particulièrement intéressant pour les silicates.

Pour ce travail, nous avons pratiqué l'analyse thermodifférentielle (ATD) couplée à l'analyse thermopondérale (ATP) sur un petit nombre d'échantillons en vue de mieux quantifier d'une part les faciès d'altérations argileuses blanches, et d'autre part la goéthite et l'hématite.

Une quantification des oxy-hydroxydes de fer a été faite avec les données de l'ATP couplées aux analyses chimiques sur 18 échantillons : l'abondance de la goéthite est mesurée par ATP ; celle de l'hématite par différence, connaissant la teneur totale en Fe (tableau XI). Les résultats de cette quantification ont été comparés aux estimations faites par RX portées sur le même tableau. Les estimations aux RX étant semi-quantitatives, il n'est pas surprenant de trouver quelques écarts importants entre les deux méthodes. La corrélation de l'estimation RX avec les résultats de l'ATP est cependant bonne, avec un coefficient de corrélation de 0.86 entre les deux séries de données sur la goéthite. La méthode par RX se trouve ainsi validée comme méthode semi-quantitative et le manque de dosage systématique par ATP a conduit à l'utilisation des rayons X pour estimer les abondances de goéthite et d'hématite dans les faciès ferrugineux oxydés où ces minéraux sont dominants.

Tableau XI - Résultats d'estimation quantitative par ATP et comparaison avec ceux obtenus par RX sur 18 échantillons.

N° Ech.	Fe ₂ O ₃	Perte - feu	Estimation par ATP			Estimation par RX	
			Goéthite	Hématite	Sidérite	Goéthite	Hématite
CF X-4	58,41	2,5	0	58,4	0	0	58,4
B-1	85,34	7,6	25,0	63,3	0	2,1	83,4
Q-2	79,28	9,0	47,5	37,5	0	9,7	70,6
M-4	79,14	7,4	42,5	41,7	0	14,8	65,8
F4-970	78,69	8,2	38,3	45,0	0	15,3	64,9
A1-5	65,4	5,8	24,2	44,1	0	28,5	39,7
F28-NN	59,08	17,3	24,2	20,7	24,1	46,1	17,6
F4-1190	66,71	13,0	73,3	2,2	0	48,7	4,5
CF F-1	53,02	8,6	53,0	6,4	0	52,6	5,7
CF F-3	68,03	10,2	55,0	19,6	0	54,0	19,4
AB-42	66,54	10,0	70,8	4,2	0	68,8	4,0
F 4-7	66,42	9,7	65,0	9,2	0	70,6	2,9
F4-20201	72,3	10,4	63,3	16,6	0	71,3	2,1
F4-1830 35	79,11	11,8	71,7	16,0	0	78,9	8,1
Di-3	82,24	11,4	82,5	9,6	0	79,0	11,1
F4-1020	73,64	13,3	83,0	0,4	0	81,8	0
CF 62-3	76,08	13,6	83,0	3,1	0	84,5	0
CF 16-10	70,29	10,9	70,0	8,7	0	85,7	0

E - L'analyse infra-rouge (IR)

Le dosage par spectrométrie infra-rouge est fondé sur la sensibilité de ce domaine spectral aux liaisons moléculaires. Il se pratique sur des préparations dans lesquelles l'échantillon est assez dilué pour que l'ensemble soit transparent aux rayons IR. La

préparation est une pastille contenant 0,5 % du matériau à analyser dilué dans du bromure de potassium.

L'avantage de la spectrométrie IR sur la diffraction RX est que le signal reçu ne dépend pas de la cristallinité du matériau. C'est ainsi, par exemple, que l'eau de constitution de la gauthite peut être mise en évidence, quelle que soit le degré d'organisation de celle-ci.

F - Le microscope électronique à balayage (MEB)

Il permet d'observer des objets de taille inférieure à la résolution d'un microscope optique, d'étudier la morphologie d'échantillons massifs et de faire des analyses élémentaires qualitatives ponctuelles sur ceux-ci. En outre le MEB appliqué à des surfaces polies, joue le rôle comparable à celui de la microsonde électronique dont nous parlerons plus loin à condition qu'il soit couplé à cette dernière. En effet, le MEB permet d'une part de pratiquer des analyses multi-élémentaires semi-quantitatives ponctuelles; il peut d'autre part donner l'image de la répartition d'un élément chimique, ou "image X", sur une plaque de la surface polie.

Pour ce travail, le MEB a été principalement utilisé pour compléter l'étude minéralogique sur des lames pétrographiques, surtout pour la détermination des minéraux accessoires, pour étudier la morphologie des divers faciès ferruginisés et enfin pour étudier la distribution des éléments en anomalie, et en particulier du Zn, à l'échelle microscopique.

II - Les méthodes d'approches géochimiques

A - La macro-analyse

Elle permet d'établir la composition chimique globale de l'échantillon. Les techniques d'analyses utilisées ont été mises au point au laboratoire d'Analyses Spectrochimiques du C.S.G.S de Strasbourg (Samuel et Rouault 1983; Samuel et al. 1985). Par convention, on appellera éléments majeurs ceux dont les teneurs sont supérieures à 1 %, éléments mineurs ceux dont les teneurs sont comprises entre 0.1 et 1 %, et éléments traces ceux dont les teneurs inférieures à 0.1 % soit 1000 ppm.

1 - Préparation

La technique d'analyse peut se résumer en ces termes. Les échantillons sont broyés dans un broyeur à galet d'acier au carbone qui ne contamine en rien d'autre qu'en fer. 100 mg de poudre sont fondus avec du tétraborate de lithium et la perle obtenue est dissoute dans 20 ml de solution (HCl + glycérine). Les échantillons ainsi préparés sont systématiquement analysés en 27 éléments majeurs-mineurs et traces (tableaux XII et XIII).

2 - Dosage

Les majeurs et mineurs à l'exception de Na, K et P, sont dosés au spectromètre à arc à lecture directe appelé "quantomètre"; Na et K sont dosés au spectromètre de flamme. Les éléments traces (tableau 8) et P sont dosés au spectromètre à plasma ICP (Inductively Coupled Plasma). C et S ne sont analysés que pour certains échantillons; leur dosage se fait au spectromètre d'absorption infra-rouge. Pb n'a pas été dosé de façon systématique; en effet, les méthodes par fusion utilisées favorisant sa volatilisation, les dosages sont très incertains. Ces dosages pratiqués sur un échantillon, à l'exception de celui de C et S, se font sur la même préparation.

3 - Limites de dosage données par les tableaux XII et XIII

Tableau XII - Eléments majeurs et mineurs dosés avec des gammes de teneurs et méthodes correspondantes

Eléments	Gammes de dosage en %	Méthode
SiO ₂	de 0.10 - 100	arc
Al ₂ O ₃	0.20 - 100	"
MgO	0.02 - 100	"
CaO	0.20 - 100	"
Fe ₂ O ₃	0.10 - 100	"
Mn ₃ O ₄	0.01 - 100	"
TiO ₂	0.02 - 30*	"
Na ₂ O	0.01 - 100	spectromètre de flamme
K ₂ O	0.01 - 100	"
P ₂ O ₅	0.1 - 40*	plasma
C	0.02 - 12	spectrométrie d'absorption infra-rouge
S	0.02 - 12	"

Légende: - les cations sont présentés en oxydes, C et S en éléments;
- * teneurs maximales pouvant être portées à 100 %.

Tableau XIII - Eléments traces dosés par spectrométrie d'émission à plasma.

Eléments	Gamme de dosage en ppm	Eléments	Gamme de dosage en ppm
Sr	0.5 - 5000	Zr	2 - 5000
Ba	0.5 - 5000	La	5 - 5000
V	1 - 5000	Ce	20 - 5000
Ni	5 - 5000	Eu	2 - 5000
Co	2 - 5000	Yb	0.2 - 5000
Cr	2 - 5000	Lu	0.1 - 5000
Zn	2 - 5000	Nb	10 - 5000
Cu	1 - 5000	Sc	0.2 - 5000
Y	0.5 - 5000		

Les résultats sont exprimés en pourcentages pondéraux d'oxydes sur roche totale séchée à 110 °C pour les majeurs et mineurs, sauf pour C et S présentés en pourcentages d'éléments, avec une erreur maximale de ± 2 %. Quant aux éléments traces, les résultats sont exprimés en grammes de métal par tonne (ppm ou parties par million) sur la roche séchée à 110 °C avec une erreur relative de ± 20 %.

A ces dosages s'ajoutent les mesures des pertes au feu à 110 °C, donnée en pourcentage pondéral de la roche brute, et à 1000 °C, donnée en pourcentage pondéral de la roche séchée à 110 °C. La perte à 110 °C correspond presque uniquement à l'eau moléculaire du matériau et n'est donc pas une donnée significative. La perte à 1000 °C comprend, dans les matériaux présentés dans ce travail, l'eau de constitution des phyllites et des hydroxydes métalliques, le CO₂ des carbonates, la matière organique et le soufre des sulfures.

B - La microanalyse élémentaire

1 - Principe et limite de détection

Elle a été effectuée au moyen d'une microsonde électronique automatisée (CaMEBAX Université de Nancy). C'est une technique d'analyse qui utilise un rayonnement primaire excité par un faisceau incident très fin d'électrons. Elle est munie d'un double système permettant de travailler en sonde fixe ou en sonde mobile. Sa limite de sensibilité varie suivant l'élément, le plus souvent environ 0.1 %.

2 - Applications

Elle a permis dans l'élaboration de ce travail de faire des analyses élémentaires quantitatives ponctuelles (sonde fixe). Ceci a permis de déterminer avec précision la nature des diverses phases minéralogiques et leurs anomalies, notamment en Zn. Par ailleurs, elle a permis de déterminer la répartition de quelques éléments dans des plages des sections polies étudiées (sonde mobile) et en particulier sur des sidérites. Ce second aspect a été plus approfondi à la microsonde LINK (ORSTOM, Bondy).

Des mesures ont par ailleurs été effectuées sur une CAMECA SX 50 (Université de Nancy) et notamment des analyses sériées en profils à travers des grains de carbonate dans les sidérites.

Les analyses ponctuelles ont été faites sur des lames minces polies. Les résultats obtenus ont été exprimés en pourcentages pondéraux d'oxydes, en valeurs directes à la CAMEBAX et à la SX 50 et avec bouclage à 100 % pour les silicates.

Ces méthodes ne permettent pas d'analyser les éléments les plus légers depuis l'hydrogène (H) au néon (Ne). Ainsi C et O ne sont jamais atteints directement. Ceci pose des problèmes d'interprétation pour établir la composition chimique des carbonates.

III - Les traitements statistiques.

Un travail qui porte sur 438 échantillons avec analyse de 28 composants chimiques ne peut se mener sans traitement statistique. Ainsi pour une bonne description géochimique de l'ensemble des échantillons, les méthodes statistiques usuelles ont été utilisées:

- Traitements univariés: il s'agit de calcul des niveaux moyens de teneurs, moyennes et médianes, des écarts-types, des coefficients de variation et du tracé des diagrammes de distribution (histogrammes).

- Traitements à plusieurs variables: ce sont les corrélations (coefficients de corrélation et diagrammes de corrélation inter-éléments) et l'analyse factorielle. Cette dernière a été pratiquée pour déterminer comment les éléments sont liés entre eux et mettre ainsi en évidence les différentes "phases géochimiques". C'est l'analyse en composantes principales (ACP) qui a été pratiquée.

Les calculs et les diagrammes ont été effectués à l'ordinateur au Centre de Calcul du CNRS de Strasbourg par le logiciel SAS qui permet tous les traitements de tableaux préalables à l'analyse et les ACP par ADDAD (Lebart et al. 1982, Fénélon 1981, Lebeau 1984). Les calculs sont effectués soit sur les données brutes, ce qui tend à privilégier les valeurs extrêmes, soit en mettant les valeurs extrêmes à la moyenne. On obtient ainsi des paramètres statistiques un peu moins influencés par les teneurs anormales que lors du calcul global.

DEUXIEME PARTIE

LES DIVERS OBJETS

Chapitre V

LES ROCHES PRIMAIRES

Les faciès observés tout au long de la coupe de la route allant de Pagala-Gare à Dikpéléou (chapitre 3) seront maintenant décrits, ainsi que ceux qui apparaissent typiquement dans le voisinage de Pagala-Village (près des ferruginisations) et à proximité de Lalamila.

D'après leur extension spatiale et leur composition minéralogique, ces échantillons sont répartis en deux groupes correspondant à deux grands ensembles lithologiques. - Le premier ensemble comprend des roches d'extension régionale essentiellement silicatées. Ce sont les schistes-micaschistes, les quartzoschistes-quartzites et les amphibolites. Nous les appelons "roches silicatées d'extension régionale". - Le second ensemble rassemble des faciès d'extension locale ou très réduite et dont les principaux minéraux ne sont pas silicatés. Il s'agit des dolomies cristallines, des calcschistes, des phospharénites intercalés au sein du premier ensemble, et de l'hématite massive de Lalamila qui n'affleure pas au niveau de la coupe. Nous convenons de les appeler "roches à dominante non silicatée".

I - Les roches primaires d'extension régionale

A - Description pétrographique et minéralogique

1 - Pétrographie (étude en microscopie optique)

a - Les schistes et micaschistes

Nous distinguerons les séricitoschistes, les chloritoschistes, les schistes noirs, les schistes micacés avec ou sans albite et les micaschistes.

- Les schistes noirs

Ce sont des roches de couleur gris sombre ou noire, très plissotées avec des microplis ou crénelations. Ces schistes noirs présentent une structure finement foliée et une texture lépidoblastique.

Au microscope, le fond de la lame apparaît constitué de séricite avec du graphite associé. De la muscovite se présente en grandes plages le plus souvent sécantes à la schistosité. Des minéraux titanés qui sont de l'ilménite et du rutile présentent une forme allongée, et sont orientés parallèlement à la schistosité. Ces minéraux titanés sont par ailleurs soit envahis, soit entourés d'hydroxydes de fer cryptocristallins. Les minéraux opaques sont localisés le plus souvent au niveau des charnières des microplis. Il s'agit de pyrite oxydée.

Par ailleurs, dans des lames de schistes noirs provenant de sondages, Godonou (1984) note outre les muscovites-séricites (20-50 %), le quartz (10-50 %), le graphite ((jusqu'à 70 %), la chlorite (15-20), la dolomite (3-15 %), la tourmaline, le zircon, l'ilménite et une

paragenèse sulfurée qualifiée d'anté-métamorphique à pyrite-pyrrhotine-chalcopyrite-blende-galène-pentlandite, etc.

- Les *séricitoschistes*

Ceux qui ont été étudiés sont en voie d'altération soulignée par une couleur rouge latérite ou rouille à l'affleurement. Ils sont composés de séricite minéral le plus abondant (plus de 80 %), de quartz (10 %) disposé en lits ou en amygdales, et accessoirement de minéraux opaques (produits titanés, pyrite ou magnétite oxydée), et de tourmaline.

Localement des dépôts d'hydroxydes de fer (gœthite microcristalline) ont été notés dans certains lits de séricite. De la gœthite microcristalline a été également observée en bordure de fissures ouvertes témoignant de circulations dans ces fractures.

- Les *chloritoschistes*

Ce sont des roches grises ou verdâtres à aspect feuilleté, folié, présentant une alternance de lits clairs et de lits gris verdâtres. Ils ont une texture lépidogranoblastique et sont constitués pour l'essentiel de minéraux phylliteux: chlorite bien cristallisée associée à la muscovite-séricite, parfois à la biotite en voie d'altération et de quartz fortement indenté et hétérogranulaire (40 - 200 μm). A ces minéraux cardinaux, s'ajoutent: - des albites hétérométriques (50 - 300 μm), cassées ou boudinées et voie de séricitisation; - des minéraux opaques qui sont des pyrites hématitisées ou goethitisées et des oxy-hydroxydes de fer cryptocristallins souvent localisés en bordure des biotites et des chlorites.

Dans une lame (éch. 16), ont été observées, outre les minéraux cardinaux ci-dessus cités, de la pyrite fraîche en gros cristaux (1 mm environ), de l'ilménite en baguettes allongées disposées parallèlement à la schistosité et des plagioclases synmétamorphiques caractérisés par l'absence de macles.

- Les *schistes à muscovite avec ou sans albite*

Ils représentent le faciès le plus fréquent de la région. Ils sont souvent altérés et montrent des colorations jaune ocre à jaune safran avec des taches d'hydroxydes de fer, surtout dans l'échantillon 94. Ils sont plissotés. Ils présentent une texture lépidoblastique à granolépido-blastique (80, 101, 109) et une structure très finement litée.

Ils se présentent au microscope constitués essentiellement de muscovite à laquelle sont associés la chlorite, le graphite, et le quartz hétérogranulaire (30 μm à 1 mm), constituant le fond dans lequel s'observent accessoirement des plagioclases séricitisés, du rutile, du sphène, des pyrites oxydées et des baguettes d'ilménite concordantes avec la schistosité. Enfin, la gœthite cryptocristalline a été notée aux voisinages des minéraux opaques dont elle dérive et le long des fissures.

- Les *micaschistes*

Ce sont des roches à structure foliée et plissotée et à texture lépidoblastique à porphyro-lépidoblastique (éch. 124). Outre les principaux minéraux habituels (quartz blancs et hétérogranulaires, muscovite abondante, séricite subordonnée, chlorite parfois non négligeable), ils peuvent renfermer: - de l'albite en gros cristaux (800 μm), rétro-morphosés et envahis de séricite, d'épidote ou entourés de chlorite (éch. TOG-37); - des mouches microscopiques (40 - 80 μm) de calcite en début d'altération (éch. CF N-5), et de sidérite fraîche en plages sans forme nette dans les lits de micas et de quartz (éch. SP-51, SP-54 et SP-61) (Pl. I, photo 2); - des minéraux opaques tels que l'ilménite en baguettes souvent concordantes avec la schistosité, et la pyrite goethitisée en grandes plages irrégulières; - accessoirement des grenats de grande taille à inclusions de chlorite et d'ilménite (éch. 124), la gœthite cryptocristalline, la biotite, le graphite, la tourmaline, et le rutile.

Par ailleurs, ont été mis en évidence à la microsonde, un mica sodique, la paragonite (éch. 124 et 147), et une épidote, la clinozoïsite (éch. 147). La paragonite se présente sous forme de lamelles ou paillettes semblables aux muscovites, avec lesquelles elle est très souvent associée. La clinozoïsite a été observée en inclusion dans les grenats.

En récapitulation, les schistes et micaschistes ne présentent pas de différence au niveau de leur composition minéralogique; les seules dissemblances s'observent au niveau de la structure et de la texture.

En lame mince, une évolution microtectonique a été observée d'Ouest en Est. En effet, dans la partie occidentale de la coupe, deux phases de déformations correspondant à des schistosités S_1 et S_2 ont été mises en évidence, tandis que dans sa partie orientale, sont observées trois phases, les deux dernières étant les plus marquées. Parfois, des recristallisations minérales liées plus ou moins directement aux deux dernières phases ont été mises en évidence.

b - Les quartzoschistes et quartzites

Les quartzoschistes

Ce sont des quartzites très riches en micas (20 à 30 %), à structure feuilletée ou schisteuse et à texture granolépido-blastique. Les grains de quartz (minéral abondant) sont hétérométriques (20-40 μm) pour les plus petits et (600 μm - 1mm) pour les plus gros, et à extinction roulante. Les petits quartz de contours réguliers à tendance polygonale, sont disposés en niveaux orientés parallèlement à la schistosité et sont considérés comme provenant de la recristallisation liée au métamorphisme. Les gros grains d'aspect rongé ou chagriné sont parfois discordants sur la schistosité (éch. 5), ou parfois concordants formant ainsi des ocelles amygdaloïdes avec des queues de recristallisation (éch. 6). Par ailleurs, les quartz présentent dans l'ensemble des bordures corrodées témoignant d'un phénomène de dissolution. Au quartz sont associés des micas: séricite et muscovite, formant des réseaux parallèles en bandes continues qui limitent parfois les amygdales de quartz (éch. 6).

Accessoirement s'observent des épidotes de type pistachite d'apparence zonée soulignée par des colorations jaune, rouge et bleu, et formant ainsi un typique "manteau d'Arlequin", des zircons, des tourmalines et des minéraux opaques. Ces derniers sont de taille et de forme variables et se présentent soit en sections carrées, soit en plages irrégulières très contournées. Il s'agit de pyrite oxydée.

L'échantillon 8 est un peu particulier avec une faible abondance des micas, une structure granoblastique à quartz fortement indentés et relativement mieux calibrés que dans les premiers faciès décrits. Il y a également moins d'ocelles.

- Les quartzites

Les quartzites étudiés sont de deux types: des quartzites micacés et de quartzites ferrugineux de type itabirite.

Les quartzites micacés présentent une texture granoblastique à porphyroblastique. Le quartz, minéral dominant (80 % environ), est blanc à translucide, à extinction roulante ou nette, et est hétérogranulaire (40-280 μm). Les grains ont une tendance polygonale avec cependant parfois des contours irréguliers et sont séparés entre eux par de minces fissures de dissolution, lesquelles sont quelquefois envahies d'hydroxydes de fer. La muscovite et la séricite (10 % environ) sont en paillettes fraîches, disposées soit sans orientation bien précise dans la masse de la roche (17, 97, TOG-15), soit orientées soulignant la schistosité. La biotite est altérée et est envahie par la chlorite. Du graphite est associé dans certaines lames à la muscovite mais peut aussi se rencontrer autour de certains grains d'albite.

Sporadiquement sont observés des porphyroblastes (260 μm) de feldspaths (microcline) en début de séricitisation et des rhomboédres de petite taille (50 et 100 μm) de dolomite (éch. TOG-15).

Les *quartzites ferrugineux* type itabirite sont des roches litées de couleur gris sombre, et de texture granoblastique. Ils présentent une alternance de lits clairs constitués de quartz hétérogranulaires et de lits sombres formés de grains automorphes de magnétite (40-240 μm) et d'hématite lamellaire. Ces minéraux sombres représentent environ 30 % des principaux constituants. Dans une lame (éch. 15), ont été notées des paillettes de chlorite épigénisant des biotites, de la pyrite fraîche et de l'apatite qui n'ont été mises en évidence qu'à la microsonde.

c - Les amphibolites

Ce sont des roches de couleur vert clair à vert sombre. La structure est foliée et la texture nématoblastique. Elles sont composées d'amphiboles, de pyroxènes, de feldspaths, de quartz, d'épidotes, de micas et accessoirement de grenats, d'apatite, de minéraux titanés, d'opiques et de zircon.

Les amphiboles sont les hornblendes verte (éch. 88, 127 et 133), et brune (éch. 89) et l'actinote. Les hornblendes constituent l'essentiel des échantillons (40 à 60 %). Elles sont parfois très altérées et sont bordées de chlorite de type clinochlore (éch. 133). L'actinote se rencontre au voisinage de ces dernières. Elle se présente sous forme lamellaire, en cristaux plus longs que les paillettes de muscovites. Les pyroxènes (de l'enstatite) n'ont été rencontrés que dans un seul échantillon (éch. 89). Les feldspaths sont du microcline et des plagioclases. Ils sont de grande taille, à contours irréguliers et à maillage flou. Ils sont séricitisés. Les quartz rencontrés sont à bords irréguliers, de taille variable et dispersés dans la masse. Parfois ils sont en inclusions dans les amphiboles, les pyroxènes et les feldspaths. Les épidotes sont hétérogranulaires. Il s'agit de clinozoïsite et de pistachite, cette dernière étant préférentiellement associée aux feldspaths. Les micas sont de la séricite associée aux feldspaths (éch. 88). Les grenats sont de grande taille et renferment des inclusions de quartz et de rutile. Ils sont parfois eux-mêmes en inclusions dans les hornblendes (éch. 88-2). Les minéraux titanés sont de l'ilménite avec des ferruginisations secondaires de type gœthite, du sphène et du rutile (éch. 127, 88-1 et 89). De l'apatite a également été observée dans ces lames.

2- Minéralogie - Etudes physico-chimiques

a - Détermination par diffraction des rayons X

L'examen pétrographique a été complété systématiquement par une analyse minéralogique effectuée par diffraction des rayons X sur poudre. Les résultats de cette analyses sont rassemblés dans le tableau XIV. Elle a permis de compléter la composition minéralogique des échantillons de roches pour lesquelles nous ne disposons pas de lames minces. Par ailleurs elle a permis de préciser la nature des carbonates observés en lames minces (calcite, dolomite et sidérite).

Les rayons X confirment que les schistes et les micaschistes sont essentiellement constitués de quartz, de muscovite, plus rarement de chlorite, avec parfois la sidérite, la gœthite en traces et des feldspaths. Dans les micaschistes, outre ces minéraux cardinaux, ont été détectées la dolomite (un échantillon) et la pyrite en traces. Le rutile a été déterminé dans deux échantillons de schistes. Les quartzites et les quartzites ferrugineux renferment, à côté du quartz, la muscovite et rarement des traces de gœthite et aussi d'hématite; un échantillon (TOG 15) renferme entre autre la calcite et la dolomite en abondance notable.

L'apport complémentaire des RX est l'extension à un nombre plus vaste d'échantillons en dehors des lames minces. En fait l'utilisation des RX dans l'étude des roches schisteuses

de la région de Pagala montre que le spectre minéralogique est peu varié. D'autre part la diffraction des RX a permis d'enlever l'ambiguïté sur la nature des carbonates: dolomite et calcite.

Tableau XIV - Constitution minéralogique de diverses roches primaires d'extension régionale établie par diffraction des rayons X

Echantillon	Nature	Quartz	Mica	Chlori.	D/C	Sidérite	Feldsp.	Pyrite	Divers
CB 18	Schistes	P	A						
CF3 F10-1	"	P	A						
CB 19	"	P	A		P*				* Dolomite
SP 49	"	P	A	P					
SP 46	"	P	A						
SP 57	"	Tr	A	P					
SP 58	"		A						
SP 59	"		A	Tr					
SP 60	"	P	A	Tr					
TOG 28	"	P	A						
SP 50	"	P	A	Tr		P			
SP 53	"	P	A	P		Tr			
CF 4-8	"	P	A						Tr. goëthite
CASC 14	"	P	A						
CF 124-1	"	P	A						Tr. goëthite
CF 124-3	"	P	A						Tr. goëthite
CF T-7	"	P	A	P					
CF F-6	"	P	A						Tr. kaolinite
CF J-10	"	P	A	P					
CF X-5	"	P	A	P					
CF U-8	"	P	A	P					Tr. goëthite
CF 11-3	"	P	A						
CF 11-4	"	P	A						
CF S-6	"	P	A				Tr		
CF J1-7	"	P	A	Tr					
SP51	Micaschistes	P	A	P		P			
SP54	"	P	A	P				P	
CF A1-6	"	P	A		P*				* Dolomite Tr. goëthite
CF O-12	"	P	A	P			P		
CF N-5	"	P	A	P			P		
CF N-10	"	P	A	P			P		
TOG 37	"	P	A	P			P		
US 6	"	P	A						Tr. goëthite
SP52	Quartzites	A							
SP56	"	A							
TOG55	"	A							Tr. hématite
TOG53	"	A	Tr						Tr. hématite et kaolinite
TCHA 20	"	A	Tr						
TCHA 55-1	"	A							Tr. rutile
TCHA 55-2	"	A							Tr. rutile
TOG 15A	"	A	P		P*		Tr		Dolomite
TOG 15	"	A	Tr		P*		Tr		*Tr. calcite
TOG 15-B	"	A	P		Tr*		P		* dolomite
CF N-9	"	A	Tr						Tr. goëthite

Légende: Chlori. = Chlorites; D/C = Dolomite / Calcite; Feldsp. = Feldspath; A = Abondant; P = présent; Tr = Traces.

b - Analyse des minéraux à la microsonde

Tableau XV

Composition chimique de quelques minéraux de roches primaires (résultats d'analyses micrositues); * analyses faites à la CAMEBAX à Nancy, les autres à Bondy.

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Muscov.	8 (3)		3,20	24,0	51,0			12,0				7,60						2,12
	9 (5)		2,72	26,0	50,64			12,0				7,38						1,94
	13 (3)	0,60	0,93	34,0	49,0			10,00				3,60						1,44
	16 (5)		2,65	27,4	52,8			11,66				4,80						1,92
	17 (4)		1,22	21,11	62,0			8,60		0,11		1,72			0,41			2,93
	18 (9)		3,44	25,64	53,73			11,46				4,20						2,09
	19 (4)		3,0	24,86	52,20			11,00				7,36			0,34			2,10
	98(2)		2,37	32,22	52,0			11,00				0,77			0,62			1,61
	101 (11)	0,64	1,51	32,25	46,26			9,00		0,30		5,0						1,43
	78 (5)	0,57	1,26	32,54	50,70			10,58				3,30						1,55
	80 (6)	0,70	3,91	28,17	53,83			10,84		0,56		1,21			0,35			1,90
	85-2 (4)		1,32	32,52	48,87			11,30				4,32						1,50
	109 (7)		3,17	30,31	50,70			11,16				0,81			2,43			1,67
	111 (5)		2,54	31,80	51,11			11,07				1,86						1,60
	104 (3)		3,94	27,80	53,63			11,68	0,94			1,40						1,93
	124 (5)	0,81	2,28	31,54	51,65			9,69		0,52		2,18						1,63
	147 (8)	0,57	2,17	31,04	51,14			10,38		0,44		3,15						1,64
	TOG 37 (7)		3,71	26,60	54,03			11,21		0,43		2,67						2,03
	CF N-5 (1)		2,71	28,08	50,70			11,02				6,25						1,80
	CF O-12 (5)		2,10	30,28	50,09			10,52		0,28		5,02						1,65
	CF A-10 (6)	0,69	1,56	32,65	50,09			10,31				2,80						1,53
	CF X-5 (3)		2,0	30,60	51,35			10,75				3,69						1,67
	CF N-10 (2)		2,81	29,08	50,52			11,0		0,48		4,57						1,73
	CF N-9 (2)		3,19	28,14	53,35			11,97		0,50		1,68						1,89
	TOG 5 (1)		1,93	28,60	51,85			11,07				5,23						1,81
	TOG 15 (3)		3,72	29,64	53,77		0,24	11,70	0,16	0,56		0,43						1,81
	TOG 21 (10)		3,0	31,09	48,72			10,0		0,83		0,5			5,53			1,56
	TOG 28 (9)		3,08	31,15	50,28			11,14				0,77			1,84			1,61
	SP 51 (3)		1,36	32,30	51,18			10,92				2,91						1,58
	SP 54 (1)		1,12	32,65	50,83			11,23		0,35		2,74						1,55
Biotite	15 (2)		10,0	22,50	35,0			4,60				26,50						
Chlorite	9 (5)		13,30	20,60	27,0							38,00						
	15(6)		13,0	20,15	26,0							36,50	2,03					
	16 (8)		12,50	21,50	30,0			1,30			0,27	35,0						
Chlorite	TOG 37 (6)		24,56	23,11	40,15				0,58			10,04						
	CF N-5 (8)		13,60	25,82	28,84			0,90			0,39	33,67						
	CF O-12 (5)		18,05	22,75	29,39						0,82	27,65						
	CF X-5 (7)		12,30	21,40	26,75							36,72						

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Chlorite	85-2 (3)		9,00	22,81	25,75			0,33				40,75					
	CF N-10 (2)		14,36	21,75	28,18							33,65					
	SP 51 (1)		9,68	23,29	25,96							40,01					
	SP 54 (4)		8,30	22,81	25,33							41,90					
	124 (6)		18,02	23,24	29,27							28,01					
	147 (4)		18,48	22,9	29,50							27,13					
Paragon.	124 (3)	7,94		40,05	49,17			1,18				0,33					
	147 (2)	6,14		38,98	51,66		0,28	1,06				1,09					
Albite	85-2 (2)	11,53		19,15	68,35												
	TOG 37 (10)	12,30		19,08	68,25				0,80								
	CF O-12 (2)	12,07		19,37	67,15												
	CF X-5 (3)	11,46		18,92	68,70												
	CF N-10 (3)	12,13		18,70	68,13												
	88-1 (3)	7,48	0,37	41,28	47,42			0,41	1,40			0,84					
Labrador	133 (2)	6,15		27,13	55,60				10,39								
Ilménite	16 (5)			1,03	1,65					48,40	2,50	45,66					
	CF A-10 (5)			0,56	0,76					56,07	1,11	40,22					
	CF X-5 (4)				1,07					50,15	1,05	46,48					
	CF N-10 (1)		0,64	5,78	3,70					45,15	1,25	42,62					
	101 (6)			0,72	0,70					51,38	0,92	45,50			0,3		
	78 (9)	2,75		0,50	0,63					49,28	0,42	41,57			4,54		
	85-2 (1)									49,86	1,30	46,71					
	SP 51 (2)				0,39					49,63	0,67	48,07					
	SP 54 (2)				0,39					49,17	0,45	48,93					
	124 (4)				0,5					49,98		47,49					
	Rutile	13 (4)			0,83	1,83					96,0						
18 (5)			0,32	1,25	2,10					94,45		1,17					
19 (4)		0,51		0,36	0,90					96,52		0,90					
98 (2)				2,43				0,77		93,53		0,60					
80 (2)				1,48	2,12			0,45		93,88		1,00					
109 (4)				0,84	1,53					95,94		0,35					
111 (4)			1,24	1,56						94,72	1,08						
124 (1)				0,48						98,0		0,61					
TOG 37 (1)					0,75					97,03		0,84					
TOG 21 (4)				0,78	1,30					95,84							
TOG 28 (3)				1,60	2,01					98,13		0,54					
88-1 (3)				0,26	0,42				0,20	95,17						1,41	
Calcite	CF N-5 (4)		0,27	0,2	0,55				46,51		1,02	0,87					
Sidérite	SP 51 (12)		9,34	0,19	0,89				0,55		2,2	45,52			0,05		
"	SP 54 (2)		9,84	0,12	0,59				0,41		2,12	45,71					
Ankérite?	SP 51 (3)		8,40	-	0,44				24,34		1,58	18,86					
Dolomite	TOG 15 (3)		18,36	-	0,13				26,37			2,28					
Sphène	CF N-5 (2)			3,34	30,60				28,60	36,22		1,11					

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Sphère	9 (3)			2,20	30,0				28,0	39,0							
	133 (2)			1,52	29,97				28,34	38,37		0,90					
Apatite	CF N-5 (2)					43,28			55,51			0,30					
	9 (1)					40,46			57,30								
	15 (1)					41,52			56,60								
	16 (1)	0,68				42,0			57,0								
	SP 54 (1)					43,30			55,25								
Grenat	124 (4)		2,55	20,12	41,0				5,5			34,69					
Grenat	147 (8)		1,8	19,76	36,45				9,01		3,11	29,51					
Hornblen.	88-1 (1)	2,92	10,26	17,88	41,37			0,22	11,61	1,02		14,0					
	133 (5)	1,63	11,18	12,27	43,52			0,65	11,95	0,94	0,32	16,65					
Epidote	133 (1)			22,40	38,10				23,66			15,12					
Clinozois.	88-1 (3)			29,45	39,44				24,24			6,14					
Les sulfures																	
Minéral	N° Echant.	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
Pyrite	15 (2)			0,33	0,42		45,84					43,94			0,26		1,03
	16 (3)			0,26	0,33		35,49					47,71					
	SP 51 (3)		0,12	0,12	0,26		35,90					57,85	0,31				
	88-1 (1)			0,1	0,2		50,43					44,89			0,19		
Les minéraux oxydés																	
Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Magn. tit.	CF O-12 (6)			0,58	0,93					10,78		86,93					
Magnétiite	TOG 32A (6)											101,9					
	CF N-9 (2)			1,02	3,88							94,04					
	15 (6)			0,90	1,40							96,80					
Hématite	15 (3)			1,22	1,74							96,0					
Pyr. oxy.	80 (1)			0,76	3,14		9,66					84,96					
	9 (6)				3,70	1,63						90,30					
	TOG 37 (4)			1,70	5,21	0,81						89,70	0,48	0,94			
	TOG 21 (5)			1,80	1,66	1,84						92,55					
	TOG 28 (6)			1,89	3,09	0,25						92,24					
	101 (7)			4,84	2,41	2,08						88,65					
	78 (2)			1,32	3,76							89,0			2,35		
	80 (6)			1,22	4,48							91,42					
	85-2 (2)			2,74	5,44	1,15					1,00	87,72					
	109 (12)			1,33	3,60							92,67					
	111 (4)			1,47	2,13	1,43						93,43					
	104 (2)			0,91	4,90							92,36					
	88-1 (1)		0,65	2,22	7,63		0,32		0,54			85,65		0,62			
Mag. mar*	TOG 5 (3)			0,56	3,97		0,20					95,36					
Mag. gœt*	TOG 5 (4)			1,95	6,49							91,56					

Légende: Les nombres entre parenthèses correspondent au nombre de points analysés sur le minéral dans la lame. Magn. tit. = Magnétiite titanifère; Mag. mar. = Magnétiite martinitisée; Mag. gœt. = Magnétiite goethitisée; Pyr. oxyd. = Pyrite oxydée.

Elles ont porté sur certains minéraux, en particulier, les muscovites, les chlorites, les minéraux opaques des roches silicatées. Le but de cette investigation était de préciser le chimisme de ces minéraux d'une part et de rechercher d'éventuels minéraux contenant les éléments anomaux reconnus dans les chapeaux de fer d'autre part. La plupart de ces analyses ont été effectuées à la microsonde LINK (Bondy), les autres à la microsonde électronique CAMEBAX (Nancy). Les analyses ont porté sur 18 éléments (Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cr, Co, Ni, Cu, Ba, Zn et Pb). Les résultats sont donnés dans le tableau XV. Il s'agit de moyenne par échantillon, (les résultats bruts sont donnés en annexe 2). Parmi les éléments dosés, deux n'ont jamais été détectés, Co et Cr; ils n'ont pas été portés sur le tableau. Les résultats sont exprimés en pourcentages d'oxydes ramenés à 100 % pour les silicates; ceux des sulfures sont exprimés en éléments. Les valences correspondant aux oxydes indiqués sont arbitraires, la microsonde électronique ne permettant pas de définir celles-ci.

Les muscovites. Elles ont une composition chimique moyenne de 51 % de SiO_2 , 30 % de Al_2O_3 et 11 % de K_2O environ, avec un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ moyen égal à 1,74. Elles sont également riches en fer (3,5 % FeO) et en magnésium (2,6 % MgO), et renferment parfois du baryum en abondance, jusqu'à 5 % BaO , du sodium et du titane. Le rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ apparaît particulièrement élevé (une muscovite théorique a un rapport de 1,18); il est proche de celui des muscovites des schistes et des quartzites de faible degré de métamorphisme. (Deer et al., 1966; Larqué, 1972; Guidotti, 1984). Ces fortes teneurs en silice, en fer et en magnésium enregistrées dans les muscovites de Pagala confirment le faible degré du métamorphisme dans les faciès de schistes verts déjà évoqué dans la série de l'Atacora (Affaton, 1975; 1987; Godonou et al. 1986).

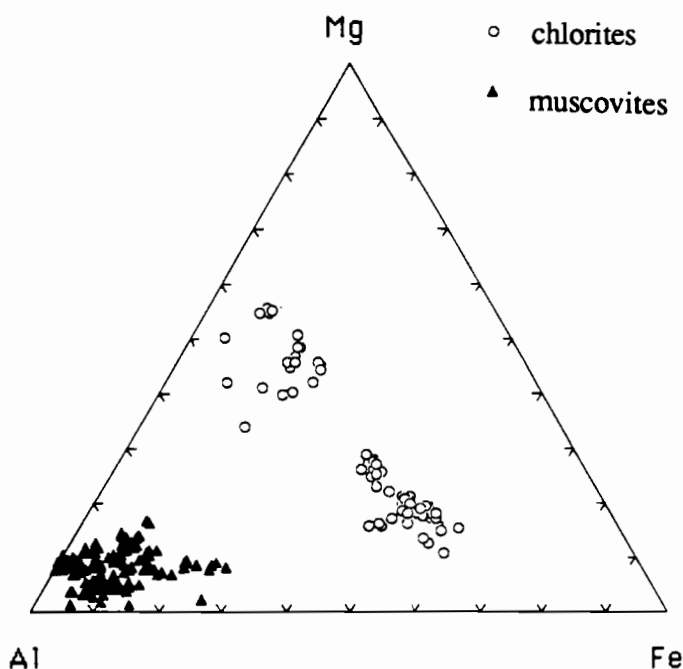


Figure 14 - Diagramme triangulaire Al-Mg-Fe obtenu à partir des résultats de microsonde sur les muscovites et les chlorites des roches primaires de Pagala.

Par ailleurs, sur le diagramme triangulaire (fig. 14), les points sont remarquablement groupés. Ceci prouve la grande homogénéité des muscovites avec des teneurs constantes en Mg et en Fe. Enfin, le déficit en alumine caractérisé par un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ élevé, pourrait s'expliquer par d'éventuelles substitutions de Fe, Mg et de Ba à Al, bien que les moyens d'investigations n'aient pas permis de préciser la localisation par rapport à la structure du minéral.

La biotite. Elle a été analysée dans un seul échantillon de chloritoschiste, et donne une composition chimique de l'ordre de 35 % de SiO₂, 23 % de Al₂O₃, 27% de FeO, 10 % de MgO et 5 % de K₂O. Il s'agit d'une biotite pauvre en potassium.

Les chlorites. Elles présentent pour leurs quatre principaux constituants (Si, Al, Fe et Mg), des teneurs variant dans des fourchettes assez larges, ce qui indique la grande diversité de ces minéraux: de 25 à 40 % pour SiO₂ avec une moyenne de 29 %; 20 à 26 % pour Al₂O₃, moyenne 23 %; 9 à 25 % pour MgO, moyenne 14 %; 10 à 41 % pour FeO, moyenne 33 %. Elles contiennent parfois un peu de K et de Mn. Ni (2 % NiO) a été détecté dans les chlorites de l'échantillon 15.

Les fluctuations des teneurs en Fe et en Mg se font de façon inverse, et permettent de définir quoique moins nettes sur la figure 14 trois familles de chlorites: une famille de chlorites très ferrifères avec un indice ferro-magnésien [FEM = 100 X MgO / (MgO + FeO)], où FeO_t = Fe total exprimé en FeO], inférieur à 20 , une famille de chlorite très magnésienne avec un FEM supérieur à 71 et une famille de chlorite ferro-magnésienne à FEM compris entre 27 et 39 .Là encore les positions de Fe et Mg dans la structure du minéral n'ont pas été précisées.

La paragonite. Mise en évidence dans deux échantillons de micaschiste à la microsonde électronique, elle présente une composition chimique moyenne de l'ordre de 51 % de SiO₂, 40 % de Al₂O₃, 7 % de Na₂O, 1 % de K₂O et de FeO. Ces valeurs sont un peu plus élevées que les valeurs de référence (Deer et al., 1966).

Les plagioclases. Deux types de plagioclases (l'albite et le labrador) ont été définis par leurs compositions chimiques qui sont respectivement 68 % de SiO₂, 19 % de Al₂O₃ et 12 % de Na₂O; 55 % de SiO₂, 27 % de Al₂O₃, 10 % de CaO et 6 % de Na₂O.

Les minéraux titanés.

- **L'ilménite.** Elle a une composition moyenne normale avec 50 % de TiO₂ et 45 % de FeO. Mais elle renferme aussi d'autres éléments: Si, Al et Mn, à des teneurs de l'ordre de 1 %, quelquefois de Zn (jusqu'à 4,5 % de ZnO) et Na (3 % Na₂O).

- **Le rutile.** Les grains de rutile analysés ne sont pas purs. Ils contiennent en effet, outre Ti (96 % TiO₂), des traces fréquentes de l'ordre de 1 % de Si, Al et Fe et aussi parfois un peu de K, Mg, Mn et Na. Un rutile est en outre riche en Ba (1,4 % BaO).

- Par ailleurs, de la magnétite titanifère a été trouvée dans l'échantillon CF O-12 qui contient environ 87 % de FeO, 11 % de TiO₂ et un peu de Si et de Al.

La magnétite. Lorsqu'elle est saine, elle est composée uniquement de fer; c'est le cas de l'échantillon TOG 32A. Lorsqu'elle est altérée (éch. CF N-9 et 15), elle présente des enrichissements en alumine et en silice dans des teneurs allant jusqu'à 1,5 % de Al₂O₃, et 5 % de SiO₂.

L'hématite. Elle a une composition voisine de celle de la magnétite martitisée, et contient des impuretés silico-alumineuses comme cette dernière (96 % FeO, 2 % SiO₂, 1 % Al₂O₃).

La pyrite. La pyrite fraîche analysée dans trois échantillons a une composition chimique normale avec des teneurs en Fe et en S variant respectivement de 44 à 58 % de Fe et 36 à 51 % de S. Dans un échantillon, Pb a été dosé en abondance notable (1 % PbO).

La pyrite oxydée. Deux cas ont été observés suivant le degré d'oxydation.

- La pyrite à faible degré d'oxydation mise en évidence à la microsonde électronique dans deux échantillons, fournit des valeurs élevées pour Fe et basses pour S et apparaît enrichie surtout en Si et en Al.

- Lorsqu'elle est complètement oxydée, seule la forme du minéral indique qu'il s'agit de pyrite oxydée car elle ne renferme presque plus de trace de soufre. Dans ces pyrites

oxydées, sont notés au côté de Fe, des enrichissements systématiques en Si, Al, et en P. La composition chimique moyenne est de l'ordre de 91 % de FeO, 4 % de SiO₂, 2 % de Al₂O₃ et 1,3 % de P₂O₅. Dans un échantillon, Zn a été détecté en teneur notable (2,4 % ZnO) et dans deux autres, des traces de Ni et Cu ont été enregistrées.

Les carbonates

- La **dolomite** renferme en moyenne environ 18 % de MgO, 26 % de CaO, avec un peu de fer (2,2 % FeO) et aussi un peu de soufre bien qu'aucune pyrite n'y ait été observée en inclusions.

- La **calcite** présente des substitutions en Mn (1 % MnO), Fe (0,8 % FeO) et Mg (0,2 % MgO) et aussi des traces de Si.

- La **sidérite** est très riche en Mg (9 % MgO) et en Mn (2,2 % MnO), avec des traces de Ca et de Si. Aucun élément caractéristique des chapeaux de fer tel que Zn, Ba, n'a été détecté dans ces sidérites.

- L'**ankérite** mise en évidence à la microsonde électronique dans un échantillon a une composition chimique de 24 % de CaO, 19 % de FeO, 8,4 % de MgO et 1,5 % de MnO environ.

Tableau XVI - Composition moyenne et anomalies métalliques des principaux groupes minéraux des roches silicatées de la région de Pagala.

Groupe	Minéral	Eléments chimiques structuraux	Eléments accessoires en anomalies
SILICATES	Muscovite	Si, Al, K	Fe, Mg, Ba, Ti, Ca
	Biotite	Si, Al, Fe, Mg	K
	Chlorite	Si, Al, Fe, Mg	Ca, K, Mn, Ni
	Paragonite	Si, Al	Na, K, Fe, S
	Albite	Si, Al, Na	Ca
	Labrador	Si, Al, Ca	Na
	Sphène	Si, Ca, Ti	Al, Fe
	Epidote (clinozoïsite)	Si, Al, Ca, Fe	-
	Grenat	Si, Al, Fe	Ca, Mg, Mn
SULFURES	Homblende	Si, Al, Fe, Mg, Ca	Na, Ti, K, Mn
	Pyrite fraîche Pyrite oxydée	Fe, S Fe	Pb, Si, Al, Ni Si, Al, P, Mn, Zn, S, Ca, Cu
CARBONATES	Calcite	Ca	Si, Mn, Fe, Mg, Al
	Dolomite	Ca, Mg	Fe, Si, S
	Sidérite	Fe, Mg	Mn, Si, Ca
	Ankérite	Ca, Fe, Mg	Mn, Si
OXYDES	Hématite	Fe	Si, Al
	Magnétite fraîche	Fe	-
	Magnétite altérée	Fe	Si, Al
	Ilménite	Fe, Ti	Mn, Ba, Na, Zn, Si, Al, Mg
	Titanomagnétite	Fe, Ti	Si, Al
PHOSPHATES	Rutile	Ti	Si, Al, Fe, Mg, Mn, Ba, K, Na, Ca
	Apatite	Ca, P	Na, Fe

Les minéraux accessoires.

- Le **sphène** a une composition chimique normale avec 30 % de SiO₂, 38 % de TiO₂, 28 % de CaO, avec cependant un peu de Al et de Fe.

- L'**apatite** est presque pure et a une composition chimique normale de l'ordre de 42 % de P₂O₅ et 56 % de CaO avec des traces de Fe.

- Les **grenats** analysés renferment Si (39 % SiO₂), Al (20 % Al₂O₃), Fe (32 % FeO), Ca (7 % CaO) et Mg (2 % MgO), quelquefois Mn (jusqu'à 3 % MnO).

- Les **hornblendes** analysées ont des compositions chimiques qui les apparenteraient à une hornblende de type tonalite (Deer et al., 1966).

- La **clinozoïsite** et l'épidote ne contiennent aucun élément atypique et ont des compositions normales.

De cette étude chimique micrositée sur les minéraux constitutifs des roches primaires, on retient que ceux-ci ont dans l'ensemble des compositions chimiques normales proches des teneurs théoriques (tableau XVI). Cependant, quelques minéraux présentent des traits particuliers incomplètement élucidés. Les muscovites sont très riches en fer, en magnésium, parfois en baryum et ont un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ élevé qui pourrait correspondre à des substitutions sur Al en position octaédrique et indiquer un métamorphisme de faible degré. De la même manière, les chlorites se révèlent riches en fer et en magnésium. Les magnétites, lorsqu'elles sont altérées, sont légèrement enrichies en silice et en alumine. Tout comme les magnétites, les pyrites oxydées renferment des teneurs élevées en silice, en alumine et aussi en phosphore.

Les anomalies métalliques sont assez rares et constituent les éléments accessoires des principaux groupes minéraux. Elles concernent Zn, Ba, Mn, Pb, Cu, et Ni et restent toujours faibles et accessoires.

B - Composition chimique des roches silicatées

En complément des descriptions pétrographiques et minéralogique des faciès de roches primaires, une caractérisation chimique basée sur l'analyse chimique globale multi-élémentaire a été faite.

Trente-six schistes, treize micaschistes, quinze quartzites, sept quartzites ferrugineux et trois brèches ont été retenus pour cette étude géochimique.

Pour décrire les compositions chimiques des différents faciès et les comparer entre eux, outre les tableaux d'analyses figurant en annexe, celles-ci sont présentées de deux manières:

- représentation graphique (fig. 15) sous forme de diagrammes de distributions où sont portés, pour chaque élément, tous les points représentatifs des divers échantillons, rangés par faciès (schistes, micaschistes, quartzites ferrugineux, quartzites, brèches);
- paramètres statistiques univariés (tableau XVII pour chacun des faciès (la famille des brèches ne comportant que trois échantillons, elle n'a pas été portée dans ce tableau).

Afin de disposer d'une référence, aussi approximative soit-elle, pour détecter les anomalies de teneurs, ont été également portés dans ce tableau les clarkes pour les "slates and clays" (Vinogradov, 1962). L'examen de ces deux modes de présentation conduit à diverses remarques.

1 - Niveaux moyens de teneurs

On peut d'ores et déjà se poser des questions sur la représentativité de ces échantillons. En effet, les échantillons prélevés et analysés sont les plus frais possibles. Cependant, la fréquente décoloration de ces schistes et certaines des caractéristiques chimiques (hydroxylation relativement forte et très basses teneurs en Ca et Sr) prouvent nettement une altération météorique. Ainsi dans un échantillonnage comme celui-ci où apparaissent quelques teneurs fortement anormales, la médiane donne une idée plus juste du niveau moyen de teneurs dans l'ensemble de l'échantillonnage que la moyenne. C'est pourquoi il est préférable de considérer plutôt la médiane que la moyenne quand ces deux paramètres diffèrent sensiblement.

Dans un premier temps, on peut noter la très grande ressemblance dans les compositions chimiques des schistes et des micaschistes. En comparant les médianes pour les schistes et les micaschistes avec les clarkes, on remarque surtout le déficit en Ca et en Sr

Tableau XVII - Composition chimique des diverses roches silicatées
(données statistiques élémentaires)

Elém.	<i>Schistes (36 éch.)</i>						<i>Micaschistes (13 éch.)</i>						* Clarkes
	Moy.	Méd.	Ec.	T.C.V. %	Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.	T.C.V. %	Min.	Max.	
SiO ₂	59,0 %	59,6	9,00	15	43,3	88,8	62,2 %	65,5	7,9	13	46,7	70,1	51,0
Al ₂ O ₃	19,9	18,8	5,40	27	4,8	29,7	17,3	17,3	5,7	32	11,2	30	19,7
MgO	1,90	1,70	1,30	67	0,4	7	2,1	1,7	1,0	50	0,7	4,6	2,2
CaO	0,40	< 0,10	1,40	325	< 0,2	8,7	0,6	< 0,1	1,7	269	< 0,2	6,1	3,5
Fe ₂ O ₃	6,00	6,10	3,30	55	0,6	16,6	5,4	6,3	2,5	45	2	8,7	4,8
Mn ₃ O ₄	0,08	< 0,0	0,10	137	< 0,01	0,05	0,06	0,06	0,06	95	< 0,01	0,14	0,09
TiO ₂	0,96	0,85	0,60	62	0,77	3,95	0,77	0,75	0,17	22	< 0,02	1,12	0,75
Na ₂ O	0,40	0,29	0,45	112	0,02	2,72	0,64	0,34	0,69	107	0,21	2,46	0,89
K ₂ O	5,72	5,71	1,89	33	1,38	9,34	5,22	4,85	2,12	41	2,52	9,35	2,75
P ₂ O ₅	0,15	0,14	0,19	123	< 0,1	1,15	0,12	< 0,10	0,08	67	< 0,1	0,28	0,18
P1000	5,00	4,30	2,70	55	1,7	14,7	4,2	3,20	2,6	63	1,6	11,9	-
Sr	48,0 ppm	43,0	35,0	72	3	148	30 ppm	18	26	88	4	101	450 ppm
Ba	1913	881	2340	122	300	11492	2242	774	2697	120	250	8422	800
V	119	114	35,0	30	32	184	108	99	31	29	72	163	130
Ni	35,0	34,0	24,0	69	< 1	108	38	35	24	64	10	100	95
Co	18,0	16,0	16,0	88	< 5	76	15	14	10	63	< 5	36	20
Cr	100	103	34,0	33	12	204	92	77	36	38	53	170	100
Zn	149	47,0	305	204	11	1475	250	88	424	170	23	1548	80
Cu	27,0	24,0	16,0	58	< 1	75	25	22	15	61	5	64	57
Sc	17,5	16,9	5,70	33	5,2	28,1	15,9	16,6	3,4	21	10,2	20,7	10
Zr	193	188	8,20	42	38	428	176	101	61	35	89	302	200
Nb	17,5	14,0	14,5	83	< 2	90,5	14,1	13,8	4,8	34	6,8	22,8	20
Y	29,0	26,0	17,0	57	4	76	26	30	10	40	6	40	30
La	53,0	44,0	36,0	68	< 3	177	43	42	12	29	24	61	40
Ce	107	88,0	72,0	67	< 10	324	93	84	29	31	23	61	50
Eu	< 1,00	< 0,50	< 0,90	88	< 1	4,3	< 0,8	< 0,5	< 0,6	73	< 1	0,5	1,0
Yb	2,70	2,7	1,30	47	0,6	4,8	2,7	2,8	0,8	29	0,8	1,3	3,0
Lu	0,30	0,20	0,20	83	< 0,01	0,8	0,5	0,5	0,4	77	< 0,01	0,0	0,7

Elém.	<i>Quartzites ferrugineux (7 éch.)</i>						<i>Quartzites (15 éch.)</i>					
	Moy.	Méd.	Ec.	T.C.V. %	Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.	T.C.V. %	Min.	Max.
SiO ₂	51,3 %	59,3	34,2	67	1,4	90,9	90,4 %	95,1	9,7	11	68,9	98,5
Al ₂ O ₃	0,3	0,3	0,2	73	< 0,2	0,7	2,4	0,6	3,6	152	< 0,2	11,2
MgO	< 0,0	< 0,0	< 0,0	53	< 0,2	< 0,1	0,3	0,1	0,7	204	< 0,02	2,7
CaO	< 0,1	< 0,1	< 0,0	< 0	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,0	< 0	< 0,2	0,1
Fe ₂ O ₃	46,0	39,8	33,5	73	7,6	96,9	4,2	1,4	5,3	126	0,5	19
Mn ₃ O ₄	0,09	0,06	0,06	67	0,04	0,19	0,25	0,01	0,72	293	< 0,01	2,78
TiO ₂	0,14	0,09	0,18	127	< 0,02	0,51	0,20	0,04	0,33	166	< 0,02	1,05
Na ₂ O	0,05	0,06	0,03	50	< 0,05	0,08	0,07	< 0,02	0,15	213	< 0,05	0,62
K ₂ O	0,07	0,02	0,07	100	< 0,05	0,22	0,78	< 0,05	1,61	207	< 0,05	5,72
P ₂ O ₅	0,14	0,14	0,08	56	< 0,1	0,26	0,07	< 0,05	0,06	90	< 0,1	0,29
P1000	1,3	0,2	2,0	159	< 0,2	5,3	1,0	0,4	1,4	141	< 0,1	4,3
Sr	7 ppm	7	5	69	2	17	40 ppm	2 pp	122	309	< 1	476
Ba	60	70	36	59	18	107	225	114	369	144	< 1	1347
V	78	53	71	91	11	199	34	19	54	159	< 1	219
Ni	100	37	152	152	5	422	187	14	458	245	< 1	1437
Co	29	17	22	78	9	75	33	14	57	174	< 5	199
Cr	55	20	81	147	6	232	230	20	779	339	< 1	3044
Zn	270	66	581	215	9	1583	30	19	38	126	< 1	125
Cu	26	16	28	106	12	89	18	8	23	132	2	89
Sc	2,9	2,2	1,9	66	0,9	5,7	2,6	1,5	3,4	130	< 0,5	13,3
Zr	31	14	34	107	6	101	76	71	70	92	< 1	222
Nb	5,6	5,0	4,9	87	< 2	15	7,0	4	7,0	100	< 2	21,9
Y	15	9	12	81	3	39	8	5	8	99	1	29
La	11	8	11	101	< 3	34	9	3	13	139	< 3	44
Ce	32	32	18	58	< 10	58	149	13	25	111	< 10	85
Eu	1,0	1,0	0,5	54	< 1	1,9	2,5	< 0,5	1	80	< 1	3,4
Yb	1	< 0,4	1,1	109	< 0,1	3,2	3,6	0,5	0,8	100	< 0,1	2,8
Lu	0,1	< 0,0	0,2	149	< 0,01	0,5	1,1	0,3	0,3	81	< 0,01	1,0

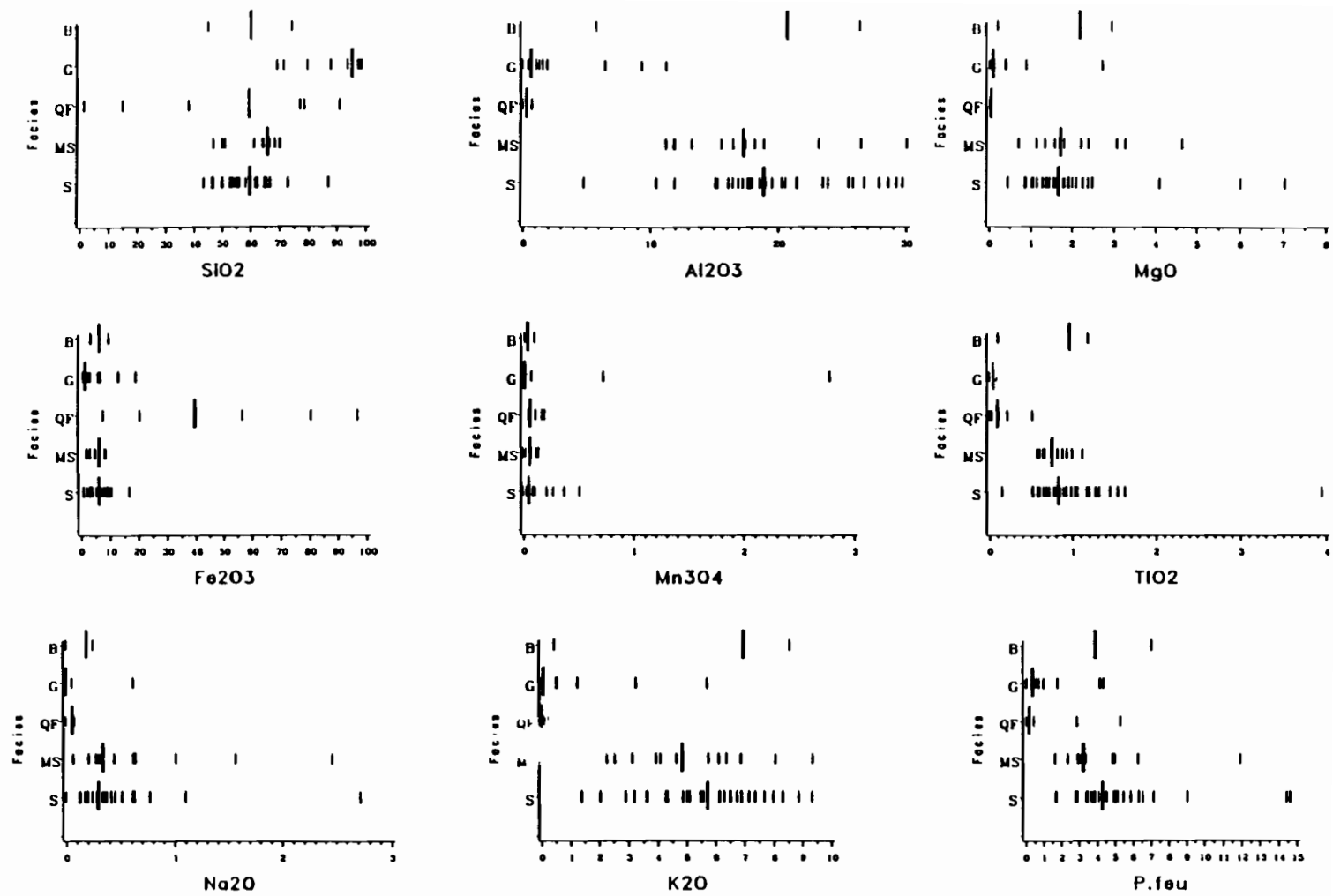


Figure 15 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les différentes roches primaires d'extension régionale étudiées.

Légende: - Chaque trait vertical représente un échantillon.

- Le trait long porté pour chaque faciès représente la médiane de l'élément dans ce faciès.

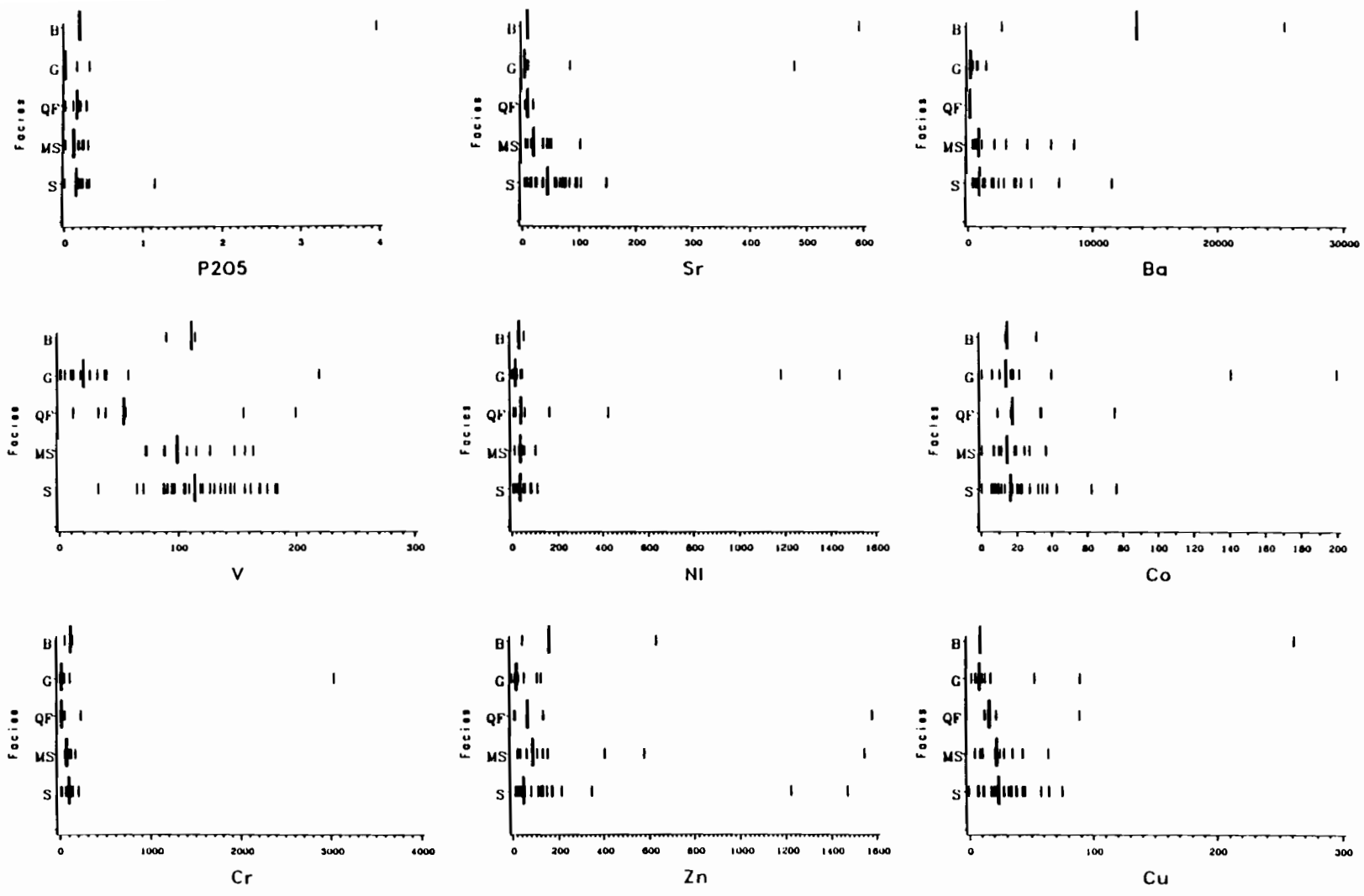


Figure 15 - Suite.

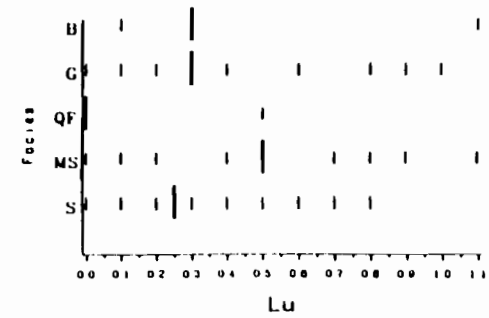
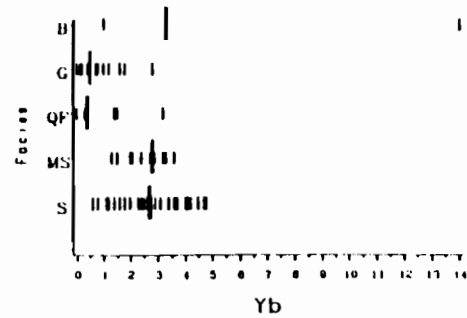
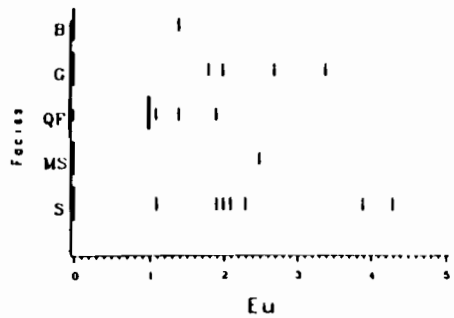
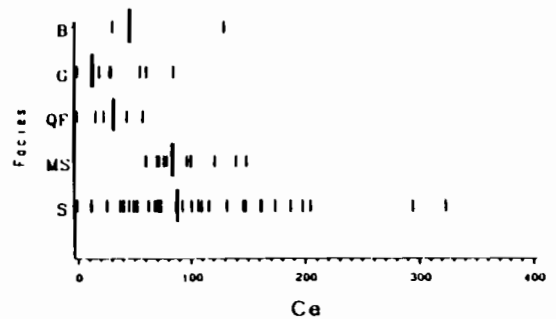
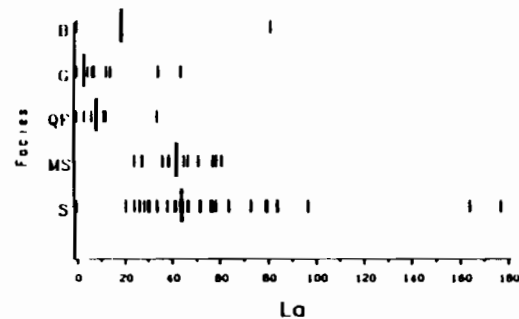
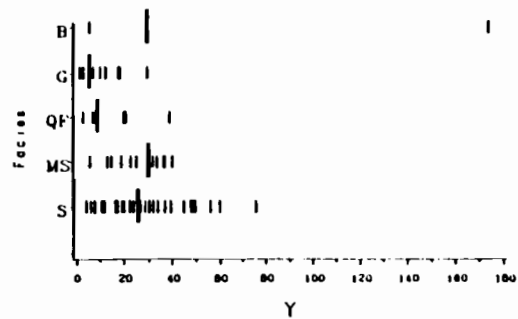
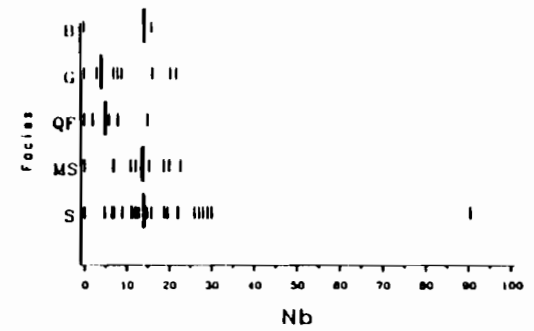
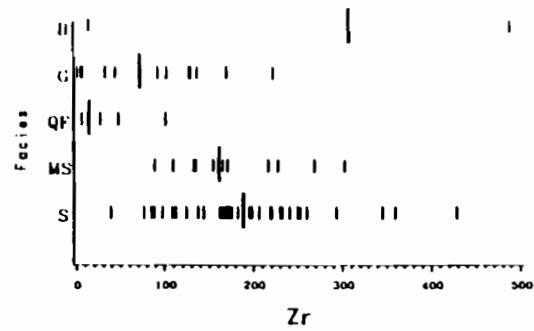
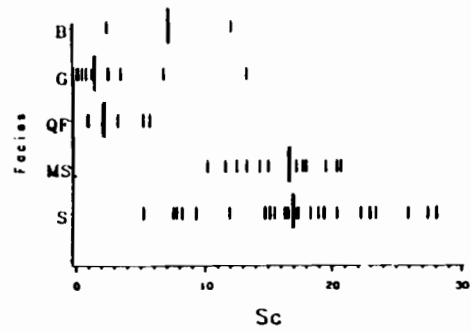


Figure 15 - Suite.

(médianes plus petites d'un facteur 10) et un excès de K et de Zn. Par contre, aucune anomalie moyenne notable n'a été notée dans les quartzites ferrugineux et les quartzites francs. Rien ne peut être dit sur les brèches pour lesquelles on ne dispose que de trois échantillons, lesquels présentent plusieurs anomalies, ce qui ne permet pas d'estimer une composition moyenne.

En résumé, l'ensemble des faciès des roches primaires d'extension régionale les plus représentées apparaît donc comme ayant un chimisme banal silico-alumineux (série pélitique), avec de très basses teneurs en Ca et Sr, et peut-être un léger excès de K, qui n'est pas particulier aux micaschistes.

2 - Les anomalies de teneurs.

Si les niveaux moyens de teneurs sont dans l'ensemble banals, des anomalies importantes sont cependant fréquentes. C'est ainsi que sur la figure 11 les différentes anomalies relevées sont:

- dans les schistes: P, une teneur à plus de 1 %; Ba, plusieurs échantillons à plusieurs milliers de ppm dont un à plus de 10 000 ppm; Zn, deux teneurs supérieures à 1000 ppm; Nb, une valeur à 90 ppm;

- dans les micaschistes: Ba, deux valeurs à plus de 5000ppm; Zn, un échantillon à plus de 1500 ppm;

- dans les quartzites ferrugineux: Cu, une teneur voisine de 100 ppm;

- dans les quartzites: Mn, deux teneurs fortes (0,8 et 2,8 % Mn_3O_4); Ni, deux valeurs supérieures à 1000 ppm; Co, deux teneurs supérieures à 120 ppm; Cr, une teneur voisine de 3000 ppm; Cu, une valeur voisine de 100 ppm;

- dans les trois échantillons de brèches, enfin se rencontrent de nombreuses anomalies fortes: P, 4 % (P_2O_5); Ba, 12 000, 24 000 ppm; Zn, 600; Cu, 270; Zr, 500; Y, 180; Yb, 14.

Les anomalies manifestes sont donc relativement nombreuses et portent sur des éléments divers. En plus de ces anomalies directement discernables en raison de leur importance, il existe des tendances à l'anomalie plus générale pour certains éléments et qui peuvent être mises en évidence par l'examen des dispersions.

3 - Dispersions des teneurs et tendances anormales.

En considérant les coefficients de variation, lesquels permettent de comparer les dispersions des éléments entre eux, on remarque une grande disparité entre les éléments. C'est ainsi que, dans les schistes, le coefficient de variation va de 15 % pour SiO_2 jusqu'à 325 % pour CaO, avec des coefficients forts en particulier pour les éléments mineurs et traces suivants: Zn, Mn, P_2O_5 , Ba (C.V. = respectivement 204, 137, 123, 122 %). Parmi ces quatre éléments, deux, Zn et Ba, présentent des anomalies très fortes. Les coefficients de variation attirent l'attention sur le fait que les deux autres, Mn et P, ont une dispersion importante, même si elles ne le sont pas assez pour être repérées directement comme anormales.

En suivant la même démarche, on remarque que, dans les micaschistes, parmi les éléments mineurs et traces, seuls Zn et Ba, déjà repérés comme parfois anormaux, ont des coefficients de variation nettement élevés (170 et 120 %).

Dans les quartzites ferrugineux par contre, où un seul élément, Cu, a été noté avec des teneurs nettement anormales, les coefficients de variation particulièrement élevés indiquent des teneurs fortes pour plusieurs autres éléments: Zn (C.V. = 215 %), Ni, Cr, Lu (respectivement 152, 147, 149 %), Ti (127 %), etc... Mais ces chiffres sont à considérer avec prudence, compte tenu du nombre petit d'échantillons (7).

Dans les quartzites, la démarche s'applique moins bien car, hormis Si (et Ca qui n'est pas significatif), tous les éléments ont des coefficients de variation élevés (maximum 309 %

pour Cr) ou au moins moyens (minimum 80 % pour Eu). Ceci traduit principalement la grande variabilité de la nature et de l'abondance des minéraux présents à côté du quartz, et cache en partie les tendances anormales des éléments autres que ceux pour lesquels ont été détectés des anomalies franches.

Dans les brèches enfin, les trois échantillons ne permettent pas de calculer des coefficients de variation significatifs.

4 - Tendances géochimiques.

De cette présentation des compositions chimiques des roches primaires d'extension régionale, les tendances suivantes peuvent être retenues.

1) L'ensemble des faciès, brèches mises à part, montre un chimisme globalement banal, avec un déficit en Ca et Sr et un excès de K dans les roches silico-alumineuses (schistes et micaschistes).

2) Des anomalies, relativement en petits nombres, apparaissent pour des éléments variés, avec des teneurs parfois fortes:

- dans les schistes, Ba, Zn et des terres rares légères (La, Ce, Eu);

- dans les micaschistes, Ba et Zn;

- dans les quartzites ferrugineux, seulement Cu;

- dans les quartzites, des éléments de la famille de transition du fer (Mn, Ni, Co, Cr,

Cu);

- dans les brèches, des éléments divers, P, Ba, Zn, Cu, Zr, et des terres rares lourdes (Y, Yb).

3) Des tendances à quelques teneurs relativement fortes, même si elles ne représentent pas des anomalies flagrantes, apparaissent en outre pour Mn et P dans les schistes, pour Ni, Cr, Lu, Ti et surtout Zn, dans les quartzites ferrugineux.

Les éléments qui constituent les anomalies notoires des chapeaux de fer se retrouvent donc aussi en anomalie dans les encaissants: Zn, Ba, Cu, Ni, Mn, etc. Mais ces anomalies sont accidentelles et les encaissants ont des compositions dans l'ensemble banales. Seules échappent apparemment à la règle les brèches, mais le nombre d'analyses pratiquées sur celles-ci est insuffisant pour qu'on puisse généraliser.

II - Les roches à dominante non silicatée

A - Description pétrographique et minéralogique

1 - Pétrographie - minéralogie

a - Les dolomies cristallines

Sur cinq échantillons de dolomies cristallines étudiés, trois (AB-869, TOG-34A et TOG 29) ont été observés en lames minces au microscope optique et à la microsonde; trois autres (CB-20, SP-48 et TOG 29), ont été analysés par les méthodes chimiques et par diffraction des RX.

Ce sont des roches massives, de couleur grise ou blanche et de texture granoblastique. Le fond de la lame est constitué de carbonates le plus souvent à grains fins (30 à 50 μm), parfois à grains grossiers de plus de 100 μm (AB-869). Des minéraux phylliteux (muscovite et chlorite), se présentant soit en paillettes fines dispersées, soit constituant des niveaux bien individualisés, ont été observés en abondance variable dans les échantillons. Le quartz se présente en grains isolés de taille variant de 160 μm à 450 μm .

Des minéraux opaques de formes variables (prismatiques ou en plages très contournées) et à très faible pouvoir réflecteur ont été également rencontrés dans ces échantillons. L'analyse à la microsonde électronique (tableau XIX), a montré qu'il s'agit d'oxydes de fer, et la forme du minéral ajoutée à cette observation suggèrent que ce sont des pyrites gœthitisées. Des grains de rutile souvent associés aux niveaux micacés ont été vus dans un échantillon. Enfin, un peu de calcite a été mise en évidence par les analyses à la microsonde électronique.

La diffraction des rayons X permet de compléter les observations pétrographiques: les carbonates sont de la dolomite (tableau XVIII), des micas, et un feldspath a été détecté dans CB 20.

b - Les calcschistes

Les calcschistes présentent une structure feuilletée et une texture à dominance granoblastique. Les principaux constituants sont des carbonates (dolomite ou calcite), des micas, des chlorites, des feldspaths, des quartz, des minéraux opaques; de nombreux minéraux accessoires y ont été rencontrés: biotite, gœthite, tourmaline, sphène, rutile, et apatite, le plus souvent associés aux micas.

Les carbonates sont abondants et font environ deux tiers de la surface des lames. Ils ont une tendance automorphe et forment des niveaux disposés parallèlement à l'orientation des micas. Ils sont hétérogranulaires avec une taille variant de 80 µm à 1 mm. Ils présentent parfois des débuts d'altération marqués par la précipitation d'hydroxydes de fer dans les plans de clivage et aux limites des grains.

Les micas sont de la muscovite en paillettes orientées soulignant la schistosité ou formant des amas ayant l'apparence d'éléments de schistes. La chlorite, qui semble épigéniser une biotite, constitue parfois des niveaux entiers ayant la même orientation que la schistosité. Les feldspaths sont gros. Leur taille varie de 500 µm à 1 mm. Ils sont très souvent altérés et envahis de petits micas. Les quartz sont rares et ont une taille comprise entre 100 et 400 µm. Les minéraux opaques rencontrés sont de la pyrite oxydée. De la gœthite a été observée dans les clivages des carbonates, des micas et des minéraux opaques. Les rayons X ont permis de confirmer ces minéraux en précisant la présence de calcite (éch. TOG 34, 91, 92, 102).

Des échantillons de carbonates provenant de sondages étudiés par Godonou (1984), se révèlent être impurs avec à côté de la dolomite, une proportion importante de quartz, de muscovite et un peu d'opacés (1-2 %) tels que produits titanés, ilménite, gœthite, pyrite et pyrrhotine.

Tableau XVIII - Constitution minéralogique des échantillons de dolomies cristallines, de calcschistes et d'hématite massive (diffractométrie RX).

Echantil.	Nature	Quartz	Muscovite	Chlorite	Dolomite	Calcite	Plumbog.	Goethite	Hématite	Divers
SP-48	Dolomies cristal.	P			A					
CB-20	"	P	P		A					Feldspath
TOG 29	"	P	P	P	A				Tr.	
TOG 34	Calcschistes	P	P	P	A	P				
TOG 33C	"	P	P	P		A				
91	"	P	P		A	P				
92	"	Tr	P		A	P				
102	"	P	P	P	A	P				
TOG-24	Hématite						P		A	Gahnite
LA 3	"	Tr	Tr				P	Tr	A	

Légende : Plumbog. = Plumbogummite; A = Abondant; P = présent; Tr = Traces.

c - L'hématite de Lalamila

Sur les deux échantillons prélevés et étudiés en chimie et par diffraction des rayons X, un seul (TOG 24) a été regardé au microscope.

L'hématite de Lalamila est une roche massive, de couleur noire ou gris métal. Elle se présente sous forme de banc, avec une orientation identique à la schistosité générale. Elle a une texture granoblastique et est composée de plus de 95 % d'hématite, mais elle présente un intérêt particulier par ses minéraux accessoires qui sont la gahnite (spinnelle d'alumine et de zinc) et la plumbogummite (phosphates d'alumine et de plomb); quelques rares quartz ont été observés.

L'hématite se présente en gros cristaux (plus de 100 μm), imbriqués et à sections polygonales (carrées, triangulaires, rectangulaires, etc.). Aucune disposition géométrique n'a pu être définie. La gahnite apparaît sous forme de petits cristaux cubiques de 100 μm environ et de couleur rouge, dispersés dans la masse d'hématite. Dans certains cubes de gahnite s'observent de petits cristaux d'hématite. La plumbogummite apparaît en remplissage de pores de quelques dizaines de microns ménagés dans l'hématite. C'est un minéral à réfringence et biréfringence très faible qui se présente en petits cristaux aux contours difficiles à préciser et finement rayés par un système de clivages parallèles, lequel correspondant plutôt à une structure fibreuse (Bhaskara et Judson, 1964) qu'à un clivage sensu stricto. Outre les minéraux déterminés au microscope optique, la diffraction RX (tableau XVIII) a mis en évidence des traces de goëthite et de muscovite.

d - Les phospharénites

Dans le secteur étudié, une formation phosphatée a été mise en évidence par les prospections d'Uranerzbergbau signalant une occurrence phosphatée atteinte par les forages sur 60 m d'épaisseur. Elles sont constituées d'environ 80 % d'apatite et 20 % de limonite. Sur le terrain aucun affleurement frais n'est observable, mais on retrouve en surface des roches très transformées et des ferruginisations à phosphates secondaires. C'est pourquoi, nous les traiterons plus en détail dans le chapitre VII.

2 - Analyse des minéraux à la microsonde (tableau XIX).

a - Dans les dolomies cristallines et les calcschistes.

Les analyses ont porté sur des carbonates (dolomite et calcite), des silicates (muscovites et chlorites) et sur des oxy-hydroxydes et des sulfures.

Cette étude a permis de mettre en évidence la calcite, qui avait été détectée macroscopiquement à l'affleurement, mais qui n'avait pas été distinguée de la dolomite au microscope.

Les **dolomites** sont ferrifères (jusqu'à 11 % FeO environ) et les calcites sont un peu magnésiennes.

Les **muscovites** sont dans l'ensemble riches en Mg et en Fe, et présentent un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ aussi élevé que dans les schistes et micaschistes.

Les **chlorites** sont riches en Mg et en Fe; leur composition chimique les rapporte à du clinocllore.

Les **minéraux opaques** sont, sauf un, exempts de S et sont presque exclusivement ferrugineux avec cependant, des teneurs élevées en Si (jusqu'à 7 % SiO_2), Al, Ca et parfois en Mg; leur forme conduit à penser qu'il s'agit de pyrite goëthitisée. La pyrite fraîche renferme, au côté de S et de Fe, un peu de Si et Al, mais en teneurs moindres que dans les formes oxydées.

Tableau XIX - Composition chimique des principaux minéraux des roches à dominante non silicatée (résultats d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique)

a) Les carbonates, les silicates et les oxydes

Minéral	N° Echantillon	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	ZnO	BaO	PbO
1 Dolomite	TOG-34B (4)		17.43	0.18	0.42				29.17		1.45	0.06		
	AB-869 (14)		16.38	0.22	0.37				27.3		1.94	0.05		
	TOG-36 (6)	0.53	16.0	0.1	0.48				25.41		3.84	0.10		
	TOG-29 (4)		15.41	0.04	0.17				26.64		5.10	0.08		
	102 (8)		17.91	0.12	0.48				31.31		5.12	-		
2	92 (3)		15.2	0.10	0.64				25.60		5.06	-		
2 Calcite	TOG-34B (2)		1.04	0.32	0.46				49.88		0.30			
	AB-869 (2)		0.38	0.07	0.47				48.06		1.69			
	134 (6)		0.72	0.23	0.36				49.88		0.30			
2 Muscovite	TOG-34B (6)		3.45	29.15	52.09			11.18			2.94			
	TOG-36 (2)	0.61	4.56	27.87	52.13			10.20		0.56	3.24			
	102 (6)		4.52	26.14	52.73			10.90			3.18		0.42	
	134 (4)		2.0	32.27	51.27			10.12		0.35	2.40			
	92 (5)		4.43	24.81	54.14			12.20		1.22	2.51			
1 Chlorite	AB-869 (4)		35.02	22.35	35.90				0.30		5.88			
	TOG-36 (3)		25.36	17.8	47.40			3.43	0.48	0.66	9.24			
	TOG-29 (1)		28.18	22.97	32.46						15.32			
	134 (2)		15.88	23.60	28.95						30.50			
2 Sphène	TOG-36 (3)			1.86	31.36				27.45	38.85	0.47			
	TOG-29 (3)			2.74	30.30				28.20	37.93				
	102 (5)			2.89	30.92			0.53	27.30	37.00	0.53			
1 Albite	TOG-29 (2)	11.80		19.25	68.00				0.23					
	134 (2)	11.80		18.86	65.90									
2 Apatite	TOG-34B (1)					42.02			56.66					
	AB-869 (2)					42.05			56.31					
	TOG-36 (1)					43.72			55.26					
	134 (1)					43.06			56.09					
2 Rutile	TOG-34B (1)		1.51	2.26					1.68	91.94	2.0			
	134 (1)			0.39	0.92			0.15	0.23	97.50	0.36			
3 Gahnite	TOG 24 (7)			58.0							4.19	43.13		0.08
3 Plumbogumm.	TOG 24 (4)			25.71		20.0					2.30			34.40
Les oxydes de fer														
Minéral	Ech.		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	ZnO						
1 Pyrite oxydée	AB-869 (5)			0.73	0.76	0.62	96.70							
	TOG-36 (2)		1.18	2.0	7.71		85.56							
	102 (2)			0.82	5.36	0.64	88.70							
	134 (3)			0.72	6.17	0.97	90.61							
3 Hématite	TOG 24 (3)						99.77						0.25	
Les sulfures														
	Ech.	Mg	Al	Si	S	Fe	Zn							
2 Pyrite fraîche	92 (3)			0.28	0.58	48.16	43.57	0.09						

Légende: Les nombres entre parenthèses correspondent au nombre de points analysés sur le minéral dans la lame.

Plumbogumm. = Plumbogummite; pour l'hématite le fer est exprimé en Fe³⁺;

1 = Dolomie cristalline; 2 = Calcschistes; 3 = Hématite.

b - Dans l'hématite massive.

C'est la microsonde qui a permis de confirmer dans l'hématite massive la présence de gahnite et de plumbogummite.

La **gahnite** (spinelle de zinc et d'alumine) a une composition chimique moyenne voisine de 43 % pour ZnO, 58 % pour Al₂O₃ et contient un peu de fer (4 % FeO).

La **plumbogummite** (phosphate d'alumine et de plomb), renferme en moyenne 26 % de Al₂O₃, 20 % de P₂O₅, 34 % de PbO et 2 % de FeO.

L'**hématite** est presque pure avec cependant un peu de zinc. P, Zn et Pb, éléments anomaux des chapeaux de fer, se retrouvent donc ici dans l'hématite exprimés sous forme de minéraux spécifiques: Zn en gahnite, P et Pb en plumbogummite.

B - Résultats de l'analyse chimique globale

Les analyses chimiques ont porté sur un nombre réduit d'échantillons dont trois dolomies cristallines, six calcschistes et deux hématites massives. Les compositions chimiques de ces différents types de roches sont données dans le tableau XX, où sont portées les analyses séparées pour les dolomies cristallines et les hématites en raison du nombre trop petit d'échantillons et les paramètres statistiques univariés pour les calcschistes.

Les remarques suivantes peuvent être tirées sur les compositions chimiques.

- Les dolomies cristallines se révèlent riches en SiO₂ (jusqu'à 38 %) et Al₂O₃ (jusqu'à 8 %), ce qui traduit une charge importante en micas des échantillons étudiés. Par ailleurs, aucune anomalie notable n'a été remarquée sur aucun des éléments dosés ici, sauf peut-être Ba (maximum 923 ppm).

- Les calcschistes ont une composition chimique normale.

- La composition chimique de l'hématite est marquée par des teneurs manifestement élevées en P et Zn. En l'absence de données de référence, il est impossible de décider si d'autres éléments sont anomaux. Les vérifications à la microsonde ont montré que c'est la plumbogummite qui est responsable des teneurs en Al et P, la gahnite de celle en Zn et le quartz des 5 % de SiO₂ de l'échantillon LA 3.

Tableau XX - Composition chimique des roches particulières (données directes ou statistiques).

Elém.	Dolomies. (3 éch.)				Calcschistes (6 éch.)						Hématite (2 éch.)	
	CB	20 SP	48 TOG	29	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.%	Min.	Max.	TOG 24	La 3
SiO ₂	26,3 %	9,2	37,9		42,1	41,0	10,3	24	27,2	55,4	0,3%	5,3
Al ₂ O ₃	5,9	0,4	7,8		8,1	7,7	2,0	24	5,9	11,4	2,3	2,3
MgO	13,99	20,93	11,38		7,6	8,1	3,5	46	1,7	11	0,07	0,07
CaO	18,4	26,8	13,8		15,2	13,7	8	52	6,8	29,7	< 0,2	< 0,2
Fe ₂ O ₃	5,2	2,1	4,2		3,3	3,2	0,8	24	2,4	4,2	94,7	88,8
Mn ₃ O ₄	0,05	0,11	0,08		0,05	0,05	0,02	52	0,02	0,08	0,04	0,03
TiO ₂	0,35	0,04	0,46		0,39	0,36	0,08	20	0,31	0,51	0,07	0,26
Na ₂ O	< 0,05	< 0,05	0,27		< 0,05	0,19	0,19	82	0,05	0,56	< 0,05	< 0,05
K ₂ O	1,92	< 0,05	2,48		3,07	2,65	1,35	44	1,78	5,42	0,10	0,20
P ₂ O ₅	0,1	0,1	0,2		0,15	0,15	0,02	12	0,12	0,17	1,3	1,3
P1000	28,8	40,5	21,6		19,8	21,0	4,8	24	11,9	25,1	0,7	1,0
Sr	141 ppm	68	120		168 ppm	108	208	124	28	584	29 ppm	263
Ba	923	27	435		544	480	216	40	270	855	17	181
V	41	13	55		47	46	8	16	37	56	183	99
Ni	< 1	32	18		17	18	8	44	7	27	86	68
Co	10	17	20		15	14	5	32	9	22	32	29
Cr	27	8	38		42	40	10	25	33	60	40	28
Zn	39	2	59		40	42	14	34	20	59	3204	2245
Cu	24	6	6		13	12	7	56	6	25	31	30
Sc	5,9	0,5	9		7,1	6,8	1,3	18	5,8	9	2,6	2,6
Zr	63	4	93		117	86	57	49	72	197	117	123
Nb	5	< 5	8		6,1	5,7	2,2	37	3,0	9,2	12	15
Y	13	4	19		13	15	5	36	7	19	24	15
La	16	< 6	19		19	19	6	30	12	29	20	16
Ce	31	< 10	58		44	45	11	25	26	58	45	25
Eu	< 2	< 2	< 2		0,7	0,5	0,5	70	< 1	1,7	< 1	< 1
Yb	0,8	0,2	1,9		1,3	1,3	0,4	33	0,8	1,9	1,5	1,8
Lu	0,2	0,5	0,5		0,4	0,4	0,1	28	0,2	0,5	< 0,1	1,1

Légende: Moy. = Moyenne; Ec.T. = Ecart - type; C.V. = Coefficient de variation; Méd. = Médiane; Min. = Minimum; Max. = Maximum; Si à P1000 en %; Sr à Lu en ppm; P1000 = Perte à 1000 °C.

III - Conclusion.

Sur le plan minéralogique, les principaux faciès lithologiques silicatés ou non du secteur de Pagala présentent une constitution minéralogique banale caractérisée par des minéraux habituels normaux essentiellement quartz, muscovite, séricite, chlorite, albites parfois dolomite, calcite et grenats. Seule l'hématite massive de Lalamila renferme des minéraux très particuliers, plumbogummite et gahnite, deux minéraux accessoires.

Sur le plan métamorphique, les minéraux symptomatiques sont rares. Toutefois, l'apparition progressive d'Ouest en Est à côté de la séricite, de la muscovite et de la chlorite, d'albites et de grenats notée dans les faciès étudiés témoigne d'un accroissement du métamorphisme dans le même sens; cependant le degré de métamorphisme ne dépasse pas celui des schistes verts. De plus, la relative richesse en silice caractérisée par un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ élevé constitue un argument en faveur d'un métamorphisme de faible degré.

D'Ouest en Est, on note une évolution quoique moins nette sur le plan microtectonique. En effet dans les faciès plus à l'Ouest (quartzoschistes), deux phases de déformations ont été observées, puis en passant vers l'Est apparaît une troisième phase surimposée aux deux premières et souvent marquée par des crénulations ou des plis en chevrons.

Ces roches présentent des compositions banales avec cependant des anomalies peu fréquentes portant sur une palette d'éléments étendue avec quelques différences d'un faciès à l'autre et d'un minéral à l'autre:

- dans les schistes, anomalies en Zn, Ba et en terres rares légères;
- dans les quartzites, anomalies en éléments de transition (Mn, Ni, Co, Cr, Cu);
- dans les brèches, anomalies en P, Ba, Cu, Zr et terres rares lourdes;
- dans l'hématite isolée, fortes anomalies en P, Zn et Pb.

Par ailleurs les principales anomalies mesurées à la microsonde ont été rencontrées dans des minéraux accessoires: Zn, Pb, Cu, Ni dans des pyrites fraîches ou oxydées; Zn également dans l'ilménite et Ni dans des chlorites; Mn dans les carbonates; seul Ba présente ses anomalies les plus importantes dans un minéral abondant, la muscovite.

Enfin, ces anomalies ne semblent pas avoir d'expressions minéralogiques spécifiques, mais paraissent correspondre au contraire à des substitutions dans les minéraux qui les portent. Une seule exception est celle de l'hématite de Lalamila où P, Zn et Pb forment des minéraux spécifiques.

Les roches primaires, vu le caractère accidentel de leurs anomalies en Zn, Ba, Cu, Ni, Mn etc, ne peuvent pas être considérées comme des sources directes possibles pour les anomalies des chapeaux de fer. L'hématite, avec ses minéraux anomaux, pourrait constituer l'une des sources de ces anomalies. Cependant, elle a été trouvée sur un seul site où aucun chapeau de fer n'a été observé et constitue un cas unique en son genre, ce qui rend cette hypothèse très peu probable.



Chapitre VI

LES ALTERATIONS ARGILEUSES BLANCHES

I - Géométrie des altérations blanches

Sur un seul site, les schistes micacés montrent une altération particulière en argiles blanches et cohérentes. Ces altérations argileuses blanches s'étendant sur quelques dizaines de mètres, ont été rencontrées dans environ une dizaine de puits de prospection, et sont souvent intercalées entre les schistes et les ferruginisations secondaires. La coupe synthétique rend compte de l'agencement spatial de ces divers faciès (fig. 16).

La première constatation faite est la zonation latérale dans la répartition des faciès. En effet d'Ouest en Est, se voit la succession suivante: schistes micacés - ferruginisations secondaires (CF) - argiles blanches massives - schistes micacés , etc.

- Les schistes micacés sont altérés à différents degrés, puisque dans un même profil sont rencontrés des schistes relativement sains à pendage fort (60 à 70°E), des schistes altérés d'aspect friable vidés de nombreux éléments et enfin des altérites de couleur ocre à rouge constituées d'argiles rubanées et renfermant de petits quartz hyalins ainsi que des restes de roches variées (schistes noirs, quartzites..) formant ainsi la zone saprolitique.

- Les ferruginisations secondaires riches en goethite massive et d'extension pluridécimétriques (30 à 70 m), se présentent dans les puits sous forme de blocs indurés de diamètre allant de 20 à 40 cm et plus), enrobés dans un ciment argileux rouge. Ces blocs se rencontrent aussi sous forme d'éboulis dans les puits en bas de pente.

- Les argiles blanches bien exprimées sont réparties en zones d'environ 30 m en contact avec la ferruginisation secondaires. Ces argiles blanches essentiellement constituées de métahalloysite et de kaolinite sont en petits blocs décimétriques enveloppés dans une trame argileuse de couleur rouge à rouge brun. La cassure de ces blocs montre des couleurs claires principalement blanche, parfois ocre ou beige.

La présence d'un tel matériau (argiles blanches) dans un contexte géologique et climatique où l'altération météorique des schistes (faciès dominant) conduit à des altérites argileuses de couleur rouge latérite, permet d'affirmer que le mécanisme ayant présidé à leur genèse n'est pas météorique. Quoique moins nette, il existe un contact plus ou moins direct entre les argiles blanches et les corps ferrugineux, lesquels elles semblent envelopper.

II - Les échantillons présentant les altérations argileuses blanches

A - Description macroscopique (tableau XXI)

Les échantillons récoltés et analysés sont de petits blocs massifs et cohérents provenant des puits. Ils ont une taille allant le plus souvent de 1 à 10 cm, parfois plus. Ils sont revêtus d'une mince couche d'altérite argileuse de couleur brune, d'où leur couleur

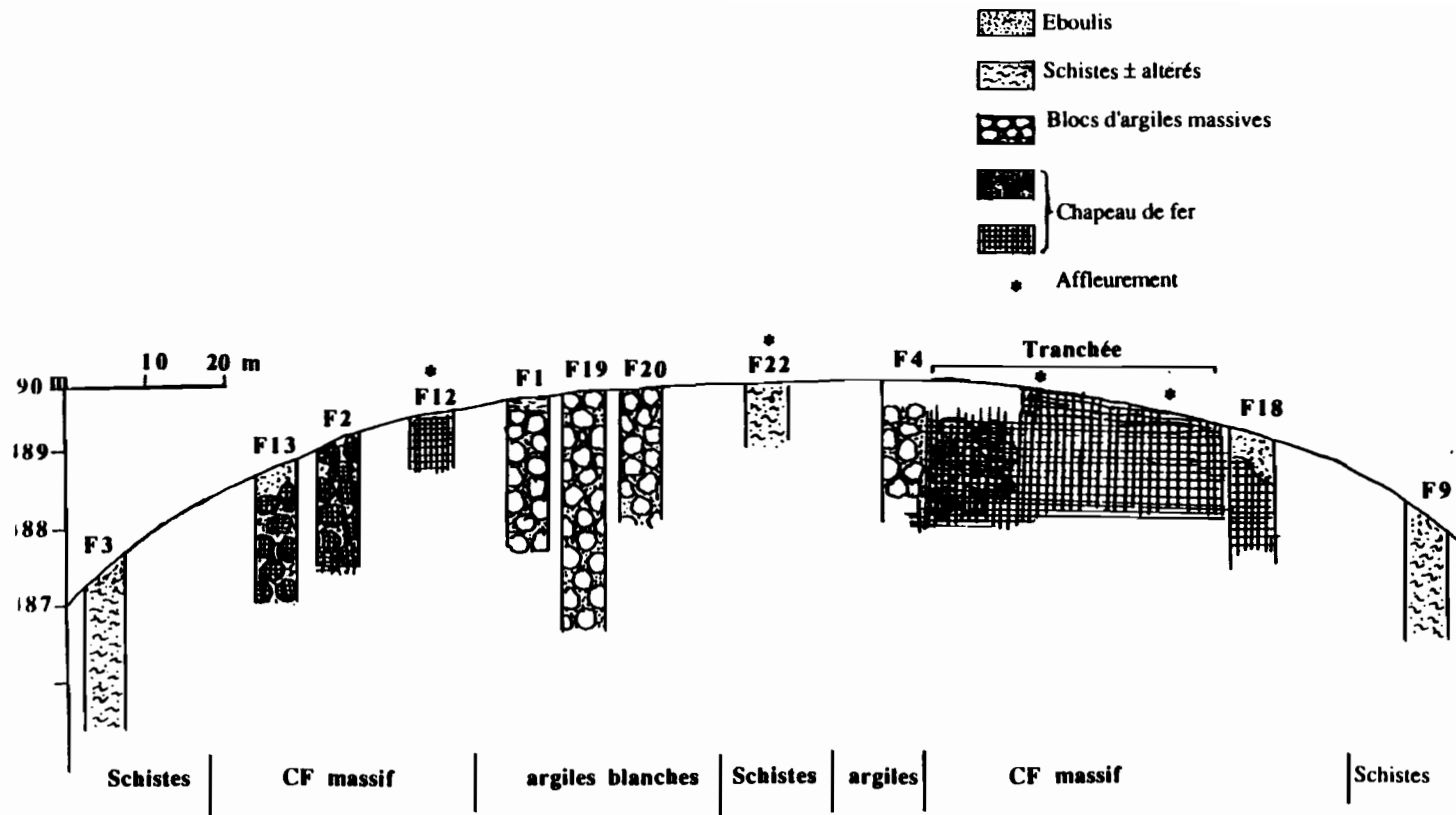


Figure 16 - Coupe schématique W-E de la colline d'Opoblé.

externe brune ou rouge latérite. A la cassure, ils montrent différentes couleurs très claires: blanc, blanc porcelané, rosé, beige, gris, etc... Une description par échantillon est donnée dans le tableau XXI où sont également portées les différentes analyses effectuées. La cassure est fréquemment conchoïdale donnant un aspect de porcelaine. Elle peut être rugueuse pour les échantillons les plus durs.

Tableau XXI - Descriptions des échantillons d'altérations argileuses blanches et différentes analyses réalisées sur chacun d'eux.

N° échantillon	Description macroscopique	RX	Chimie	ATP /ATD	MET	MEB
F1-1	- Aspect de porcelaine blanche à rares enduits ocre-rouille.	+	+	+		
F1-2a	- Aspect de porcelaine de couleur gris / beige, pigmentée de manière régulière par de minuscules points rougeâtres.	+	*	+		
-2b	- Même aspect, mais avec en plus des plages blanches porcelanées au cœur violet.	+		+		
F1-4a	- Ensemble blanc crème porcelané présentant des mouchetures blanches sur les contours et des taches noires en placage dans les fissures; présence de muscovites dans la masse.	+	*	+		+
-4b	- Ensemble blanc d'aspect rugueux à porcelané, avec des enclaves ou des golfes beige-ocre; présence de muscovites.	+		+		
F4-395	- Masse blanche montrant des joints et une patine argileuse brune.	+	+			
F4-570	- Masse blanche avec enduits bruns ou jaune pâle; granules ferrugineux en bordures et un peu dans la masse; débit en petits parallélépipèdes.	+	+			
7-3	- Couleur d'ensemble rosée non uniforme, avec taches blanches / ocre clair / rosées plus ou moins foncées.	+	+	+		
F7-4	- Aspect moucheté, blanc / ocre clair	+	+	+	+	+
F7-5a	- Ensemble ocre clair / beige, aspect lité; présence de mouchetures très fines plus foncées; les plages blanches semblent anastomosées.	+	*	+		+
-5b	- Ensemble ocre clair d'aspect morcellé; petits quartz.	+		+		
F7-6a	- Couleur ocre clair d'ensemble à petites plages blanc porcelané, bordées de lisérés plus foncés ocre; présence de quelques golfes rouille; rares placages rouille.	+	*	+		
-6b	- Couleur blanc crème porcelané, avec de rares ponctuations rouille ou noires organisées.	+		+		
F7-7	- Couleur ocre clair / beige rosé; disposition en lits (aspect varvé); parfois allure porcelanée.	+	+	+		
F17-2 (a et b)	- Couleur gris / blanc; aspect massif, compact.	+	*	+		
F17-3	- Couleur blanc porcelané.	+	+			
F21-2	- Aspect de porcelaine blanc crème à rares enduits noirs.	+	+	+		+

(* analyses faites sans distinction des deux termes).

Note : Les échantillons d'altérations argileuses blanches provenant du chapeau de fer n° 3, ont tous un numéro commençant par CF3 (exemple : CF3 F1-1). Pour alléger le texte et les tableaux, on omettra le CF3 dans les numéros d'échantillons cités dans le présent chapitre.

A la loupe binoculaire, ils ont un aspect poreux. Sur les cassures fraîches, s'observent de petits granules d'oxydes de fer, de fines paillettes de muscovites, quelques quartz. Très souvent, ces granules d'oxydes s'agrègent, formant des nodules ou des placages de couleur noire. Ces nodules ou ces plaques oxydés sont rencontrés dans les pores et dans les microfissures. Parfois les oxydes de fer sont sous forme d'imprégnations diffuses dans la masse kaolinique, lui conférant une couleur rosée. Ces blocs sont le plus souvent isotropes mais aussi peuvent présenter des orientations avec une alternance de couches très fines de diverses couleurs donnant une apparence varvée.

B - Description minéralogique

Plusieurs techniques d'études ont été utilisées: diffraction des rayons X, analyses thermodifférentielles et thermopondérales, analyses par spectroscopie infra-rouge, microscopie électronique à transmission (MET) et à balayage (MEB).

1 - Par diffraction des rayons X

Les tableaux XXII et XXIII résument respectivement la constitution minéralogique de ces matériaux et les diverses raies mesurées. Trois types de matériaux ont été ainsi mis en évidence.

Tableau XXII - Déterminations minéralogiques par diffraction des rayons X.

N° échantillon	Argiles (kaolinite-halloysite)	Gibbsite	Gorcéixite	Quartz
F1-1	+++			
F1-2a	+++			
-2b	+++			
F1-4a	+++			
-4b	+++			
F4-395	+++			
F4-570	+++			
F7-3	+++			
F7-4	++		+	
7-5a	++		+	
-5b	++		+	
F7-6a	++		+	
-6b	+++			
F7-7	+++			
F17-2a	+	++		tr.
-2b	+	++		tr.
F17-3	+++			
F21-2	++		+	

(+++ = abondant; ++ = moyen; + = peu; tr. = traces)

Les faciès les plus massifs, porcelanés quelle que soit la couleur, sont constitués quasi uniquement d'argiles 1 / 1: - kaolinite avec raie principale à 3,57 Å; - métahalloysite avec raie principale à 4,44 Å et absence de diffraction à 10 Å. Les faciès plus pulvérulents de couleur ocre, souvent lités, sont un mélange de minéraux argileux (les même que précédemment) et phosphatés (fig. 17a). Le minéral phosphaté est la gorcéixite (phosphate d'aluminium et de baryum) avec les raies principales à 2,99 Å et 5,73 Å. Enfin les faciès durs, blancs à gris clair (deux échantillons), sont essentiellement constitués de gibbsite à laquelle sont associés en abondance subordonnée les minéraux argileux décrits précédemment et aussi des traces de quartz (fig. 17b).

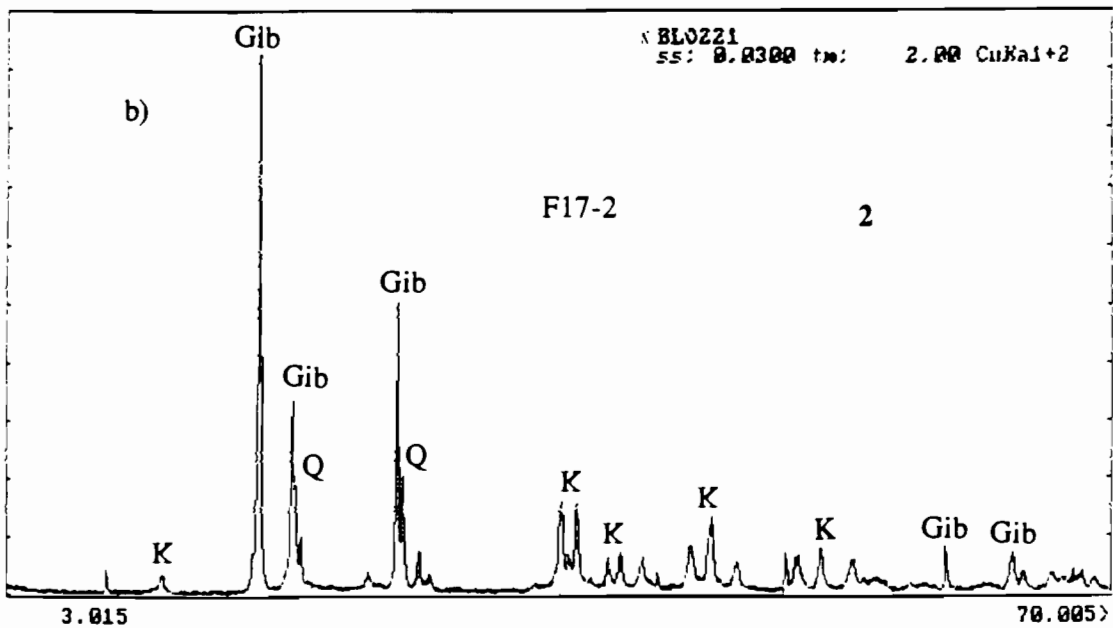
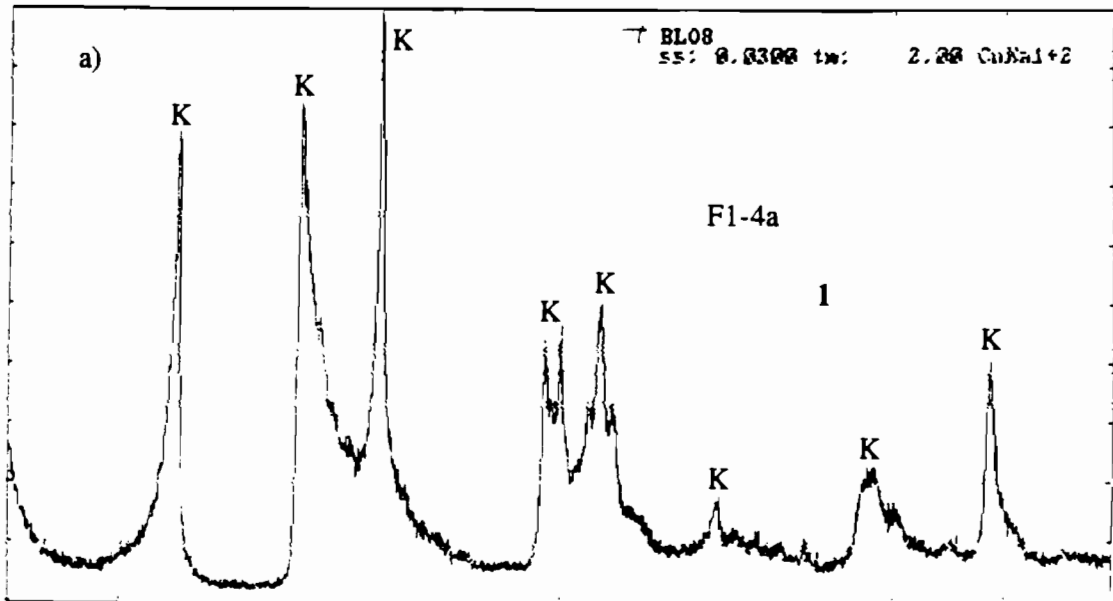


Figure 17 - Diffractogrammes RX obtenus sur deux échantillons à kaolinite pure (1) et à gibbsite (2). K: kaolinite; Gib: gibbsite; Q: quartz.

Tableau XXIII - Diffraction R. X; raies mesurées dans les échantillons à mélange d'argiles et de gorceixite

CF3 F7-5b		CF3 F21-2		CF3 F7-6a		CF3 F1-4b	
d	i	d	i	d	i	d	i
7,21	33	7,17	48	7,16	59	7,15	80
5,72	67	5,71	16	5,73	36		
		4,95	32	4,96	13		
4,44	49	4,45	39	4,44	100	4,43	85
		4,36	35	4,37	78	4,37	71
4,12	45			4,16	71	4,18	48
3,57	38	3,57	57	3,58	72	3,57	100
3,51	75	3,49	37	3,51	64		
						3,37	20
2,99	100	2,98	100	2,99	72		
2,86	19	2,88	11	2,87	19		
2,56	33	2,56	24	2,57	45		
				2,56	52	2,56	45
2,49	37	2,50	26	2,48	49	2,49	47
		2,47	16			2,47	27
2,42	39	2,38	17	2,42	58	2,38	34
2,34	30	2,34	33	2,33	45	2,34	51
		2,33	27			2,3	34
2,28	44	2,29	37	2,28	45		
2,22	43	2,21	16	2,22	35		
2,03	18			2,03	21		
		1,99	11	1,99	21	1,98	18
1,91	38	1,90	34	1,91	28		
				1,90	24		
		1,78	6	1,79	15	1,79	12
1,76	26	1,75	21	1,76	20		
1,75	20			1,75	20		
		1,65	14				
	1,62	9					
1,51	12	1,50	14				
1,49	25	1,49	30	1,49	51	1,49	41
1,48	24			1,48	44		
		1,43	7				
1,39	15						

2 - Par analyses thermodifférentielles et thermopondérales

Les résultats d'ATD / ATP obtenus sur ces échantillons sont donnés dans le tableau XXIV et illustrés par des courbes thermodifférentielles et thermogravimétriques (figure 18).

Des difficultés d'interprétation apparaissent dues au fait que le pic endothermique de la gorceixite qui est sensiblement confondu avec celui de l'halloysite ou de la kaolinite. De même, le domaine de la perte de poids de la gorceixite recouvre celui des hydroxydes métalliques et des minéraux argileux (kaolinite). Ces caractéristiques rendent délicat le dosage précis des minéraux en présence. Les résultats des analyses thermiques permettent cependant de tirer les renseignements suivants.

Cas des échantillons à dominante argileuse

A des températures de l'ordre de 100 °C, l'ATP se marque par une perte comprise entre 1,1 et 3,7 % correspondant à un pic endothermique plus ou moins marqué en ATD. Cette perte de poids traduit l'eau moléculaire liée aux argiles 1 / 1. Il s'agit bien d'un minéral hydraté de type métahalloysite.

Tableau XXIV - Interprétations des mesures d'analyses thermodifférentielles et thermopondérales pratiquées sur les échantillons des faciès argileux massifs.

N° échantillon	ATD (1)		DTP (2)	ATP (3)
	a (°C)	b (°C)	c (°C)	(%)
CF3 F1-1	80 530	970	75 150 510	H ₂ O moléculaire 20 - 110 °C: 2,7 % OH hydroxyde 110 - 325: 1,4 OH argile 325 - 605: 13,1 605 - 1000: 0,7 PFT = 17,9
CF3 F1-2a	95 325 530	980	65 150 330? 520	H ₂ O moléculaire 20 - 120: 2,7 OH hydroxyde 120 - 330: 1,7 OH argile 330 - 615: 13,5 615 - 1000: 0,9 PFT = 17,2
CF3 F1-2b	100 325 530	970	75 ? 510	H ₂ O moléculaire 20 - 135: 2,7 OH hydroxyde 135 - 350: 1,3 OH argile 350 - 630: 12,5 630 - 1000: 0,6 PFT = 17,1
CF3 F1-4a	<100 535	980	<100 520	H ₂ O moléculaire 20 - 300: 2,4 OH argile 300 - 640: 12,4 640 - 1000: 0,7 PFT = 15,5
CF3 F1-4b	<100 530	980	<100 510	H ₂ O moléculaire 20 - 290: 3,3 OH argile 290 - 650: 12,85 650 - 1000: 0,85 PFT = 17,2
CF3 F7-3	100 325 525	970	75 320 510	H ₂ O moléculaire 20 - 165: 3,1 OH hydroxyde 165 - 395: 2,1 OH argile 395 - 630: 11,3 630 - 1000: 0,5 PFT = 17
CF3 F7-4	95 310 530	970	70 300 510	H ₂ O moléculaire 20 - 120: 3,0 OH hydroxyde 120 - 390: 2,0 OH argile 390 - 630: 12,4 630 - 1000: 0,5 PFT = 17,9
CF3 F7-5a	80 300 530	990	75 305 515	H ₂ O moléculaire 20 - 170: 2,7 OH hydroxyde 170 - 400: 1,5 OH argile 400 - 650: 12,4 650 - 1000: 0,9 PFT = 16,8
CF3 F7-5b	90 310 525 ?	980	70 320 520 700	H ₂ O moléculaire 20 - 160: 3,2 OH hydroxyde 160 - 405: 3,2 OH argile 405 - 640: 9,85 640 - 1000: 1,35 PFT = 17,6
CF3 F7-6a	100 305 535	980	70 300 505	H ₂ O moléculaire 20 - 160: 3,7 OH hydroxyde 160 - 390: 2,1 OH argile 390 - 610: 10,9 610 - 1000: 1,4 PFT = 118,1
CF3 F7-6b	540	975	510	H ₂ O moléculaire 20 - 165: 1,1 OH argile 165 - 630: 13,5 630 - 1000: 0,4 PFT = 115
CF3 F7-7	100 ? 520	970	65 305 510	H ₂ O moléculaire 20 - 130: 2,9 OH hydroxyde 130 - 390: 1,7 OH argile 390 - 590: 12,2 590 - 1000: 1,1 PFT = 17,9
CF3 F17-3	<100 530	980	<100 510	H ₂ O moléculaire 20 - 300: 2,7 OH argile 300 - 660: 13,6 660 - 1000: 1,1 PFT = 16,6
CF3 F21-2	96 534 796 ?	980	100 520 750 865	H ₂ O moléculaire 20 - 305: 1,9 OH argile 305 - 610: 13,5 610 - 1000: 6,2 PFT = 21,6
CF3 F17-2a	70 315 515 860		? 300 510 880	H ₂ O moléculaire 20 - 160: 2,2 OH hydroxyde 160 - 400: 23,1 OH argile 400 - 690: 3,7 690 - 1000: 2,0 PFT = 31
CF3 F17-2b	90 315 430 505 800		? 305 385 510 ?	H ₂ O moléculaire 20 - 200: 1,9 OH hydroxyde 200 - 350: 25,6 350 - 450: 3,4 OH argile 450 - 805: 3,5 805 - 1000: 1,1 PFT = 35,5
Goethite (4)	485	783	485	200 - 650: 12,2
Goethite (6)	340		315	200 - 400: 10,1
Gibbsite (5)	300-350			données non fournies
Kaolinite (5)	570	965		-
Halloysite (5)	120			-
Muscovite (5)	530	910	?	-
Muscovite (5)	800-900		?	-

Légende:

- 1) ATD: a) effet endothermique (départ de l'eau libre et / ou des OH);
- b) effet exothermique (phénomène d'oxydation ou de cristallisation).
- 2) DTP: Dérivée thermogravimétrique.
- 3) ATP: Perte en poids (exprimée en pourcent).
- 4) Goethite de Pagals (coll. Biot).
- 5) Valeurs d'après Robert (1977).
- 6) Goethite du Sénégal (coll. Biot).
- 7) PFT = Perte au feu totale

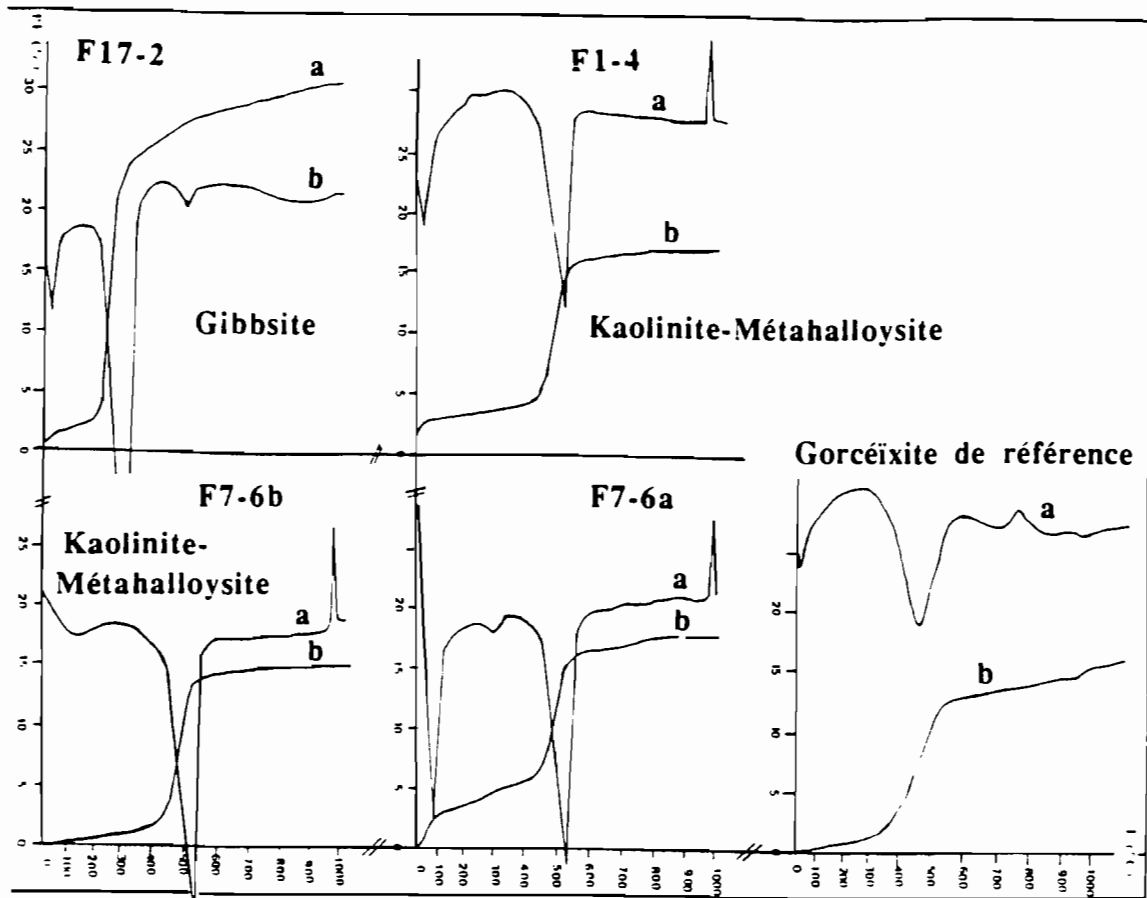


Figure 18 - Courbes d'analyses thermiques sur quatre échantillons du faciès argileux massif et un échantillon de gorcéixite. a) courbe ATD; b) courbe ATP

Pour des températures de l'ordre de 300 °C, la perte des OH se traduit par des pertes de poids en ATP entre 1 et 3 % et un pic endothermique faible en ATD. Ce phénomène est lié à l'existence ponctuelle d'hydroxydes de fer de type gœthite.

Vers 500 °C, se produit le phénomène principal dans l'analyse de ce type de matériau. Une forte perte de poids correspondant au départ des OH constitutifs des argiles, se traduit par une perte de 10 à 13,5 % en ATP et par un large pic endothermique bien marqué en ATD (505-540 °C). Cette déshydroxylation est tout à fait typique des minéraux argileux 1 / 1. Couplée à l'existence d'eau moléculaire, cette perte permet de considérer que l'essentiel des minéraux 1 / 1 sont des métahallosites.

- Dans un cas, une perte au feu de 6 % environ, enregistrée à une température supérieure à 600 °C, apparaît liée à la déshydroxylation d'un mica (F21-2). Cette transformation du mica est soulignée par un pic endothermique d'intensité faible aux environs de 800 °C. Il s'agit d'une muscovite.

- En ATD, s'observe souvent un pic exothermique entre 970 et 990 °C; il traduit la transformation de l'argile 1 / 1 en mullite. Cette transformation de phase n'affecte pas l'ATP.

- Enfin en ATD, deux échantillons (F7-5a et F17-2b) présentent de faibles pics exothermiques respectivement à 250 °C et 420 °C qui ne sont pas pour le moment interprétés.

Les hydroxydes métalliques sont très rares et influencent exceptionnellement les analyses thermiques. Dans un échantillon, un mica hydraté a été aussi mis en évidence.

Par cette technique, la gorcéixite qui est quelques fois très bien mise en évidence aux RX, ne présente pas de réactions typiques en analyses thermiques dans des mélanges. Ceci est probablement dû au recouvrement des domaines thermiques avec ceux de la métahalloysite, il y a probablement une certaine surestimation de l'importance des valeurs des pertes des OH attribuées aux argiles.

En résumé, il n'en reste pas moins que les minéraux les plus importants sont des argiles 1 / 1 qui sont des métahalloysites extrêmement pures.

Cas des échantillons gibbsitiques

En ATP, les effets thermiques se traduisent par une très forte perte de poids de l'ordre de 25 % qui marque le départ des OH fixés sur l'aluminium (hydroxydes). D'autre part, une seconde perte mais moins importante rend compte de la déshydroxylation des argiles.

En ATD, la déhydroxylation de la gibbsite se traduit par un très large pic endothermique à 315 °C, alors que le départ des OH des argiles est souligné par un pic endothermique de faible intensité aux environs de 515 °C. La gibbsite est ainsi confirmée et constitue le minéral le plus abondant auquel sont associés de façon subordonnée des minéraux argileux de type kaolinite-métahalloysite.

3 - Par spectroscopie infra-rouge

La spectroscopie IR a été utilisée ici pour préciser les associations minérales dans cinq échantillons dont quatre kaoliniques et un gibbsitique.

Les résultats

Pour les échantillons argileux, les spectres obtenus (figure 19) présentent dans l'ensemble la même allure avec cependant des différences entre les fréquences des bandes de vibration (tableau XXV). C'est ainsi que les diverses fréquences mesurées sont les suivantes:

- les échantillons F17-3 et F7-7 présentent deux bandes de vibration de valence des OH dans les hautes fréquences à 3680 et 3620 cm^{-1} , et sept bandes de basses fréquences correspondant aux vibrations de déformation des OH et du réseau;
- les échantillons F1-4 et F7-5 ont des spectres caractérisés par quatre bandes de vibration de valence des OH dans les hautes fréquences et sept bandes dans les basses fréquences.

L'échantillon à gibbsite (F17-2) donne un spectre marqué (figure 19) par deux bandes de vibration de valence des OH vers les fréquences élevées à 3600 et 3430 cm^{-1} et six autres vers les basses fréquences.

Interprétations

En comparant les fréquences des bandes de vibration enregistrées dans nos échantillons avec celles des minéraux de références (Van Der Marcel et Bentelpacher, 1976), les enseignements suivants peuvent être tirés.

Cas des échantillons argileux

- La présence des deux bandes de vibration à des fréquences élevées (3700 et 3640; 3680 et 3620 cm^{-1}) et de sept autres de basses fréquences, toutes identiques ou proches de celles de la kaolinite et de l'halloysite de référence, permet de dire que nous sommes en présence d'un mélange de deux minéraux kaolinite-halloysite. L'allure évasée des bandes de déformation entre 1100 et 990 cm^{-1} pousse à suggérer la présence de quartz associé.
- La fréquence de 3160 cm^{-1} enregistrée sur un seul spectre correspond à la bande de vibration de valence des OH de la goéthite.

Tableau XXV - Mesures des bandes de vibration des OH dans les échantillons des altérations argileuses blanches

Echantillon	Bande de vibration de valence des OH de l'eau	C-H	OH	C-O	Bandes des vibrations de déformations des OH + vibrations d'élongation de réseau Fe-O, Si-O, Al-O etc.										
CF3 F17-3	3680 3620	2930 2330	1630	1400	1100-990	900	780	745	680	540					
CF3 F7-7	3680 3620	2940 2320	1630	1400	1100-990	910	785	745	685	510					
CF3 F1-4	3700 3640 3460 3020	2940 2350	1640	1390	1100-1000	910	790	750	690	540					
CF3 F7-5	3680 3620 3500 3160	2930 2320	1640	1400	1100-990	905	790	750	680	550	450				
CF3 F17-2	3600 3430	2820 2320	1630	1380		1010	900	780	730	600	580				
Kaolinite	3694 3652 3621				1100 1031 1008	913	793	753	694	539	471	431			
Halloysite	3995 3623				1094 1033 1012	913	796	753	692	540	471	431			
Goethite		3140-3100			1115	900-880	798	673	496	477	461	428			
Quartz					1172 1082		798	778	693	512	478	460			
Bayerite	3660 3548 3520 3462				1020 971 764	660	620	557	530	519	479	460			

Légende: dans la case à double trait figurent les fréquences des minéraux de références d'après Marel et Bentelpacher (1976).

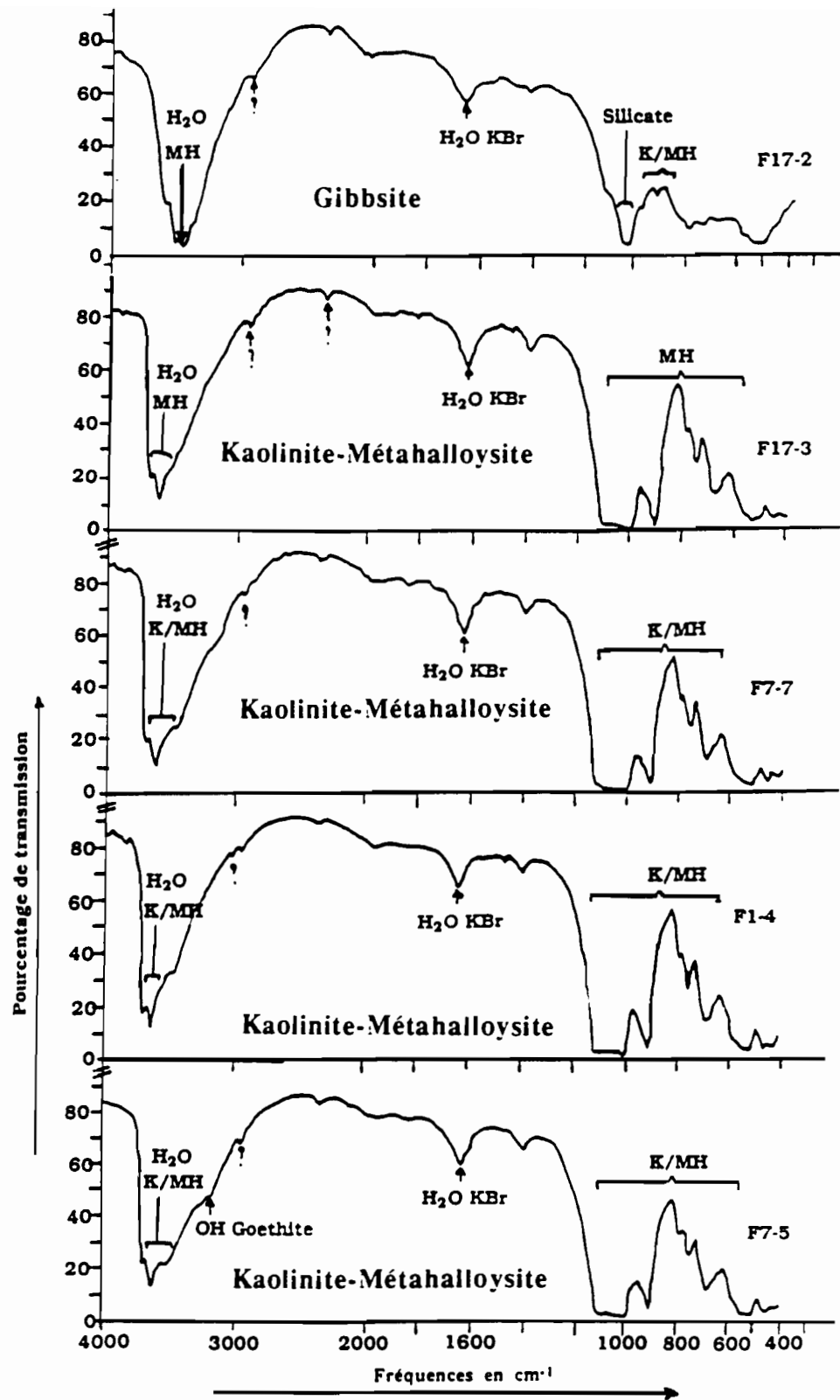


Figure 19 - Spectres IR obtenus sur cinq échantillons du faciès argileux massif.
 (K/MH = Kaolinite/Métahalloysite; MH = Métahalloysite)

- Les autres bandes de fréquences élevées (3500, 3460 et 3020 cm^{-1}) restent pour le moment non interprétées.

Cas de l'échantillon contenant de la gibbsite

Les deux bandes de hautes fréquences (3600 et 3430 cm^{-1}) correspondent bien au domaine des bandes de vibration de valence des OH des hydroxydes alumineux. En indexant les bandes de 900 cm^{-1} et 780 cm^{-1} respectivement à l'halloysite et au quartz, les autres bandes pourraient correspondre à celles de la gibbsite.

4 - Par microscopies électroniques à balayage (MEB) et à transmission (MET)

L'observation au MEB a permis de constater que les minéraux argileux se présentent en baguettes allongées qui se révèlent être des tubes au MET (photo). A côté des tubes, a été également mise en évidence au MET une autre forme en nodules ou feuillets mal différenciés. Les tubes sont fins et très longs et ont une longueur de quelques microns. Les nodules ou feuillets ont un aspect globuleux et ont un diamètre inférieur au micron.

Des morphologies en tubes et en feuillets observées dans les produits d'altération hydrothermale de verres volcaniques et de feldspaths de granites ont été interprétées respectivement comme des halloysites et des kaolinites (Nagasawa et Miyazaki, 1975). Ces auteurs signalent par ailleurs que, de façon plus générale, les halloysites provenant de l'altération hydrothermale ont une morphologie très variable allant des tubes à des billes ou nodules irréguliers. Dans nos matériaux ont été observées des formes semblables en tubes et en feuillets qui ont été reconnues comme des métahalloysites et des kaolinites. On pourrait donc envisager une origine hydrothermale pour ces minéraux.

Dans l'échantillon gibbsitique, des minéraux oxydés de fer ont été mis en évidence au MEB. Ils se présentent sous forme de rosettes, de sphères ou de baguettes. D'autre part, des grains de quartz confirmés à la microsonde ont été observés dans cet échantillon.

III - Composition chimique

En complément des descriptions minéralogiques des faciès d'altérations argileuses blanches, une caractérisation géochimique basée sur l'analyse chimique globale multi-élémentaire a été faite. Treize échantillons de faciès argileux et un de gibbsite ont été analysés (tableau XXVI). Ces échantillons ont des compositions en majeurs très voisines, excepté l'échantillon gibbsitique. Mais ils diffèrent beaucoup en diverses traces et en particulier en T. R. C'est pourquoi sont reprises ici les analyses complètes plutôt que des données statistiques qui ne rendent pas bien compte de cette hétérogénéité.

A - Les faciès d'altérations argileuses blanches (SIAL)

Les compositions chimiques en éléments majeurs correspondent bien à la kaolinite, avec Si et Al très largement dominants. Le rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ dépasse rarement de façon significative la valeur de 1,18 de la kaolinite théorique (le rapport de 1,42 dans l'échantillon F4-570 traduit probablement la présence de quartz), mais il montre au contraire un excès fréquent d'Al, en particulier dans les échantillons où la gorcéixite a été détectée, même si, comme dans F21-2, P est peu abondant alors que le rapport est de 1,01. Dans ce dernier cas, l'excès d'Al correspond donc probablement à la gibbsite, bien que celle-ci n'ait pas été détectée.

A côté de Si et Al apparaissent des teneurs relativement élevées en Fe (jusqu'à 8,7 % Fe_2O_3) imputables à des hydroxydes, une teneur suprenante en K (1,14 % K_2O)

Tableau XXVI - Composition chimique des échantillons des altérations argileuses blanches.

	Echantillons a Kaolinite seule							Ech. a Gorceixite				Ech. a Gibbsite	
	F1-1	F1-2	F1-4	F4-395	F4-570	F7-3	F7-7	F17-3	F7-4	F7-5	F7-6	F21-2	F17-2
SiO2 (%)	45.8	45.2	46.5	46.4	47.9	40.5	42.0	43.9	41.9	37.5	44.1	38.4	18.4
Al2O3	38.5	37.4	38.9	38.6	33.7	36.1	37.1	37.2	37.1	36.0	37.4	37.7	50.0
MgO	0.07	0.05	0.08	0.05	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.06
CaO	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Fe2O3	0.4	2.5	0.2	0.4	4.2	8.7	4.4	<0.1	3.5	5.9	3.4	0.7	2.0
Mn3O4	0.02	<0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
TiO2	<0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	0.04	0.04
Na2O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	0.07	<0.05
K2O	<0.05	<0.05	0.12	0.08	0.08	<0.05	<0.05	<0.05	0.08	0.05	0.05	1.14	0.11
p. feu	14.9	14.6	14.6	14.3	13.2	14.7	14.9	17.0	15.1	15.8	14.8	19.6	27.8
P	0.14	0.14	0.25	0.19	0.13	0.20	0.20	0.12	0.56	1.77	0.19	0.43	0.25
Sr (ppm)	18	4	119	58	7	6	5	<1	48	192	5	672	10
Ba	388	126	1169	628	382	525	625	193	5644	22200	742	3133	413
V	9	15	11	10	22	131	39	2	49	69	19	76	62
Ni	287	314	232	259	44	107	123	220	154	181	97	326	206
Co	22	<5	7	8	7	<5	5	7	6	10	5	7	11
Cr	24	19	14	14	8	94	38	19	76	71	31	25	19
Zn	171	311	152	127	116	161	83	83	79	117	34	578	1987
Cu	5	6	7	12	14	27	23	10	34	42	24	7	7
Sc	4	5	7	3	6	10	7	3	11	23	3	16	10
Zr	4	4	8	4	6	7	3	2	8	9	6	6	8
Nb	3	5	5	<2	<2	5	4	5	6	8	4	6	5
Y	14	19	106	8	9	6	4	17	20	58	6	28	50
La	7	<2.5	33	23	9	5	4	5	27	84	4	219	10
Ce	63	55	121	53	69	59	67	56	87	177	60	170	75
Eu	<1	<1	3.2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2.6	<1	<1	<1
Yb	1.6	2.3	8.5	<0.1	0.4	1.2	1.2	2.2	2.1	5.3	1.3	1.7	7.3
Lu	0.4	0.5	1.7	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.9	0.6	0.7	0.5	0.7	1.1
La/Yb	4.6	0.5	3.9	460	22.5	4.8	4.1	2.4	12.7	16.0	3.3	128	1.4

dans l'échantillon F17-3) qui peut être due à de la muscovite, et quelques valeurs en P notables mais toujours subordonnées (maximum 1,8 % P_2O_5).

Certains éléments en traces ont des teneurs dans l'ensemble assez élevées, Ba, Ni, Zn, Ce. Par ailleurs, apparaissent des anomalies parfois très fortes: 22 200 ppm de Ba et 177 de La dans l'échantillon le plus phosphaté (F7-5); 672 ppm de Sr, 3133 de Ba, 326 de Ni, 578 de Zn, 219 de La, 170 de Ce dans l'échantillon F21-2, lequel a été par ailleurs noté pour son fort excès d'Al; des teneurs de 106 ppm en Y, 121 en Ce, 8,5 et 7,3 en Yb, dispersées dans des échantillons à priori non particuliers.

Ces anomalies diverses traduisent une certaine hétérogénéité géochimique de ces faciès, malgré leur homogénéité minéralogique. L'hétérogénéité est particulièrement mise en évidence par les variations importantes des abondances relatives des T.R. légères et des T.R. lourdes. Le rapport La / Yb varie en effet dans ces faciès entre moins de 1 et plus de 230 (-1 à +230). Sur les 13 échantillons de ces faciès, 7 ont des rapports inférieurs à 5, ce qui correspond bien aux caractères particuliers des chapeaux de fer sur ce point. Les 6 autres ont des rapports supérieurs à 10 avec des variations considérables qui sont peut-être à mettre en relation avec l'existence possible de phosphates de T.R.. Du xénotime aurait en effet été détecté dans de tels faciès (Locati, communication orale).

B - L'échantillon gibbsitique

Ne disposant que d'une seule analyse, il est très difficile de tirer beaucoup d'informations sur ce type de matériau tout aussi abondamment représenté que les matériaux kaoliniques. Cependant, ses principales caractéristiques peuvent être résumées comme suit: forte teneur en Al_2O_3 et OH (perte à 1000 °C), les autres majeurs marquants étant Si et Fe, et absence totale d'alcalins et alcalino-terreux. Les éléments traces les plus abondants sont parmi ceux qui marquent les chapeaux de fer: Ba, Ni, Zn, Y, Yb. Ce est aussi très abondant si on le compare à La, ce qui est probablement à mettre en relation avec les conditions particulières de la genèse de ce faciès. Le rapport La / Yb enfin est bas (1,3) et correspond à celui de la majorité des autres échantillons des faciès d'altérations argileuses blanches.

IV - Conclusion

Les argiles blanches s'intercalent entre les schistes et les produits ferrugineux. Elles apparaissent comme une formation de contact dont il ne reste que des blocs décimétriques enrobés dans des altérites argileuses sans structure visible. Cette formation tranche nettement sur les autres produits d'altération générale, par son faciès (porcelané), sa morphologie (cohérent, massif, sans structure visible), sa couleur très claire (principalement blanche, ocre) au milieu d'altérites ocre à rouge et sa minéralogie (kaolinite, métahalloysite, gibbsite, gorceixite, etc).

Les faciès argileux blancs constituent un objet particulier qui est à la fois différent par sa minéralogie des schistes encaissants et de leur altération habituelle, et comme nous le verrons plus loin des faciès de chapeaux de fer. Cependant, leurs anomalies géochimiques présentent des similitudes en Ba, Zn, Ni et terres rares avec celles des chapeaux de fer. En effet, ils sont essentiellement constitués d'argiles 1 / 1 (kaolinite et métahalloysite) et de gibbsite, laquelle est tout aussi abondante, même si les faciès gibbsitiques n'ont été que peu échantillonnés. Avec les argiles s'exprime la gorceixite. Ce cortège marque bien les mêmes anomalies géochimiques que les ferruginisations en Ba, Zn, Ni et terres rares.

La relation spatiale directe entre les altérations argileuses blanches et les faciès ferrugineux d'une part, la similitude des anomalies géochimiques d'autre part, font penser qu'il existe des relations étroites entre les genèses de ces deux faciès.

La présence de méthalloysite de forme tubulaire et le comportement des éléments de transition inverse à celui observé au cours de l'altération météorique suggèrent que ces matériaux seraient d'origine hydrothermale probable. Cette transformation hydrothermale marquerait ainsi les épontes des corps minéralisés dont l'altération météorique a ensuite conduit à la formation des chapeaux de fer.

La gibbsitisation observée sur divers échantillons pourrait en revanche correspondre à une altération secondaire désilicifiante, des minéraux argileux.

Chapitre VII

LES FACIES FERRUGINISES

Nous appelons faciès ferruginisés, les faciès de roches issus d'un mécanisme tardif de transformation telle que l'altération supergène. Ces faciès secondaires constituent des corps de plusieurs mètres à plusieurs décamètres que sont les chapeaux de fer (cf observations et descriptions de terrain), insérés dans les séries stratigraphiques et marquant le paysage. D'autres faciès oxy-hydroxydés sont directement interprétables macroscopiquement. Ce sont les roches de l'encaissant des corps ferrugineux, épigénisées par des oxydes et / ou hydroxydes de fer. Cette subdivision est certes arbitraire puisque sont mis sur le même plan des faciès qui sont de toute évidence des roches de l'encaissant connues et des matériaux typiquement issus de corps minéralisés dont l'origine reste incertaine. Cependant cette classification est retenue car c'est la seule qui soit utilisable sur le terrain. En conséquence, les faciès oxy-hydroxydés seront présentés en deux parties qui distinguent les faciès de roches ferruginisées et les faciès typiques des chapeaux de fer (FTCF).

I - Description pétrographique

A - Les faciès de roches ferruginisées

1 - Les schistes ferruginisés

Macroscopiquement, ils ont un aspect lamellaire, correspondant à une bonne conservation de la structure initiale de la roche transformée. Il s'agit à l'évidence d'un envahissement de schistes par des oxydes de fer, avec dissolution plus ou moins poussée du quartz et des micas. Les niveaux quartzeux, plus vulnérables, sont plus attaqués, alors que les minéraux phylliteux le sont moins et matérialisent la schistosité. L'imprégnation des lits riches en quartz se traduit par des précipitations de goëthite microcristalline de couleur sombre et par la présence de quartz jaunis. Les micas sont peu attaqués et ont une coloration jaune. Aussi se voient des cavités millimétriques de forme très souvent allongée suivant l'alignement des micas. D'une façon générale, la ferruginisation des schistes est plus ou moins poussée avec tous les intermédiaires entre un schiste sain et une masse ferrugineuse où se reconnaît à peine la structure du schiste initial.

Dans un échantillon de schistes ferruginisés, des débuts de formation de cendrier ont été notés; un cendrier est un faciès de ferruginisation en forme de boule creuse ou non, de taille décimétrique et plus, présentant parfois une succession d'enveloppes de goëthite et d'hématite séparées par des fissures, d'où le terme de "pelures d'oignon" (figure 20; Pl. IV, photo 1). Sur cette photo, peuvent être notés deux cendriers en cours de développement; chaque cendrier présentant de l'intérieur vers l'extérieur, une cavité plus ou moins parfaite, enveloppée d'une alternance de couches de goëthite et d'hématite.

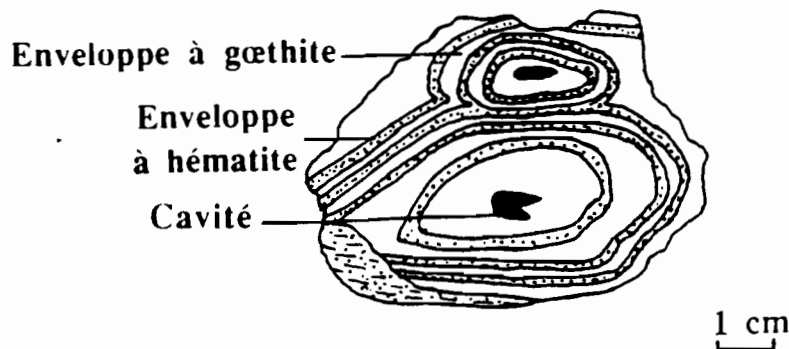


Figure 20 Schéma montrant le développement d'un cendrier dans un schiste ferruginisé

Au microscope, les schistes ferruginisés ont une architecture feuilletée conservée et caractérisée par des micas alignés. L'aspect général est poreux, les pores ayant des formes allongées suivant la schistosité. Leur composition minéralogique est banale: muscovite, quartz, gœthite et hématite. Les caractères structuraux des schistes sains se retrouvent ici: muscovites en paillettes rangées parallèlement à la schistosité, microplis (Pl. IV, photo 2), etc. Ces micas sont bien entendu rongés et envahies d'oxydes de fer. La taille des micas dépend de l'intensité de la ferruginisation. Il y a compétition entre les micas et les minéraux de fer et, dans les faciès très évolués, les micas sont plus fins, et vice versa.

Les quartz sont disposés en plages allongées parallèlement à l'alignement des micas. Ces plages sont discontinues, interrompues par des amas de gœthite ou par des cavités. Ils sont, tout comme les muscovites, corrodés et présentent des figures d'éclatement conduisant à de petits grains de forme irrégulière. La taille des grains s'échelonne de 30 à 400 μm , avec une fréquence dominante pour 200 μm . Les petits fragments issus de l'éclatement ont un diamètre moyen de 35 μm . Dans les craquelures s'observent de temps en temps des précipitations d'hydroxydes de fer microcristallins.

Quant aux minéraux oxy-hydroxydés de fer, la gœthite l'emporte là aussi sur l'hématite et se présente sous forme microcristalline. Sa coloration est brun sale tachetée de jaune. Parfois, on rencontre de la gœthite fibroradiée en bordure de grandes cavités inframillimétriques qu'elle tend à colmater. L'hématite se présente sous forme d'inclusions microscopiques de couleur rouge cerise dans la masse de gœthite.

Dans une lame de schiste ferruginisé (lame CF V-3) se note une organisation particulière. Plusieurs fractures conjuguées, plus ou moins ouvertes entourées de halos très opaques d'oxy-hydroxydes de fer traversent la lame dans tous les sens, recoupant quelquefois la schistosité (fig. 21). Le long de ces fractures se voient de grandes cavités de taille généralement supérieure à 100 μm , le plus souvent avec des formes à tendance polygonale. Ces cavités sont bordées de parois doubles, constituées de gœthite et d'hématite. Dans certaines cavités s'observent des formes de cloisonnements ferrugineux parallèles et disposés perpendiculairement aux parois et qui sont interprétés comme des figures d'envahissement ou de remplissage progressif par des oxy-hydroxydes de fer dans des clivages. L'ensemble s'apparente à une réticulation type boxwork défini par Blanchard (1925, 1927, 1944 et 1968) correspondant à des minéraux de grande taille disparus et où ne subsiste aucun indice pouvant renseigner sur leur nature. Il s'agit là d'un cas particulier où le schiste, traversé par des filonnets, a été envahi par du fer avec lessivage de ces minéraux et évolution en boxwork.

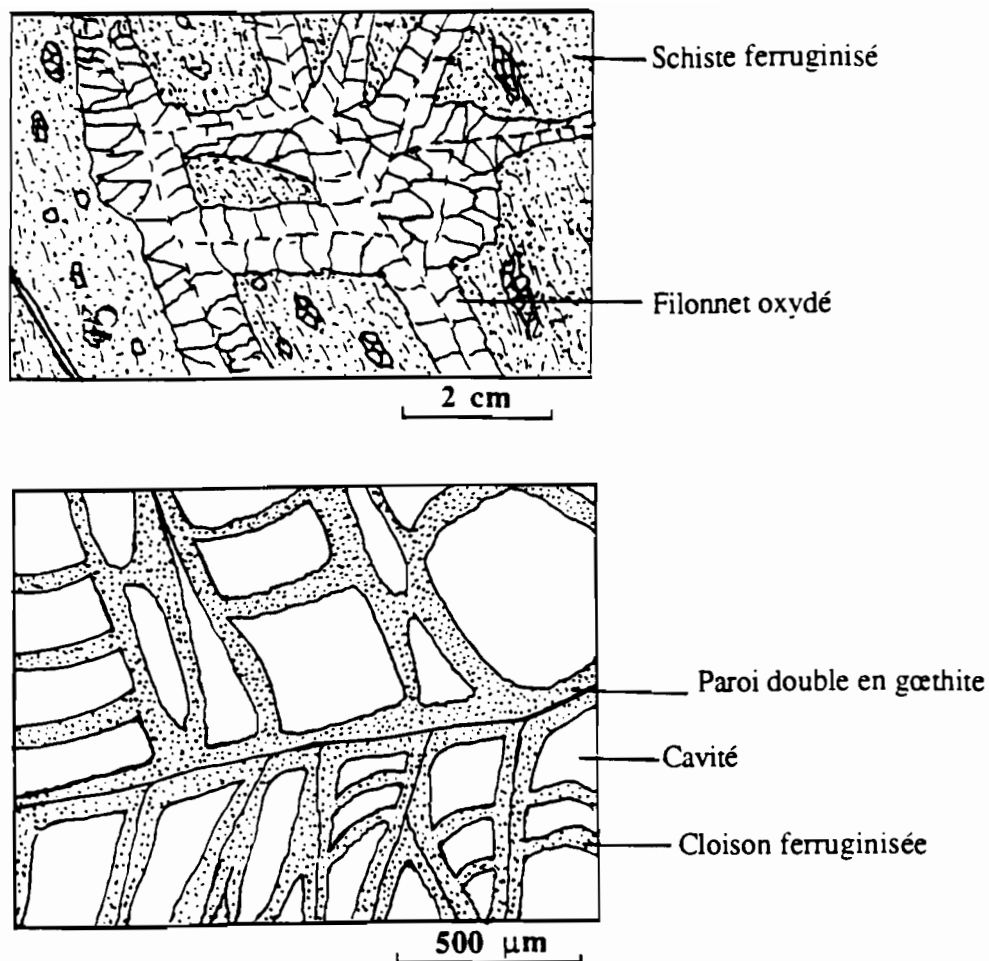


Figure 21 - Schéma montrant des filonnets oxydés dans un schiste ferruginisé.
 a) vue d'ensemble, b) détail d'un filonnet ; noter la taille des cavités et les cloisons ferruginisées.

Enfin, dans les lames PTOG 70A et B, des restes de minéraux de manganèse de type pyrolusite ont été observés. Ils sont toujours entourés d'oxy-hydroxydes de fer (Pl. IV, photo 3) et sont parfois associés au quartz avec un aspect duveteux ou plumeux.

En conclusion partielle sur les schistes ferruginisés, trois points sont à retenir:

- la conservation de la structure schisteuse soulignée par l'orientation des micas dans une matrice ferrugineuse sans texture;
- l'évolution minéralogique marquée par la disparition des chlorites, des plagioclases, des carbonates et des sulfures, et l'apparition de minéraux ferrifères secondaires de type goëthite et hématite à la place de ces derniers;
- le début de formation de cendrier dans un échantillon et la présence d'un faciès typique d'évolution en boxwork de filonnets tardifs dans un autre échantillon.

2 - Produits d'oxydation des quartzites ferrugineux

Les produits d'altération des quartzites ferrugineux sont macroscopiquement peu différents des faciès sains avec alternance des niveaux clairs et sombres correspondant respectivement aux quartz et aux minéraux de fer.

Au microscope, ils sont constitués de quartz, de magnétite et d'hématite lamellaire correspondant aux minéraux primaires résiduels, de goëthite et d'hématite microcristalline qui sont les espèces néoformées. Les cristaux d'hématite lamellaire et de magnétite résiduelles sont allongés parallèlement matérialisant la schistosité ou le litage de la roche. Ils

ne sont pas tout à fait sains et présentent des débuts d'altération traduits par un envahissement par de la goëthite, altération qui se traduit par ailleurs par une corrosion des quartz. Les cristaux de magnétite sont souvent martitisés.

La goëthite et l'hématite secondaire sont bien cristallisées. La goëthite apparaît soit en cristaux aciculaires dont l'agrégation conduit à des plages hérissées d'aiguilles, soit en masse avec une structure microfibradiée bien visible en lumière réfléchie polarisée (LRP). Cette structure en bouquet forme des irisations au sein des microcavités laissées par la disparition des lamelles d'hématite comme le montre la photo 4 de la planche IV prise en LRN. Par ailleurs, des vestiges d'hématite lamellaire et de magnétite s'observent, noyées dans la masse de goëthite. L'hématite néoformée se présente sous forme de grains isolés ou agglomérés, très souvent associés à la goëthite au voisinage des cristaux de magnétite, formant dans les plans de clivages et sur les bords de ces derniers des réseaux courbes (Pl. IV, photo 5). Elle peut aussi exister sous forme fibradiée.

Deux types de figures de répliques ont été observés, correspondant aux cavités laissées par les quartz et la magnétite. Les répliques sur quartz sont les mieux exprimées et les mieux conservées. Elles se traduisent par des cavités vides de 20 à 70 μm avec une dominance des tailles de 60 μm . A l'emplacement des cubes de magnétite, se rencontre un édifice automorphe poreux avec encore des clivages préservés en hématite-goëthite secondaires (fig. 22). L'évolution postérieure aboutit à de l'hématite massive compacte sans texture.

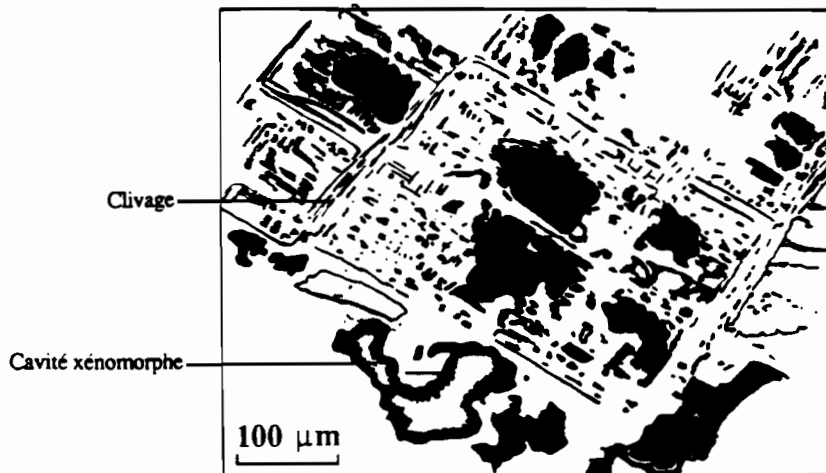


Figure 22 - Boxwork dérivé de magnétite

En résumé, comme pour les schistes ferruginisés, il s'agit là de faciès relativement banals d'altération en milieu oxydant. L'oxydation des quartzites ferrugineux à magnétite et hématite conduit aux minéraux secondaires goëthite et hématite. L'abondance relative de l'une ou de l'autre espèce est fonction de la constitution minéralogique de la roche-mère. Ainsi un quartzite à hématite dominante s'oxyde pour donner plus de goëthite massive sans texture visible, tandis qu'un quartzite riche en magnétite fournit plus d'hématite. Les réticulations dérivant du quartz sont banales et d'assez grande taille et les figures de répliques de la magnétite sont bien caractéristiques et ne peuvent pas être confondues avec les autres types de réseaux réticulés rencontrés ailleurs.

3 - Les faciès d'altération des phosphates

Ce sont des roches très transformées, friables ou compactes, qui se présentent sous forme de blocs de taille variable, centimétrique à métrique. Elles ont été trouvées associées aux matériaux ferrugineux du chapeau de fer n° 21 (cf figure 12), formant parfois des ferruginisations à phosphates secondaires. Ce sont ces dernières qui ont été prélevées et étudiées ici.

Deux faciès macroscopiques principaux ont été identifiés à l'oeil nu et à la loupe binoculaire dans ces matériaux. Il s'agit de pisolites et de filonnets phosphatés. Les pisolites phosphatés sont souvent petits avec un diamètre moyen de l'ordre du millimètre. Ils sont formés de couches concentriques de couleur jaune et brune. Ils sont enrobés dans une matrice ferrugineuse quartzo-micacée. Les filonnets phosphatés se présentent sous forme de trames de couleur verdâtre ou blanc crème et ivoire, à l'intérieur d'une masse ferrugineuse brun foncé.

L'observation au microscope optique, couplée à la diffraction des rayons X et à la microscopie électronique, a permis de mieux préciser les principales phases minérales coexistantes qui sont de deux types: la phase phosphatée et la phase ferrugineuse quartzo-micacée.

La phase phosphatée. Elle est très hétérogène et très complexe pour chacun des deux types macroscopiques qu'elle représente.

Les pisolites phosphatés (éch. UN-1). Ils se présentent au microscope sous forme de nodules de 1 à 1,5 mm de diamètre, constitués d'au moins deux enveloppes et un coeur ou noyau de couleur différente. Le coeur et l'enveloppe externe sont de couleur brun jaunâtre sale, l'enveloppe interne est claire et reste presque éteinte en lumière polarisée. Ces différentes parties présentent dans l'ensemble une structure fibroradiée plus ou moins nette. Les déterminations minéralogiques par diffraction RX et la microsonde électronique ont permis de constater qu'ils sont principalement constitués de minéraux de phosphates d'alumine de type variscite ou wavellite, le plus souvent très substitués en Fe, Si et parfois en K et Ba (cf tableau XXXIII). Ils renferment aussi un peu de gorcéixite soupçonnée par la diffraction des RX et confirmée à la microsonde électronique; elle se présente au microscope sous forme cryptocristalline de couleur brun sale à marron.

Les filonnets phosphatés (éch. TOG 23-A et B, AB-695). Ils apparaissent au microscope optique mieux cristallisés que le faciès précédent, avec deux formes bien distinctes: sphérules à structure fibroradiée très nette et baguettes prismatiques (Pl. V, photos 1 et 2). Une troisième forme moins nette, cryptocristalline, existe également. Ces minéraux, de formes variées, présentent la teinte de polarisation caractéristique de l'apatite. Les sphérules fibroradiées sont petits, de diamètre compris entre 20 et 180 μm et se présentent soit sous forme isolée, soit engrenés formant ainsi des trames dans la matrice ferrugineuse. Ils sont également zonés, mais ici la zonation correspond à des reprises de croissance des fibres car il n'existe pas de différence ni dans la couleur, ni dans la composition chimique (cf tableau XXXIII). Les cristaux prismatiques ont été rencontrés dans une seule lame. Ce sont des minéraux à sections triangulaires parfois tronquées sur les sommets ou hexagonales.

Au moyen de la microsonde électronique, la nature des ces minéraux a été mieux précisée. C'est ainsi que les sphérules fibroradiées sont souvent de la wavellite et de la turquoise, les baguettes prismatiques à sections polygonales correspondent à un phosphate d'alumine et de calcium de type crandallite. Le faciès cryptocristallin observé au microscope optique se révèle à fort grossissement être formé de petits cristaux à sections polygonales. Il s'agit de gorcéixite (phosphate d'alumine et de baryum).

La phase ferrugineuse quartzo-micacée. La goëthite est la forme du fer la plus abondante et la plus fréquemment observée. Elle se présente sous forme de grains microscopiques formant des lisérés autour des minéraux phosphatés. Il s'agit de goëthite microcristalline qui se rencontre aussi dans les fissures développées entre les grains de quartz et dans les interstices des pisolites phosphatés.

Le quartz est plus ou moins fréquent et son abondance est fonction de la nature du matériau étudié et de son degré de ferruginisation. Il se présente sous forme de grains isolés ou agrégés en plages assimilables à des restes de quartzites. Dans ces plages, les grains montrent des contours bien marqués et ne sont pas jointifs, mais sont séparés les uns des

autres par des fissures de dissolution colmatées ou non par de la goëthite. Les grains de quartz sont parcourus de réseaux denses de micro-fractures. On note la présence de golfes de corrosion en bordure des grains isolés.

Les muscovites sont en paillettes bien développées et colorées en rose. Elles présentent des clivages bien nets et polarisent dans les teintes vives d'ordre supérieur. Il s'agit de muscovite rose ou "pink muscovite" caractérisée par de fortes teneurs en Ba. Elles sont soit dispersées sans orientation définie dans la matrice ferrugineuse autour des nodules phosphatés, soit disposées en plages avec, comme il a été déjà décrit à plusieurs reprises, un alignement suivant deux directions sécantes correspondant à deux phases de déformation S₁ et S₂. Les plages micacées sont envahies de goëthite.

Les minéraux accessoires rencontrés sont de la pyrite et du rutile. La pyrite a été trouvée en inclusions de 10 µm environs dans les quartz. Le rutile est en grains plus ou moins arrondis, soit disséminés dans la matrice ferrugineuse, soit associés à des plages de muscovite; une fois ils ont été observés en inclusions dans un pisolite phosphaté.

Le quartz et la muscovite apparaissent comme des minéraux résiduels qui pourraient correspondre à une phase primaire dans laquelle se seraient développées les phosphorites. Cette hypothèse est par ailleurs appuyée par diverses observations. Dans les lames TOG-20, TOG-22 A et B qui sont des quartzites envahis d'hydroxydes de fer, se voient çà et là, des mouches phosphatées en développement.

De même pour la chronologie minéraux phosphatés - goëthite (ferruginisation), on pense que la goëthite est postérieure. En effet, l'existence de goëthite autour des minéraux phosphatés d'une part, et la forme irrégulière et chagrinée des prismes de wavellite en voie de digestion par des trames de goëthite d'autre part, autorisent à dire que les phosphorites sont antérieures à la ferruginisation de l'ensemble du matériau. Cependant, des filonnets de phosphorites peuvent être postérieurs à la goëthite car ils recoupent les plages ferruginisées.

En résumé, les faciès ci-dessus décrits, sont constitués de trois phases minéralogiques: les phases silicatée (quartz et micas) et phosphatée (wavellite, gorcéixite, et turquoise) prises dans une phase ferrugineuse principalement à goëthite. La wavellite et la gorcéixite sont connues comme des minéraux secondaires d'altération. Ceci nous autorise à penser que les affleurements de phosphorites de Pagala sont des faciès secondaires dérivant de l'altération de la minéralisation primaire d'apatite qui a été signalée dans les forages réalisés par Uranerzbergbau. La présence des minéraux phosphatés secondaires dans des matériaux ferrugineux, dans lesquels ils sont enrobés, montre que leur histoire est complexe. Les observations pétrographiques nous permettent de dire qu'il y a au moins deux phases de transformation: altération de phosphates primaires en phosphates secondaires puis la ferruginisation de l'ensemble, ces deux phases étant bien entendu postérieures aux phosphates primaires. Les mécanismes de ces transformations restent à être précisés.

B - Les faciès typiques des chapeaux de fer

1 - Description macroscopique

Ce sont les faciès les plus répandus communément appelés "chapeaux de fer" sur le terrain. Ils sont très variés du point de vue de la morphologie macroscopique. Dans ce groupe quatre sous-faciès principaux ont été considérés et ce sont:

- faciès ferrugineux massifs sans structure ;
- faciès ferrugineux scoriacés;
- faciès ferrugineux en "cendriers";
- brèches ferrugineuses.

a - Le faciès ferrugineux massif sans structure

C'est parmi les faciès de chapeau de fer, celui qui est le plus riche en oxy-hydroxydes de fer, lesquels forment la quasi-totalité des matériaux. Il a un aspect massif, compact, dur, avec une cassure conchoïdale. Aucune organisation macroscopique n'est observable dans ces matériaux. Cependant, de très beaux mamelonnements correspondant à de la goëthite fibroradiée et traduisant des cristallisations massives d'oxy-hydroxydes de fer ont été parfois observés.

Ces matériaux présentent des couleurs jaune safran, violacé, brun, etc. Parfois sur certaines surfaces, des enduits sombres de goëthite ont été observés. Les cavités sont rares et sont de petite taille et très généralement tapissées de goëthite avec parfois un enduit noir velours de minéraux de manganèse ou aussi des quartz pyramidés.

Les minéraux macroscopiquement reconnaissables sont essentiellement la goëthite, avec un peu de quartz et quelques micas et aussi parfois quelques éléments de roches discrets. La goëthite est massive, et apparaît localement bien cristallisée soit sous forme de billes ou de rognons, soit en grandes fibres rayonnantes. Cette forme fibroradiée se rencontre le plus souvent en bordure des fissures. Le quartz est en grains xénomorphes, limpides. Cependant, des quartz automorphes pyramidés de taille millimétrique ont été aussi observés: il s'agit de quartz secondaires. Les micas (muscovites), sont en paillettes dispersées dans la masse ferrugineuse et ont des reflets métalliques, mordorés.

b - Les faciès ferrugineux scoriacés

Ils sont très poreux ou vacuolaires, et sont par conséquent moins denses que les premiers. Ils sont noirs, brun foncés ou violacés. Les cavités ou pores n'ont pas de forme géométrique bien définie et sont de tailles variables; les vacuoles sont millimétriques à décimétriques et s'apparentent alors plus à des cavernes. L'abondance des vacuoles et la couleur sombre les rapprochent des scories industrielles, mais avec une densité plus forte. Le fond des cavités est recouvert d'oxydes de fer de couleurs variées, brun sombre, bleuté, vert métallique, rouge cuivre, etc... Tout comme les faciès massifs, ils apparaissent principalement composés de goëthite avec des quartz jaunés par les hydroxydes de fer et des micas blancs en paillettes.

c - Le faciès ferrugineux en "cendriers"

Ils se présentent sous forme de boules très souvent ovoïdes et de taille centimétrique à pluridécimétrique (Pl. I, photo 3). A la cassure, celles-ci apparaissent constituées d'enveloppes concentriques en "pelures d'oignons" et d'un noyau central. Les enveloppes sont plus ou moins finement poreuses, dures, et présentent diverses couleurs qui traduisent très souvent des compositions minéralogiques spécifiques, et en particulier les variations des abondances relatives de goëthite et d'hématite. Les cendriers peuvent aussi se développer sans prendre l'allure de "pelures d'oignon". Au coeur de la boule se rencontre le plus souvent une cavité en partie occupée par un matériel pulvérulent de couleur jaune rouille à gris foncé ou gris clair constitué de micas blancs et de quartz. Parfois, le fond de la cavité est tapissé de goëthite, ou de minéraux de manganèse noir velours. Dans un puits, a été observée une boule dont la cavité est tapissée de pyrite microcristalline (Magat et Blot, communication orale), ce qui est tout à fait exceptionnel dans cet environnement marqué par des conditions oxydantes généralisées.

Comme dans les faciès précédents, se voient bien à l'oeil nu des quartz et des micas blancs dispersés dans une matrice de goëthite, parfois fibroradiée, et d'hématite; dans les cavités centrales, prédominent le quartz et les micas.

d - Les faciès de brèches ferrugineuses (Pl. I, photo 4)

Ce sont des matériaux qui montrent des enclaves de roches enrobées dans une masse d'oxy-hydroxydes de fer. Ces enclaves de roches sont fréquemment des éléments de schistes ou de micaschistes, de quartzites avec ou sans micas, et des quartz filoniens

boudinés. Lorsqu'il s'agit d'enclaves schisteuses, l'alignement des micas diffère d'une enclave à l'autre, ce qui montre qu'elles ont subi des déplacements relatifs les unes par rapport aux autres. La matrice ferrugineuse dans laquelle elles sont noyées se présente sous forme massive, très riche en goëthite souvent très bien cristallisée en grands cristaux fibroradiés. Ces faciès peuvent être interprétés comme des brèches d'origine tectonique.

2 - Description pétrographique

La grande diversité d'aspects de ces faciès typiques des chapeaux de fer peut donner l'impression qu'ils correspondent à des matériaux de natures très différentes. Cependant, ils présentent de nombreux points communs qui en font un ensemble de matériaux plus homogène que l'observation macroscopique ne le laisse prévoir. En fait, les divers faciès typiques des chapeaux de fer se présentent schématiquement comme une masse d'oxyhydroxydes de fer secondaire, englobant des minéraux résiduels d'un matériau primaire. Ils présentent par ailleurs une microtexture spécifique réticulée sur laquelle on sera amené à revenir à plusieurs reprises. Ceci fait qu'une même description pétrographique générale peut être donnée pour l'ensemble des faciès, avec une signification assez large. Pour cette raison, seront décrits dans un premier temps les caractères pétrographiques communs à ces divers faciès, et dans un deuxième temps seront précisées dans deux paragraphes séparés, les particularités structurales spécifiques qu'offrent respectivement les faciès de brèches ferrugineuses et les faciès en cendriers.

a - Les caractères pétrographiques communs aux différents faciès typiques des chapeaux de fer

En lame mince, les faciès typiques des chapeaux de fer présentent une composition minéralogique simple, dominée par l'omniprésence de la goëthite et de l'hématite déjà signalées par Godonou et al., 1983,1984; Magat et Blot, 1984, 1987, 1989), lesquelles forment le ciment ou plasma ferrugineux oxy-hydroxydé secondaire dans lequel sont noyés des quartz et des micas, isolés ou en îlots, représentant la phase résiduelle principale. Ce plasma a une texture réticulée au microscope.

Les minéraux secondaires.

Ce sont presque exclusivement des minéraux oxy-hydroxydés de fer de type goëthite et hématite. Ces deux espèces sont très abondantes et constituent plus de 80 % des constituants des formations ferrugineuses.

La goëthite est de loin la plus abondante. Elle se présente sous forme soit microcristalline, soit cryptocristalline, soit fibroradiée. La goëthite microcristalline est de couleur jaune ou brune jaunâtre en lumière transmise naturelle et est très fréquente. Elle forme le plus souvent les parois des réseaux réticulés qui seront décrits plus loin. Quant au faciès cryptocristallin, il se rencontre dans la plupart des cas à l'intérieur du réseau réticulé. Il s'agit d'un habitus de remplissage de couleur brune. Ce faciès peut aussi former des passées continues comme dans l'échantillon TOG 30 (Pl. III, photo 3). Dans ce cas, il ne présente aucune texture particulière. La goëthite fibroradiée, ou sphérolites en ogive de Kosakévitch (1983), est très fréquent. Contrairement aux autres variétés, elle est très translucide et peut être observée en lumière transmise. Elle se présente sous forme de fibres de grande taille pouvant atteindre le millimètre, de couleur jaune à brun tacheté de jaune très lumineux en lumière transmise naturelle et polarisée. Il s'agit d'un minéral pur sans enclaves qui peut atteindre des dimensions considérables jusqu'à plusieurs centimètres; ces derniers n'ont pas été étudiés en lame mince. Très souvent la goëthite fibroradiée se localise en bordure de fissures de toute taille et dans des alvéoles inframillimétriques à centimétriques.

L'hématite. Le faciès de très loin le plus fréquent sous lequel se présente l'hématite est celui d'un amas microcristallin à cryptocristallin, de teinte rouge sombre, avec des réflexions internes vives en lumière transmise polarisée condensée. Elle se présente sous forme de grains de couleur rouge cerise quand elle est dispersée et devient opaque lorsque ces grains se rassemblent en une masse continue. Elle est fréquemment associée à de la goëthite. Comme cette dernière, elle forme les parois des réseaux réticulés, mais

contrairement à la g ethite, elle ne se rencontre que très rarement à l'intérieur de ceux-ci. Généralement, les plages d'hématite sont très opaques et ne se distinguent qu'en lumière réfléchie. L'hématite massive peut présenter également des figures de micro-réticulations. C'est un des rares cas où le coeur des réticulations est hématitique.

Les minéraux primaires résiduels

Les plus fréquents sont le quartz et les micas blancs. Ils sont dispersés, ou en amas ou agrégats correspondant à des reliques de roches quartzenses, schisteuses, ou quartzo-micac es. Le quartz est hétérogranulaire, la taille des grains variant entre 30 et 300  m avec une dominance des tailles de 100   200  m. Ils ont une extinction roulante. Quant ils sont isolés, ils ont le plus souvent des formes irrégulières dues à des golfes de corrosion. Les zones corrod es sont envahies de g ethite ou d'hématite. Parfois ces quartz sont éclatés et dans les fractures ou fissures provoqu es par l'éclatement, se sont déposés des oxyhydroxydes de fer. De temps en temps, se voient au centre des réseaux réticulés, de petits quartz qui apparaissent comme les restes de grains non encore complètement lessivés (figure 23).

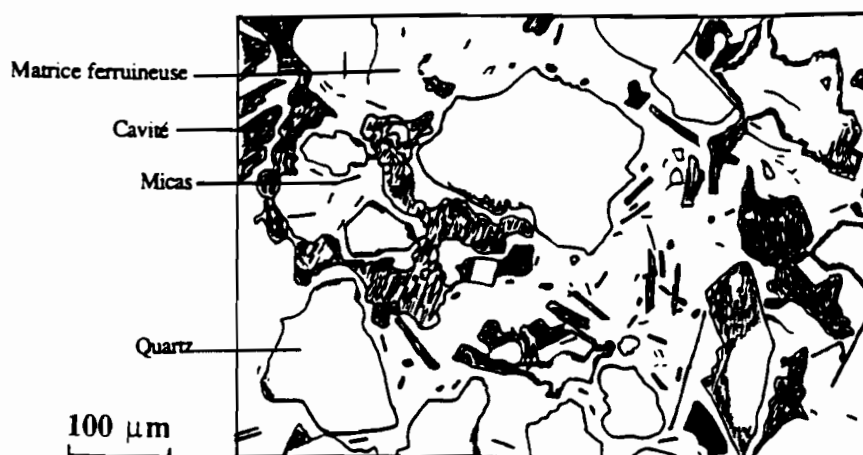


Figure 23 - Quartz résiduels corrodés dans la matrice ferrugineuse

Les micas, lorsqu'ils sont isolés, ne paraissent pas dispersés au hasard dans la masse ferruginis e, mais souvent alignés dans une direction privil gi e. Parfois, ils sont alignés dans deux directions sécantes (Pl. I, photo 5 avec calque). Dans certains échantillons, les paillettes de muscovite semblent dessiner des microplis (Pl. II, photo 1 avec calque) avec des charnières encore observables.

Les éléments de roches. Ce sont des restes apparemment non digérés de micaschistes, de schistes ou de quartzites. Ils sont constitués soit de quartz agglomérés en plages, soit d'amas de muscovites, soit de mélange de quartz et de micas. Dans les lithoreliques riches en micas, ceux-ci sont dans l'ensemble disposés selon une direction et parfois deux directions sécantes correspondant à S₁ et S₂ des roches encaissantes. Ces alignements des muscovites dans les éléments de schistes sont conformes, d'une part entre deux éléments voisins, mais aussi entre les éléments et les micas dispersés alentour dans le plasma ferrugineux. Parfois, des microplissements dessinés par les muscovites peuvent y être notés. Dans les fragments de quartzites, les grains de quartz sont fréquemment séparés les uns des autres par des fissures dans lesquelles se sont effectués des dépôts d'oxydes de fer.

Minéraux accessoires

Enfin, quelques minéraux très accessoires ont été parfois observés. Ce sont des minéraux de manganèse et des sulfures. Les minéraux de manganèse ont été rencontrés seulement dans trois lames minces ( ch. TOG-31, S-5, CB-6). Il s'agit de pyrolusite et de

psilomélane précisés par la diffraction des rayons X et les analyses ponctuelles. Ils apparaissent en plages de quelques centaines de microns très contournées, avec des golfes de pénétration (Pl. II, photo 2), et sont emprisonnés dans une matrice de gœthite fibroradiée mamelonnée. Les sulfures sont en inclusions dans les quartz, ce qui les a protégé de l'oxydation; ils sont de très petite taille, et ne sont mis en évidence qu'en lumière réfléchie et à un fort grossissement, leurs caractéristiques optiques sont celles de la pyrite.

Micrographie des réticulations de la matrice ferrugineuse

Le terme de "réticulation" employé dans l'ensemble de ce travail désigne un type de texture généralisée dans les matrices ferrugineuses et typiquement formée de cavités vides ou non entourées de gœthite ou d'hématite qui en constituent les parois. Ce terme est l'équivalent des boxworks des auteurs anglo-saxons notamment Blanchard (1925, 1944, 1968) et des pseudomorphoses de Kosakévitch (1979, 1983, etc..).

Les cavités sont de formes variables. Les habitus xénomorphes sont de loin les plus répandus. Mais elles ont aussi parfois des formes régulières, triangulaires, carrées, rectangulaires, etc, indiquant alors l'existence préalable de minéraux automorphes, comme du quartz, des spinelles, de la pyrite.

Les cavités sont hétérométriques et présentent deux ensembles de taille. Dans le premier ensemble, la taille varie entre 20 et 50 μm , avec une dominance entre 20 et 35 μm (figure 24). Nous convenons de les appeler "micro-réticulations" (Pl. II, photo 3). Dans le second ensemble, la plupart des cavités ont des tailles comprises entre 100 à 350 μm , avec une forte fréquence pour 200 μm . Nous les appelons "macro-réticulations" (photo précédente). Les micro-réticulations représentent le cas général, les macro-réticulations sont plus rares.



Figure 24 - Schéma montrant deux types de réticulations: micro-réticulation à gauche et macro-réticulation à droite.

Les parois des réticulations sont fréquemment doubles (Pl. II, photo 4). En effet, leur observation à un fort grossissement permet de voir un mince canal central bordé de part et d'autre par une couche d'hématite ou de gœthite. L'hématite ou la gœthite des parois, lorsqu'elle est bien cristallisée, est sous forme de fibres disposées perpendiculairement à celles-ci. Bien que souvent oblitéré par des recristallisations, le caractère en double couche des cloisons semble être assez général pour être considéré comme caractéristique des textures réticulées.

Les cavités sont le plus souvent remplies de gœthite cryptocristalline mais peuvent aussi être vides ou partiellement occupées par le reste d'un grain de quartz plus ou moins

corrodé. Très rares dans les micro-réticulations, les grains de quartz sont très fréquents dans les macro-réticulations, ce qui conduit à interpréter ces dernières comme résultant de l'évolution d'une plage de quartzite ou de filons de quartz par dissolution partielle ou totale du quartz, remplacé par des oxy-hydroxydes de fer respectant la texture du quartzite ou du filon. Malgré la présence de rares quartz de petite taille, les autres réticulations dériveraient d'un faciès autre qu'un quartzite, ainsi que cela sera développé plus loin.

En conclusion partielle, les faciès oxy-hydroxydés sont constitués de minéraux résiduels, essentiellement quartz et micas isolés ou en îlots, noyés dans une matrice goëthite-hématitique. Cette matrice ferrugineuse, quelle que soit sa nature minéralogique, a une texture réticulée généralisée. Deux types de réticulations ont été reconnues; des macro-réticulations de 200 μm en moyenne et des micro-réticulations de diamètre moyen de 25 μm , interprétées comme correspondant à l'épigénie de deux matériaux différents, le premier étant du quartz issu de quartzite ou de filon, le second n'étant pas directement accessible.

b - Cas des brèches ferrugineuses (une lame décrite: éch. PTOG 68-2)

Les mêmes minéraux que précédemment (goëthite, hématite, quartz et micas) y ont été notés, les oxy-hydroxydes de fer s'y présentant avec les mêmes formes. La particularité de ces faciès est leur aspect hétérogène. Les brèches ferrugineuses se présentent comme le résultat de ferruginisation de brèches d'origine tectonique dont les éléments sont des quartzites, des schistes, des micaschistes et souvent des filons de quartz.

La ferruginisation affecte plus ou moins les éléments de roches. Quand elle est complète et que quartz et micas ont presque complètement disparu, le faciès ferruginisé obtenu varie suivant la nature de l'élément lithique initial: les éléments de quartz filonien ou de quartzite donnent des faciès à réseau réticulé tel qu'on les a décrits plus haut. Les éléments schisteux donnent une masse ferruginisée compacte non différenciée, avec éventuellement quelques reliques de fragments de roches et qui apparaissent comme des nodules massifs dans la matrice ferrugineuse. La lame qui est décrite ici présente une matrice ferrugineuse peu abondante, formée principalement de goëthite microcristalline sans texture significative.

c - Cas des faciès en "cendriers"

Les faciès en cendriers présentent les mêmes caractères pétrographiques fondamentaux que les faciès ferrugineux tels que la coexistence de goëthite et d'hématite crypto à microcristallines et fibroradiée pour la goëthite, des reliques de micas et parfois de quartz, un réseau réticulé généralisé. Leur caractéristique particulière est l'organisation en couches ou enveloppes plus ou moins concentriques. Les constitutions minéralogiques et les textures des enveloppes sont extrêmement variables sans qu'un ordre bien défini de succession entre elles n'apparaisse. Tous les cas suivants, couche à goëthite ou à hématite dominante, couche à goëthite ou à hématite pure, couche à texture réticulée, couche massive sans texture, etc..., peuvent être observés. Le passage de l'une à l'autre est continu ou discontinu. Lorsque le passage est discontinu, des fissures de décollement peuvent souvent être observées entre les couches. Ces fissures de décollement et la zone centrale sont fréquemment occupées par la goëthite fibroradiée.

L'architecture des ferruginisations en cendriers est illustrée par la figure (Pl. III, photo 3) où peut être relevées sur la coupe d'un cendrier de 3 cm environ la succession suivante, de l'extérieur vers l'intérieur:

- 1) - une zone hématitique massive, opaque en LT (1,2 mm de large), micro-réticulée (20 μm), avec des parois et cavités en hématite et quelques rares pores de plus de 50 μm ;
- 2) - une zone à hématite microcristalline rouge cerise en LT (1,4 mm de large), micro-réticulée, (20 μm) à parois minces et cavités également en hématite, quelques quartz et micas résiduels et des pores de plus de 100 μm ;

- 3) - une zone à gœthite microcristalline (1mm de large), micro-réticulée (30 μm) à parois goëthitiques et cavités remplies souvent de gœthite cryptocristalline de couleur brun sombre ou jaune pâle;
- 4) - une passée mince (300 μm) très riche en hématite à texture massive renfermant de rares cavités (30 μm) le plus souvent vides;
- 5) - une passée également mince (200 μm) constituée de gœthite cryptocristalline brun sombre et de quelques grains d'hématite, la texture est massive;
- 6) - une zone à gœthite microcristalline (2mm de large) présentant les mêmes caractéristiques que la zone 3 et évoluant en gœthite bien cristallisée puis en celle fibroradiée;
- 7) - enfin, une zone à gœthite fibroradiée en ogives entourant la cavité centrale du "cendrier".

Les cendriers existent en différentes tailles. La figure (Pl. II, photo 5) représente un microcendrier millimétrique (1,2 mm) où se voient, de l'intérieur vers l'extérieur, une cavité centrale entourée d'une couche de gœthite à micro-réticulations et une enveloppe plus fine d'hématite massive. Il est par ailleurs bordé sur deux côtés par deux fissures sécantes. Cette relation géométrique directe entre le cendrier et les fissures qui le bordent pousse à dire que la formation de ces microcendriers est guidée par des fractures développées au sein du matériau de départ. Nous verrons que cela peut être extrapolé à des cendriers de toutes échelles.

C - Discussion

L'ensemble des faciès présente un facteur commun marqué par leur richesse en oxydes et hydroxydes de fer. Cependant, des distinctions s'imposent à toute échelle notamment par la reconnaissance des schistes ferruginisés. En effet, les particularités spécifiques des schistes ferruginisés sont la conservation de la structure schisteuse, et l'absence de réticulations. Il s'agit d'un faciès d'altération d'un schiste envahi par des oxydes et hydroxydes de fer. Ces schistes ferruginisés pourraient constituer un faciès d'éponte.

Par contraste, les faciès typiques des chapeaux de fer présentent tous les intermédiaires caractérisés par la diversité des faciès allant des massifs aux brèches ferrugineuses. Tout comme les roches ferruginisées, ils sont très riches en gœthite et en hématite (plus de 80 %) qui constituent la phase ferrugineuse secondaire dans laquelle sont noyés des quartz et micas résiduels très corrodés et des fragments de roches. La phase ferrugineuse est réticulée et présente deux types de réticulations: des micro et des macro-réticulations. Celles-ci correspondent à l'épigénie de matériaux de natures différentes: les macro-réticulations sont dérivées de quartzites ou de filons de quartz (présence de quartz résiduel dans les grandes réticulations), les micro-réticulations proviendraient d'un autre matériau dont la nature fera plus loin l'objet d'une étude approfondie. Ces divers faciès minéralogiques et texturaux sont parfois organisés en couches concentriques alternées donnant les faciès en cendriers probablement développés à la faveur des fissures existant dans le matériau initial.

Enfin, un faciès particulier de brèche tectonique ferrugineuse se rencontre fréquemment présentant des éléments lithiques plus ou moins ferruginisés, avec les mêmes caractères pétrographiques que décrits ci-dessus, noyés dans une matrice d'oxy-hydroxydes de fer sans texture particulière.

Cependant, la distinction entre les roches ferruginisées et les faciès typiques des chapeaux de fer n'est pas évidente. En effet, dans les schistes ferruginisés peuvent se développer des cendriers et des réticulations de grande taille s'apparentant à des boxworks. Ceci montre qu'il y a donc des termes intermédiaires entre les roches ferruginisées et les chapeaux de fer.

II - Caractérisation minéralogique des faciès ferrugineux par diffraction des rayons X et par les analyses thermiques

A - Par diffraction des rayons X

L'étude minéralogique a été faite par diffraction des rayons X sur roche totale. Elle vient compléter les données pétrographiques. Les résultats sont donnés dans le tableau XXVII sous forme de compositions minéralogiques moyennes par site. Celle-ci a été choisie plutôt que la moyenne par faciès car la composition minéralogique est presque uniforme d'un faciès à l'autre et rares différences observées, caractérisent les sites plutôt que les faciès.

La diffraction des rayons X a confirmé les observations microscopiques, c'est-à-dire une composition minéralogique simple des chapeaux de fer. Les espèces minérales les plus fréquentes sont la goéthite, l'hématite, le quartz et les micas. Goéthite et hématite constituent dans l'ensemble la phase dominante, avec une abondance largement dominante de la goéthite qui est présente dans plus de 60 % et l'hématite dans moins de 40 % des sites. Les micas et les quartz sont très souvent en traces dans ces matériaux, sauf dans les quartzites et dans les schistes ferruginisés.

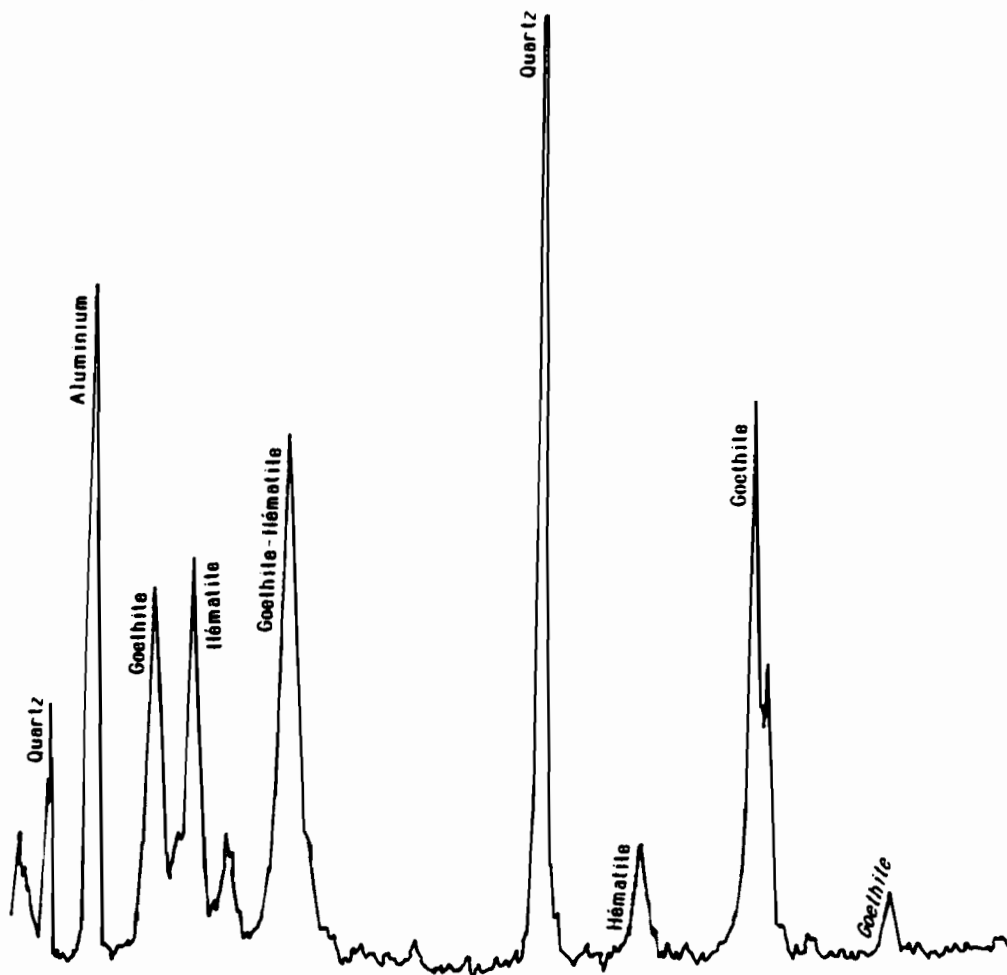


Figure 25 - Diffractogramme RX d'un échantillon de chapeau de fer montrant des pics étroits traduisant le degré de cristallinité de la goéthite et de l'hématite.

Accessoirement, des argiles, des oxydes de manganèse et des minéraux phosphatés et carbonatés ont été déterminés. Les argiles sont la kaolinite détectée en traces sur huit sites. Le psilomélane et la pyrolusite et les minéraux de manganèse mis en évidence sur deux sites (CF 2 et 8). La sidérite et la dolomite ont été déterminées dans les matériaux ferrugineux provenant de deux autres sites (CF-3 et CF-A1).

L'examen des diffractogrammes permet de constater par ailleurs que la goëthite et l'hématite sont très bien cristallisées. Leurs pics caractéristiques (figure 25) sont en effet étroits et sans élargissement à la base, ce qui traduit une cristallinité élevée.

Tableau XXVII - Constitution minéralogique des faciès de chapeaux de fer établie par diffraction des rayons X. (Composition moyenne par site)

Site	Goeth.	Héma.	Quartz	Micas	Divers	Site	Goeth.	Héma.	Quartz	Micas	Divers
CF A	+++		+	Tr		CF B	++	++	Tr	Tr	
CF C	++	++	Tr	Tr		CF D	+++	Tr	Tr	Tr	
CF E	++	++		Tr		CF F	++	++	Tr	Tr	
CF G	++	++	-	Tr	Tr Kaolinite	CF H	++	++	+	Tr	
CF I	+++		Tr	Tr		CF J	++	++	Tr	Tr	
CF K	++	++	+	Tr		CF L	+++	Tr	Tr	Tr	
CF M	+++		Tr	Tr		CF N	++	++	Tr	Tr	
CF O	+++		-	Tr		CF P	+++	Tr	Tr	Tr	Tr Gorcéixite
CF Q	++	++	Tr	Tr		CF R	++	++	+	Tr	
CF S	++	++	-	Tr		CF T	+++	Tr	Tr	Tr	
CF U	+++		-	Tr	Tr Kaolinite	CF V	++	++	-	Tr	Tr Kaolinite
CF W	++	++	-	Tr		CF X	++	++	-	+	
CF Y	+++		Tr	Tr		CF Z	++	++	-	+	
CF A1	++	++	-	+	Tr Dolomite	CF B1	+++		Tr	Tr	
CF C1	++	++	Tr	-		CF D1	+++		+	Tr	
CF G1	+++					CF J1.1	++	++	-	Tr	
CF K1	+++		-	+		CF L1	+++	Tr	Tr	Tr	
CF 1	++	++			Tr Kaolinite	CF 2	++	++	+	+	Pvrol. Psilom.
CF 3	++	++	+	+	Tr Kaol et Sid.	CF 4	+++		+	+	Tr Kaolinite
CF 5	+++		Tr	+		CF 8	++	++	Tr	Tr	Tr Kaol. Pvrol.
CF 11	+++		Tr	+		CF 14	++	++	Tr	Tr	
CF 15	+++		Tr	Tr		CF 16	+++		Tr	+	
CF 17	++	++	-	-		CF 21	+++		+	Tr	Gor.. Wav.. Tur.
CF 62	+++		-	+		CF 81	++	++	+	+	
CF 124	+++		-	-		CF Cascade	++	++	+	+	
Zone Opoblé	+++		+	+		CF Tch.-Tch	+++	-	+	Tr	
CF Tinkro	+++		+	+		CF Dikpél.	++	++	Tr	+	
CF Tchatcham	++	++	-		Tr Kaolinite	CF AB 657	+++		+	Tr	

Légende: +++ = Beaucoup; ++ = Moyen; + = Peu; Tr = Traces;

CF. = Chapeau de fer. Sid. = Sidérite; Gor. = Gorcéixite; Wav. = Wavellite; Tur. = Turquoise; Pvrol. = Pyrolusite; Psilom. = Psilomélane; Tch.-Tch. = Tchoun-Tchoun; Dikpél. = Dikpéléou; Tchacham. = Tchachaminadè.

B - Par analyses thermiques.

L'analyse thermique pratiquée avait pour but de préciser les teneurs en goëthite par dosage des hydroxyles spécifiques. Elle a été réalisée sur dix-huit échantillons sélectionnés d'abord pour couvrir une large gamme d'abondances relatives en goëthite et en hématite et aussi en Zn. Les analyses thermiques pratiquées sont l'analyse thermo-différentielle (ATD) et l'analyse thermo-pondérale (ATP) encore appelée analyse thermo-gravimétrique (ATG). Elles sont effectuées simultanément. Les résultats en sont donnés dans le tableau XXVIII et illustrées par les courbes thermiques de la figure 26.

Tableau XXVIII - Mesures obtenues par l'analyse thermique sur le faciès oxy-hydroxydé des chapeaux de fer et interprétation

N° échantillon	ATD (1)		DTP (2)	ATP (3) (%)	Dosage		
	a (°C)	b (°C)			Goëthite	Hématite	Sidérite
X-4 (7)				Pf t: 2,5 (6)	0	58,4	0
B-1	< 100 280 320		< 100 ? ?	H ₂ O molécu: 3,6 OH hydrox: 3,0 OH argile: 0,0 Pf t: 7,6	25	63,3	0
Q-2	80 310 480		80 350 ?	H ₂ O molécu: 1,1 OH hydrox: 5,7 OH argile: 0,0 Pf t: 9,0	47,5	37,5	0
M-4	60 290 320		60 -	H ₂ O molécu: 1,0 OH hydrox: 5,1 OH argile: 0,0 Pf t: 7,4	42,5	41,7	0
CF3 F4-970	70 300 500		70 -	H ₂ O molécu: 2,0 OH hydrox: 4,6 OH argile: 1,1 Pf t: 8,20	38,3	45	0
CF3 F4-5	75 325 600		300 ?	H ₂ O molécu: 1,4 OH hydrox: 2,9 OH argile: 1,5 Pf t: 5,8	24,2	44,1	0
CF3 F28-NN	< 100 320 740	470	< 100 500 ?	H ₂ O molécu: 2,5 OH hydrox: 2,5 OH argile: 0,0 CO ₂ carbonate: 9,4 ? Pf t: 17,3	24,0	20,7	24,1
CF3 F4-1190	75 310 500		75 -	H ₂ O molécu: 1,4 OH hydrox: 8,5 OH argile: 1,75 Pf t: 13,0	73,3	2,2	0
CF3 F-1	75 330		?	H ₂ O molécu: 1,0 OH hydrox: 6,4 OH argile: 0,0 Pf t: 8,6	53	6,4	0
CF3 F-3	90 300		-	H ₂ O molécu: 2,4 OH hydrox: 6,6 OH argile: 0,0 Pf t: 10,2	55	19,6	0
AB-42	< 100 340		?	H ₂ O molécu: 0,5 OH hydrox: 8,3 OH argile: 0,0 Pf t: 10	70,8	4,2	0
CF4-7	60 330			H ₂ O molécu: 0,9 OH hydrox: 7,8 OH argile: 0,0 Pf t: 9,7	65	9,2	0
CF3 F4-20201	60 320			H ₂ O molécu: 1,0 OH hydrox: 7,6 OH argile: 0,6 Pf t: 10,4	63,3	16,6	0
CF3 F4-1830-35	45 300 480	710	85	H ₂ O molécu: 1,3 OH hydrox: 8,6 OH argile: 0,7 Pf t: 11,8	71,7	16	0
D-3	70 335			H ₂ O molécu: 0,5 OH hydrox: 9,9 OH argile: 0,0 Pf t: 11,4	82,5	9,6	0
CF3 F4-1020	< 100 310 500		< 100	H ₂ O molécu: 1,0 OH hydrox: 10,0 OH argile: 1,5 Pf t: 13,3	83	0,4	0
CF62-3	95 310			H ₂ O molécu: 2,2 OH hydrox: 10,0 OH argile: 0,0 Pf t: 13,6	83	3,1	0
CF16-10	75 340			H ₂ O molécu: 0,6 OH hydrox: 8,4 OH argile: 0,0 Pf t: 10,9	70	8,7	0
Goëthite de référence *	340		315	OH hydrox: 10,1	100	0	0

Légende:

- 1) ATD: a) effet endothermique (départ de l'eau libre et / ou des OH);
 - b) effet exothermique (phénomène d'oxydation ou de cristallisation).
 - 2) DTP: Dérivée thermopondérale.
 - 3) ATP: Perte en poids (exprimée en pourcent).
 - 6) Echantillon très riche en hématite.
- Pf t = Perte au feu totale.

* Goëthite de référence du Sénégal (coll. Blot).

Interprétation

Les effets thermiques enregistrés en ATD correspondent à des pertes de poids mesurées en ATP, il s'agit d'effets endothermiques, sauf dans un cas où il existe un carbonate.

1°) - La première série de pertes comprises entre 0,5 et 3,6 % mesurées en ATP dans tous les échantillons, correspond au départ de l'eau moléculaire qui traduit ainsi l'existence d'une forme hydratée. Ce départ d'eau moléculaire, se traduit par un pic endothermique situé autour de 90-100 °C en ATD.

2°) - En ATP, la seconde série de pertes très variables (2,5 à 10 %), également enregistrées dans tous les échantillons, marque le départ des OH métalliques ou OH constitutifs des hydroxydes métalliques, ici la gœthite. Ce départ des hydroxyles se marque par un large pic endothermique situé ici entre 280 et 340 °C en ATD. Les écarts de température et de pertes de poids sont fonction de la cristallinité et de l'abondance de la gœthite.

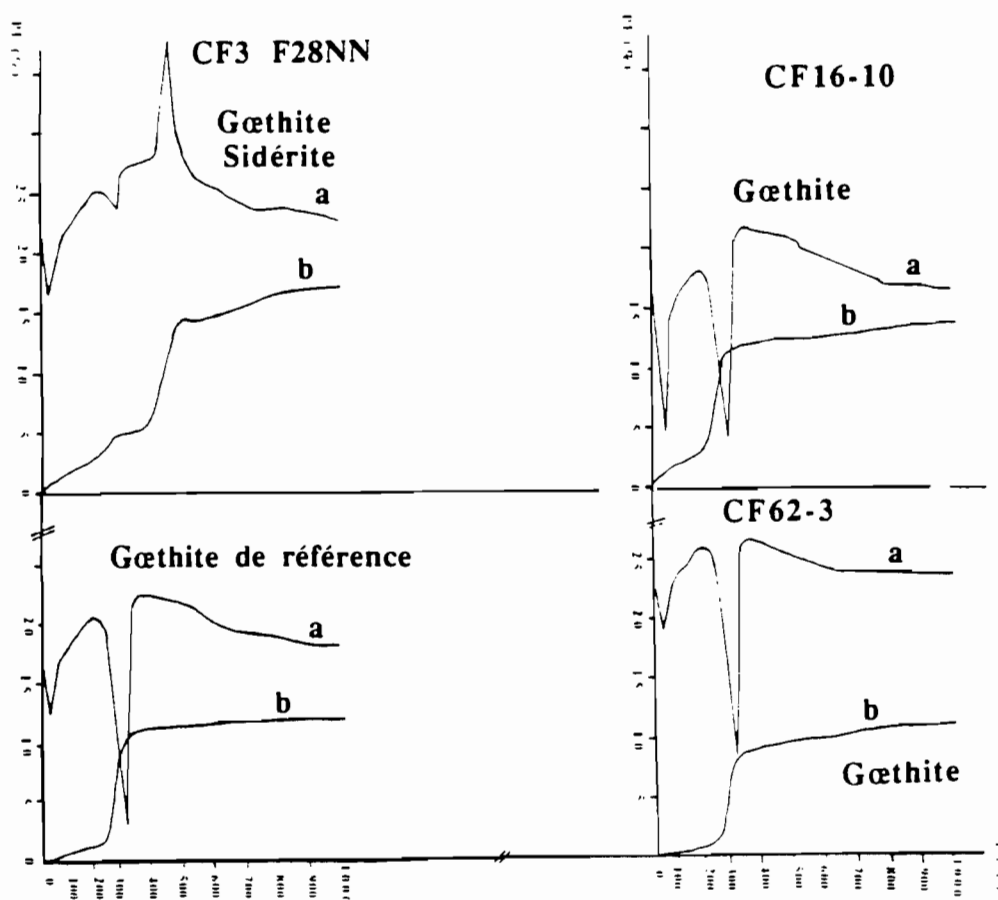


Figure 26 - Courbes d'analyses thermiques sur quelques échantillons de chapeaux de fer du Pagala. a = courbe ATD; b = Courbe; ATP 1).

Les comparaisons sont faites avec une gœthite de référence et avec la composition théorique établie à partir de la formule de la gœthite (Fe_2O_3 : 89,9 %; H_2O : 10,1 %). Il ressort que nous avons des échantillons à gœthite pure et des échantillons contenant des mélanges variables de gœthite et d'hématite.

3°) - La troisième série de pertes, faibles (maximum 1,75 %), notées seulement dans certains échantillons entre 500 et 600 °C, correspond au départ des OH constitutifs des argiles et souligne l'existence de minéraux argileux dans certains de ces échantillons. En ATD, ce départ se traduit par un pic endothermique peu marqué.

4°) - Dans un cas, a été enregistrée à 470 °C, une perte au feu élevée (9,4 %) en ATP, liée à la décarboxylation d'un carbonate, ici la sidérite (CF3 F28-NN), qui s'exprime en ATD par un large pic exothermique.

Un échantillon à hématite seule subit une perte faible (2,5 %) avec un pic endothermique mal marqué et qui est ininterprétable.

L'ATP, en donnant la teneur en hydroxyles liés à la goëthite, permet en principe de connaître l'abondance de celle-ci. Le fer étant par ailleurs dosé, et sachant qu'il se présente presque uniquement sous forme de goëthite et d'hématite, nous pouvons calculer les abondances relatives de goëthite et d'hématite. Les résultats de cette opération ont déjà été présentés dans le chapitre sur les méthodes. Il faut noter que les résultats qu'on peut en attendre sont entachés d'une erreur difficile à apprécier, liée au fait que la teneur en eau de la goëthite peut être supérieure aux 10,1 % théoriques. En prenant cette valeur pour le calcul, on sous-estime donc probablement l'abondance de la goëthite sans qu'on puisse préciser l'erreur ainsi commise.

En résumé, les échantillons analysés présentent donc des teneurs variables en goëthite allant pratiquement de 0 à 100 %. Dans un échantillon, en dehors de la goëthite, un minéral carbonaté (sidérite) a été dosé. Enfin de l'argile est détecté dans quelques échantillons toujours en teneurs faibles.

C - Dosage semi-quantitatif des goëthites et hématites

Il a été vu que le dosage semi-quantitatif des goëthites et hématites dans les matériaux de chapeaux de fer par diffraction des rayons X était validé par les mesures thermogravimétriques. Ce dosage a donc été effectué sur les échantillons de chapeaux de fer pour lesquels les diagrammes de RX remplissent les conditions requises pour une estimation convenable (tableau XXIX et figure 27). Il confirme que les teneurs en goëthite et en hématite varient dans des gammes extrêmement étendues; on rencontre en effet des échantillons presque uniquement goëthitiques ou hématitiques, avec tous les intermédiaires possibles. Cependant, la goëthite est nettement dominante.

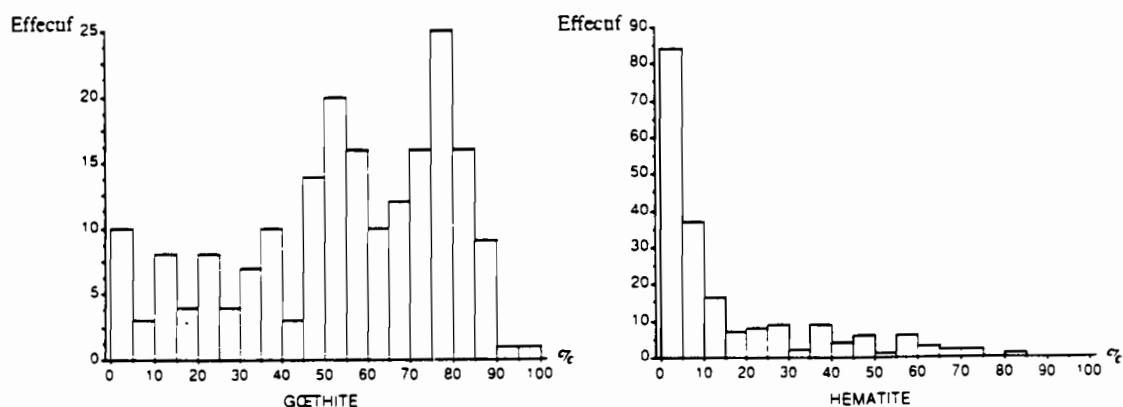


Figure 27 - Distribution des teneurs de goëthite et d'hématite dans les matériaux de chapeau de fer

Tableau XXIX - Estimation semi-quantitative des teneurs en goëthite et en hémate dans les matériaux de chapeaux de fer par couplage de la diffraction des RX à l'analyse chimique

N° CF	N° échant.	Goëth.	Hémat.	N° CF	N° échant.	Goëth.	Hémat.	N° CF	N° échant.	Goëth.	Hémat.
CF-D'	D'-1	36	1	CF-62	62-1	66	5	CF-H'	H'-1	57	0
"	D'-2	79	0	"	62-3	85	0	"	H'-2	4	22
"	D'-4	76	4	"	62-6	50	0	"	H'-3	78	0
CF-124	124-5	72	10	CF-J	J-1	54	22	CF-T	T-1	61	0
"	124-6	77	0	"	J-2	73	0	"	T-3	82	0
CF-F	F-1	53	6	CF-X	X-1	75	2	CF-U	U-1	19	0
"	F-2	72	2	"	X-4	0	58	"	U-3	78	0
"	F-3	54	19	"	X-6	33	0	"	U-5	79	0
CF-W	W-3	71	0	CF-G'	G'-1	88	0	CF-J3	J3-1	59	0
"	W-6	46	5	"	G'-3	81	0	"	J3-2	87	5
"	W-7	57	13	"	G'-5	82	4	"	J3-3	51	0
"	W-8	46	18	"	G'-7	34	1	"	J3-4	53	0
CF-O	O-2	82	0	CF-S	S-1	35	50	CF-V	V-3A	51	36
"	O-6	54	3	"	S-4	55	19	"	V-3B	58	21
"	O-13	45	26	"	S-5	64	6	"	V-5	54	17
CF-P	P-1	64	7	CF-E	E-1	49	27	CF-I	I-2	81	0
"	P-2	81	0	"	E-2	24	45	"	I-3	64	0
"	P-3	76	0	"	E-3	75	6	"	I-4	67	0
CF-K	K-1	55	25	CF-Y	Y-1	75	0	CF-4"	4-1	36	2
"	K-2	20	49	"	Y-3	71	0	"	4-3	57	1
"	K-5	48	1	"	Y-6	49	7	"	4-7	71	3
CF-M	M-4	15	66	CF-Di	Di-1	30	49	CF-B'	B'1	80	7
"	M-5	77	8	"	Di-3	79	11	"	B'4	79	6
CF-L	L-2	83	0	CF-J'	J'-1	27	39	CF-657	AB-36	55	0
"	L-5	51	5	"	J'-6	32	6	"	AB-42	69	5
CF-5	5-3	56	2	CF-16	16-2	46	11	CF-B	B-1	2	83
"	5-4	41	3	"	16-10	86	0	"	B-2	14	64
CF-Q	Q-2	10	71	CF-G	G-1	51	0	CF-K'	K'-3	73	0
"	Q-5	10	55	"	G-2	37	5	"	K'-8	54	4
CF-R	R-4	29	42	CF-C	C-1	59	27	CF-A	A-1	45	13
"	R-6	52	24	"	C-2	18	38	"	A-5	77	0
CF-H	H-2	0	62	CF-11	11-1	69	4	CF-N	N-3	55	23
"	H-4	67	10	"	11-2	70	2	"	N-4	69	4
CF-A'	A'-1	45	19	CF-Tintchr	TIN-2	76	2	CF-Z	Z-3	43	8
"	A'-3A	5	4	"	TIN-3	75	5	"	Z-4	38	23
"	A'-3B	22	25	"	TIN-4	60	8	"	Z-5	28	39
"	A'-5	29	40	"	TIN-5	24	10	"	Z-8	50	19
"	A'-6	10	0	CF-81	TOG-32B	36	25	CF-611	AB-611	71	13
CF-D	D-2	50	11	CF-C'	C'-2	39	34	CF-15	TOG-39	81	1
CF-21	21-2	81	5	CF-17	F4-7	55	3	CF-14	PTOG68-2	21	9
"	21-3	76	5	"	F2-5	0	40	"	TOG-40	53	22
"	21-8	57	5	"	F2-2	64	0				
CF Tchatch	TOG-44	0	7	CF Tchatch	TOG-50	32	56	CF Tchatch	TCHA-51	5	73
"	TOG-45	0	6	"	TCHA-24	44	28	"	TCHA-55-3	36	0
"	TOG-46	81	0	"	TCHA-26	69	8	"	TCHA-58	50	14
"	TOG-47	47	39	"	TCHA-33	61	0	"	TCHA-59	74	0
CF-1	TOG-1B	74	1	CF-1	PTOG-1	12	59	CF-1	PTOG-3	34	34
"	TOG-2	46	39	"	PTOG-2	86	0	"	PTOG-4		
CF-J2	J2-1	60	11	CF-J2	J2-3	95	0	CF-J2	J2-5	82	8
"	J2-2	66	12	"	J2-4	72	0	"	J2-6	68	1
CF-J1	J1-1	22	4	CF-J1	J1-6	0	37	CF-2	F7-1	13	56
"	J1-2	14	58	"	J1-7	24	38	"	F7-2	54	7
"	J1-3	9	62	"	J1-8	77	0	"	F7-3	49	28
"	J1-4	31	9	CF2	TOG-6	61	0	"	F8-2	57	24
"	J1-5	50	37	"	TOG-7	63	0	"	F8-1	85	0
CF-3	TOG-27	92	0	CF-3	F27-35	67	3	CF-3	F27-1235	77	4
"	F4-620	59	9	"	F27-130	78	13	"	F27-1395	59	13
"	F4-1020	82	0	"	F27-250	70	12	"	F27-1700	81	5
"	F4-1140	83	6	"	F27-370	80	12	"	F4-970-125	15	65
"	F4-1190	49	5	"	F27-520	78	4	"	F4-1305-140	85	0
"	F4-1500	74	0	"	F27-670	78	2	"	F4-1830-30	75	6
"	F4-1830	79	8	"	F27-765	86	0	"	F3-1	74	3
"	F4-2010	71	2	"	F27-965	85	0	"	F28-G	79	5
"	F4-2020	54	6	"	F27-1200	3	47	"	F28-NN	46	18
CF Casc.	CASC.-1	36	0	CF Casc.	TOG-17A	67	8	CF Casc.	TOG-18	3	40
"	CASC.-	10	49	"	TOG-17B	68	3	"	TOG-19	35	29
"	CASC.-	22	47								

Note. Sur 318 échantillons de faciès ferrugineux oxydés, seulement 196 figurent dans ce tableau. Les autres n'ont pas été retenus, les conditions de mesures aux RX ne permettant pas pour ceux-ci des estimations à précision convenable.

La figure 27 donne les distributions de goëthite et d'hématite dans les matériaux ferruginisés du tableau XXIX. On remarque que les distributions sont opposées. L'histogramme de distribution de la goëthite présente au moins deux modes bien nets à 52,5

% et 77,5 % de g ethite. Celui des teneurs en hématite est quasi unimodal avec des teneurs presque toujours inférieures à 10 %.

III - Géochimie des faciès oxy-hydroxydés

Tout comme dans le cas des roches primaires, l'étude des faciès ferrugineux est compl et e par une description géochimique basée sur les analyses chimiques multi-élémentaires macroscopiques, et sur les analyses microsituées.

A - Composition chimique des différents faciès ferruginis es

Cette étude porte sur un très grand nombre d'échantillons répartis de la façon suivante: 155 faciès massifs sans structures (FMS), 28 faciès en cendrier (FCE), 39 faciès scoriac es (FSC), 56 brèches ferrugineuses (BF), 5 schistes ferruginis es cloisonnées (SFC), 35 schistes ferruginis es (SF) et 7 ferruginisations   phosphates secondaires. Les produits d'altération des quartzites ferrugineux n'ont pas été analys es.

Afin d'apprécier les anomalies spécifiques à ces faciès ferruginis es, on a cherch e une référence de caractère régional. La meilleure nous a paru être les schistes de la région de Pagala et ceci pour deux raisons : les schistes constituent le faciès lithologique le plus repr esent e dans la région; ses compositions chimiques sont, comme on l'a vu, banales sauf exceptions et peuvent donc être prises comme fond géochimique régional. C'est pourquoi ont été portées dans le tableau XXX les compositions moyennes des schistes pr esent es plus haut, en retenant les m edianses comme étant les meilleurs estimateurs des niveaux moyens de teneurs, pour les raisons déjà exposées. Ces valeurs ont également été reportées sur les diagrammes de la figure 28.

Le tableau XXX met en évidence une disparité extrême entre le faciès phosphat e et les autres. Ce faciès sera par conséquent consid er e séparément des autres.

1 - Compositions chimiques moyennes (sans les faciès phosphat es)

Une comparaison directe de m edianses (tableau XXXI) suffit pour voir qu'il existe des différences, évidemment importantes, entre les faciès ferrugineux oxyd es et les schistes régionaux pris comme référence, différences qui vont pour la plupart dans le même sens pour tous les faciès ferrugineux consid er es.

Certains éléments sont fortement appauvris dans les faciès ferrugineux : Si, Al, Mg, Ti, Na, K, Sr, V, Cr, Sc, Zr, Nb, La, Ce. Cet appauvrissement découle évidemment du fait que la phase silicatée est considérablement raréfiée au profit de la phase ferrugineuse. Les éléments  num er es sont par suite à considérer comme li es préférentiellement à la phase silicatée.

D'autres éléments sont enrichis : Zn qui présentait déjà quelques teneurs élevées dans les schistes, est ici très anormal (15 à 60 fois le fond géochimique, selon les faciès), Fe également (10 fois) ; Mn, P, Ni, Co le sont encore très sensiblement (2 à 5 fois) ; Cu et Y le sont moins nettement (2 fois au plus). Tous ces éléments peuvent être consid er es comme li es préférentiellement à la phase ferrugineuse et comme présentant une tendance anormale généralisée dans ces faciès, plus ou moins forte.

Tableau XXX - Composition chimique moyenne des faciès ferrugineux
(données statistiques élémentaires).

Faciès ferrugineux massif (FMS: 154 éch.) Faciès scoriacés (FSC: 39 éch.)

Elém.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	% Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	% Min.	Max.
SiO ₂	19,3 %	14,7	15,1	78	1	75,3	19,2 %	14,6	16,2	84	3,3	65,7
Al ₂ O ₃	3,3	2,8	1,9	60	0,3	10,9	4,3	3,2	4,2	97	0,4	19,8
MgO	0,3	0,2	0,2	75	< 0,02	1	0,3	0,2	0,2	84	< 0,02	1,3
CaO	0,1	0,1	0,1	86	< 0,2	0,8	0,1	0,1	0,1	53	< 0,2	0,3
Fe ₂ O ₃	65,9	69,6	14,4	22	8,6	96,2	64,0	69,1	13,6	21	29,1	78,7
Mn ₃ O ₄	0,72	0,24	1,23	170	< 0,01	8,36	1,03	0,17	1,66	161	< 0,01	6,93
TiO ₂	0,14	0,12	0,15	101	< 0,02	1,37	0,14	0,10	0,18	135	< 0,02	1,15
Na ₂ O	0,06	0,06	0,05	75	< 0,05	0,42	0,05	0,05	0,03	54	< 0,05	0,11
K ₂ O	0,67	0,51	0,58	87	< 0,05	2,88	0,58	0,46	0,57	97	< 0,05	3,2
P ₂ O ₅	0,51	0,32	0,46	89	< 0,1	2,12	0,69	0,55	0,55	79	< 0,1	2,73
P1000	8,3	8,4	2,5	30	0,3	12,6	9,1	10	2,8	31	1,4	13,2
Sr	19 ppm	9	32	165	< 1	232	57 ppm	14	152	265	1	867
Ba	1119	510	1561	139	2	9500	1773	1000	2161	122	10	9239
V	63	52	52	82	12	520	81	51	149	184	18	963
Ni	202	147	241	119	4	2456	162	102	139	85	10	537
Co	98	64	99	101	< 5	600	104	56	127	122	< 5	641
Cr	90	31	396	442	5	4631	43	30	61	140	12	395
Zn	2130	1107	2866	135	3	19925	1645	697	2177	132	64	10698
Cu	87	37	233	270	4	2680	92	53	92	99	14	403
Sc	8,5	6,2	8	94	0,8	69	10,9	9,4	10,2	94	1,3	43,5
Zr	59	54	29	50	13	160	59	48	51	85	14	334
Nb	6,7	6,7	2,9	43	< 5	15	6,2	5,3	3,6	58	< 5	18
Y	50	29	67	133	1	500	53	32	55	103	5	198
La	17	12	20	120	< 10	184	54	22	-	245	< 10	825
Ce	45	30	88	194	< 10	1038	114	43	294	259	< 10	1815
Eu	1,3	0,5	2,2	175	< 2	18	2,5	1	5,1	206	< 2	32
Yb	4,1	2,4	5,4	130	< 0,1	39	4	2,5	4,6	117	< 0,1	20
Lu	0,4	0,0	0,6	145	< 0,1	2,9	0,3	0	0,4	124	< 0,1	1,5

Faciès en cendrier (FCE: 23 éch.)

Brèches ferrugineuses (BF: 50 éch.)

Elém.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	% Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	% Min.	Max.
SiO ₂	13,2 %	13,7	7,5	57	1,8	30,4	32 %	22,2	22,5	70	3,3	93,8
Al ₂ O ₃	3,7	3,4	1,9	51	< 0,2	9,8	4,3	3,7	2,9	69	< 0,2	12,9
MgO	0,3	0,3	0,2	61	< 0,02	0,7	0,4	0,3	0,3	68	< 0,02	1,2
CaO	0,1	0,1	0,1	75	< 0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	53	< 0,2	0,4
Fe ₂ O ₃	70,7	72,1	8,3	12	48,1	82,9	52,4	59,3	20,4	39	5,7	93
Mn ₃ O ₄	0,68	0,46	0,78	114	< 0,01	2,99	0,89	0,21	2,31	261	< 0,01	16,6
TiO ₂	0,13	0,09	0,10	76	< 0,02	0,36	0,16	0,14	0,14	85	< 0,2	0,71
Na ₂ O	0,05	0,04	0,04	66	< 0,05	0,14	0,06	0,06	0,04	64	< 0,05	0,18
K ₂ O	0,71	0,66	0,50	71	< 0,05	2,12	1,03	0,88	0,86	83	< 0,05	4,19
P ₂ O ₅	0,32	0,28	0,19	60	< 0,1	0,98	0,63	0,4	0,66	105	< 0,1	3,02
P1000	9,5	9,5	1,7	18	5,3	12,8	7,4	8	3,3	44	0,5	19,3
Sr	8 ppm	7	7	79	< 1	33	35 ppm	12	63	183	1	286
Ba	1027	655	1134	110	72	5087	2327	1181	4146	178	35	25900
V	62	55	30	49	28	133	67	49	58	87	16	283
Ni	193	145	112	58	80	518	179	111	176	98	4	817
Co	154	84	246	160	33	1353	105	56	124	118	8	511
Cr	33	30	13	38	15	72	47	34	54	115	5	312
Zn	4041	2807	4061	100	185	16583	2348	1103	3409	145	24	1435
Cu	41	28	51	125	7	266	79	29	180	228	2	1306
Sc	6,7	5,3	3,8	57	3,4	20,6	8,2	7,5	6,2	76	0,3	39,9
Zr	64	57	29	45	30	135	67	61	49	73	2,90	285
Nb	7,8	7,4	2,8	35	< 5	15,3	7,1	7,2	3,4	47	< 5	17
Y	63	42	47	75	13	176	49	33	44	90	2,50	200
La	18	12	24	131	< 10	117	28	18	30	105	< 10	164
Ce	50	37	66	133	< 10	368	79	45	205	258	< 10	1522
Eu	1,8	1	1,9	104	< 2	7,2	1,6	0,8	2	124	< 2	9,8
Yb	6,5	4,9	6,3	97	< 0,1	25	4,3	2,2	5,6	132	< 0,1	26
Lu	0,5	0,4	0,5	94	< 0,1	1,7	0,5	0,4	0,6	135	< 0,1	4,1

Tableau XXX - Suite

Elém.	Schistes ferruginisés (SF: 35 éch.)						Schistes ferruginisés cloisonnés (SFC 5 éch.)					
	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V. %	Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V. %	Min.	Max.
SiO ₂	23,4 %	23,4	11,6	49	1,6	46	14,7 %	14,3	6,1	42	8,34	24
Al ₂ O ₃	7,8	7,5	3,9	50	0,4	16,1	3,2	3,8	1,4	44	1,26	4,6
MgO	0,6	0,6	0,3	55	0,07	1,5	0,2	0,2	0,1	54	0,04	0,3
CaO	0,1	0,1	0	38	< 0,2	0,3	0,1	0,1	0	0	< 0,2	0,1
Fe ₂ O ₃	55,9	55,3	14,4	26	26,94	84,1	71,2	73,2	4,1	6	66,8	75
Mn ₃ O ₄	0,50	0,09	0,87	174	< 0,01	3,58	0,33	0,10	0,46	136	0,08	1,14
TiO ₂	0,26	0,25	0,13	51	< 0,02	0,58	0,16	0,13	0,07	43	0,10	0,27
Na ₂ O	0,15	0,11	0,26	168	< 0,05	1,61	0,06	0,06	0,04	59	< 0,05	0,10
K ₂ O	1,87	1,85	1,09	58	0,09	4,96	0,50	0,59	0,26	51	0,07	0,71
P ₂ O ₅	0,45	0,29	0,49	111	0,10	2,88	0,41	0,37	0,15	36	0,21	0,59
P1000	8,4	8,5	2	24	2,04	12,5	9	10,9	3,5	39	4,18	12,1
Sr	36 ppm	11	64	180	1	278	19 ppm	17	14	71	4,9	35
Ba	1789	822	2406	134	24,2	10315	243	262	163	67	18,7	418
V	86	67	63	73	38	345	121	110	51	42	71,6	205
Ni	117	91	87	74	13	321	169	128	119	71	61	348
Co	58	35	53	92	< 5	233	78	52	70	90	20	191
Cr	68	52	59	87	20	341	78	32	108	139	12,7	270
Zn	2055	1301	2504	122	94	12618	830	771	515	62	130	1552
Cu	78	50	133	170	11,3	785	62	34	70	112	16	182
Sc	13,6	10,2	8,4	62	1,7	37,1	16,1	9,4	18,4	114	4,6	48,6
Zr	87	83	32	37	31,4	175	58	55	19	33	30,2	81
Nb	9	9	3,8	43	< 5	18	5,8	5,1	1,9	33	< 5	8
Y	37	28	28	74	7,3	123	51	36	43	83	13,9	122
La	22	15	21	97	< 10	97	15	13	10	65	< 10	31
Ce	47	35	39	85	12,5	234	40	45	18	44	13,7	60
Eu	1,1	0,5	1,1	105	< 2	5,1	0,7	0,5	0,3	45	< 2	1,2
Yb	3,6	2,7	3,2	90	< 0,1	14	3,3	1	5,5	164	< 0,1	13
Lu	0,5	0,2	0,5	101	< 0,1	1,2	0,3	0	0,6	186	< 0,1	1,3

Phosphates (PH: 7 éch.)

Médiane des schistes (S: 36 éch.)

Elém.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V. %	Min.	Max.	Méd.
SiO ₂	27,8 %	26,2	23,7	85	3,2	68,1	59,6 %
Al ₂ O ₃	18,6	19,3	6,7	36	7,5	30,3	18,8
MgO	0,2	0,2	0,2	97	< 0,02	0,7	1,70
CaO	0,4	0,1	0,6	135	< 0,2	1,6	0,10
Fe ₂ O ₃	22,0	14,3	17,9	81	1,1	48,9	6,10
Mn ₃ O ₄	0,01	0	0,01	79	< 0,01	0,02	0,05
TiO ₂	0,14	0,05	0,20	142	< 0,02	0,56	0,85
Na ₂ O	0,04	0,02	0,03	86	< 0,05	0,11	0,29
K ₂ O	0,61	0,54	0,54	88	0,08	1,71	5,71
P ₂ O ₅	12,6	13	3,87	31	5,27	17,5	0,14
P1000	11,1	11,2	4,4	39	4,2	16,4	4,30
Sr	894 ppm	551	737	82	205	2334	43 ppm
Ba	35385	6750	56509	160	1332	157000	881
V	263	238	143	54	70	536	114
Ni	27	18	29	109	1	85	34
Co	18	15	13	72	6	37	16
Cr	126	112	49	39	84	225	103
Zn	140	125	118	84	21	379	47
Cu	4495	2743	5413	120	13	14249	24
Sc	103	70,1	147	142	3,5	428	16
Zr	36	25	29	81	7	95	188
Nb	8,3	7,6	1,9	23	6,4	10,8	14
Y	255	105	251	98	50	664	26
La	63	32	66	106	20	199	44
Ce	172	115	103	60	87	327	88
Eu	4,7	3,6	3,1	65	2,1	9,9	0
Yb	13	6,2	12	94	1,7	33	2,7
Lu	1,6	0,8	1,7	107	0,2	4,8	0,2

Légende: Moy. = Moyenne; Ec.T. = Ecart - type; C.V. = Coefficient de variation; Méd. = Médiane;

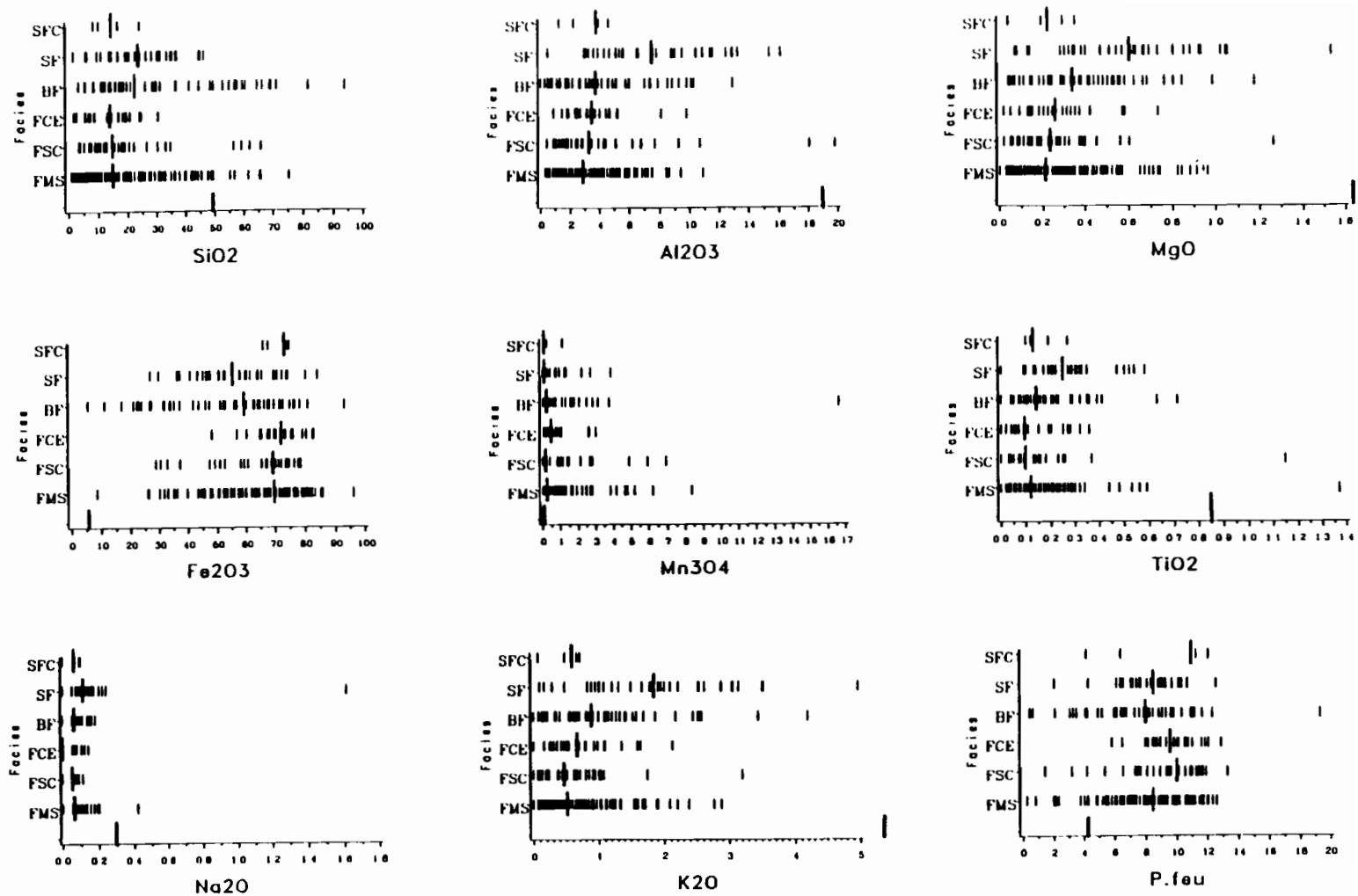


Figure 28 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les différents faciès ferrugineux.

Légende: - Chaque trait vertical représente un échantillon.

- Le trait long porté pour chaque faciès représente la médiane de l'élément dans ce faciès.

- Le trait vertical porté sur l'axe horizontal représente la médiane de l'élément pour les schistes de la région.

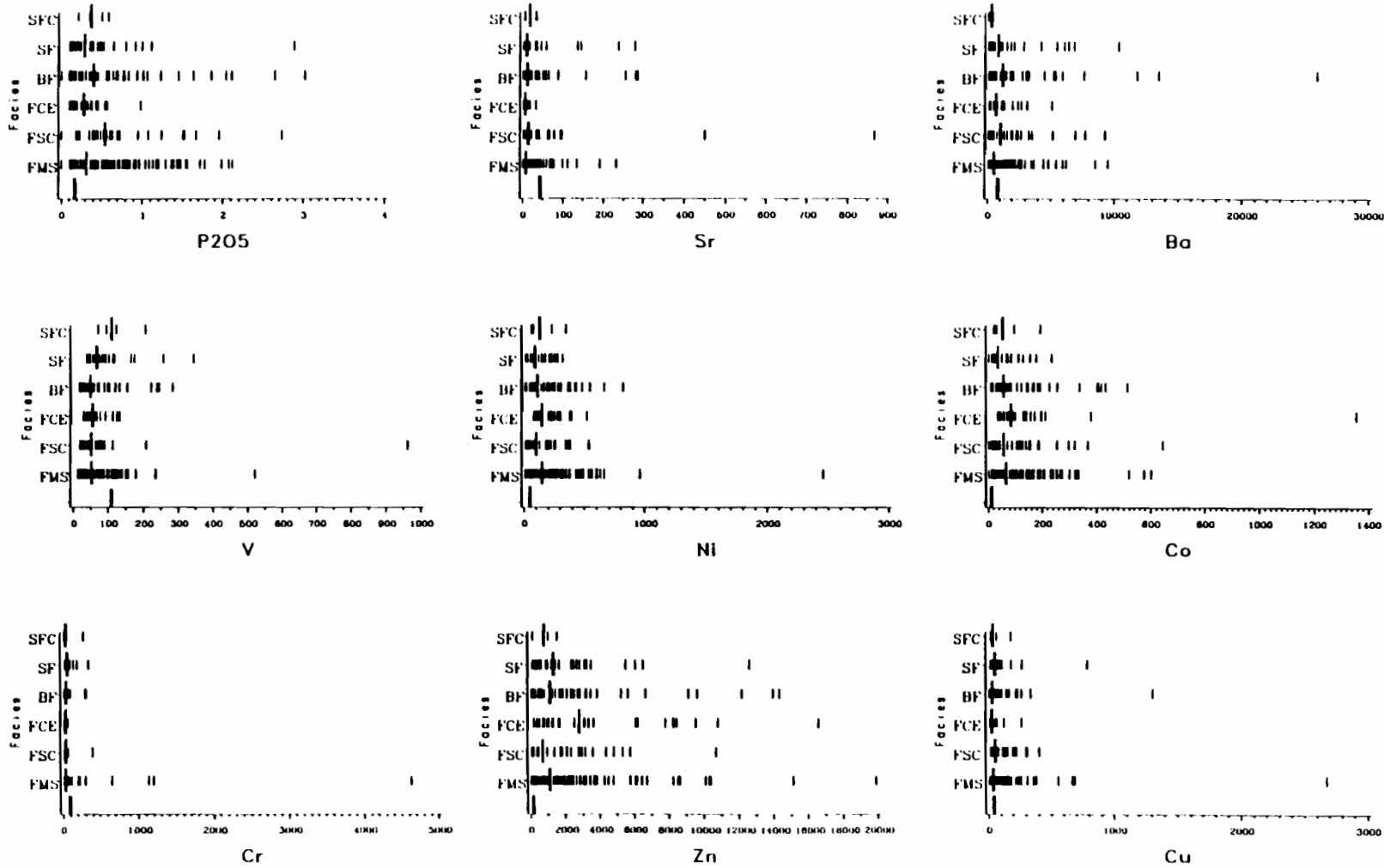


Figure 28 - Suite.

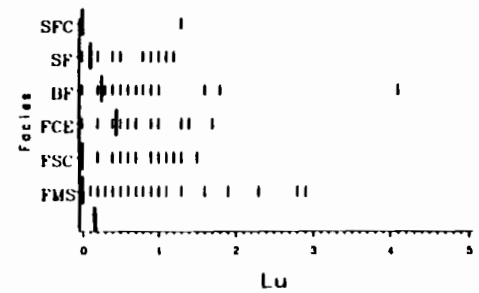
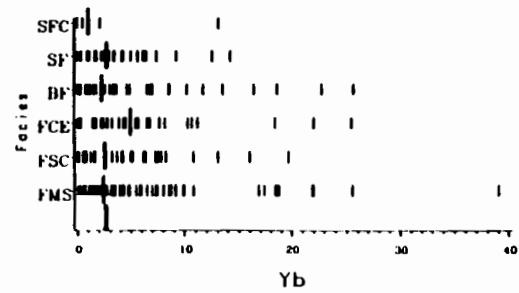
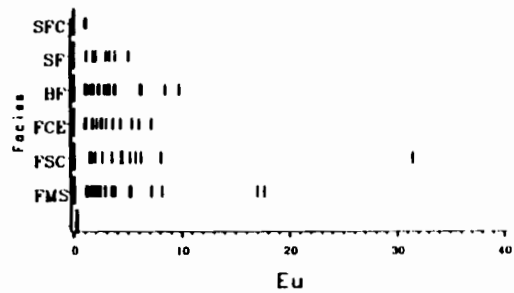
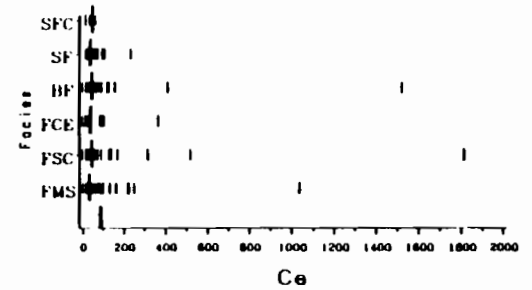
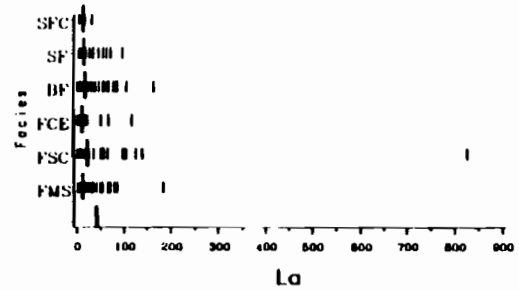
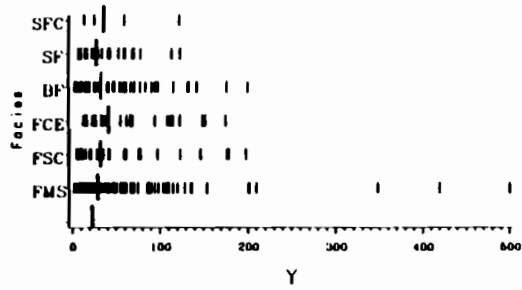
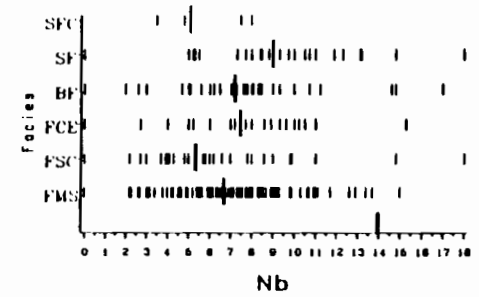
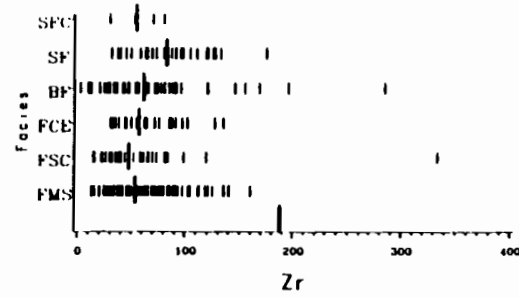
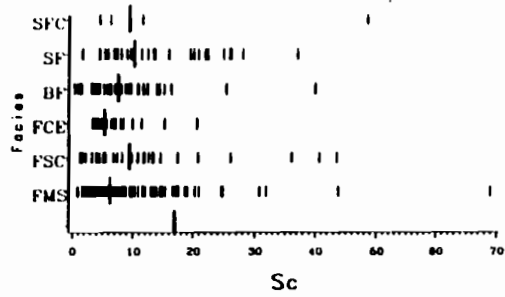


Figure 28 - Suite.

Tableau XXXI - Médianes pour les schistes régionaux et les faciès ferrugineux oxydés;
(dans ce tableau sont rassemblées les médianes pour faciliter la comparaison).

Elém.	Sch.	FMS	FSC	FCE	BF	SF	SFC
SiO ₂	59.6 %	14.7 %	14.6 %	13.7 %	22.2 %	23.4 %	14.3 %
Al ₂ O ₃	18.8	2.8	3.2	3.4	3.7	7.5	3.8
MgO	1.7	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.2
CaO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Fe ₂ O ₃	6.1	69.6	69.1	72.1	59.3	55.3	73.2
Mn ₃ O ₄	0.05	0.24	0.17	0.46	0.21	0.09	0.10
TiO ₂	0.85	0.12	0.10	0.09	0.14	0.25	0.13
Na ₂ O	0.29	0.06	0.05	0.04	0.06	0.11	0.06
K ₂ O	5.71	0.51	0.46	0.66	0.88	1.85	0.59
P ₂ O ₅	0.14	0.32	0.55	0.28	0.40	0.29	0.37
Sr	43 ppm	9 ppm	14 ppm	7 ppm	12 ppm	11 ppm	17 ppm
Ba	881	510	1000	655	1181	822	262
V	114	52	51	55	49	67	110
Ni	34	147	102	145	111	91	128
Co	16	64	56	84	56	35	52
Cr	103	31	30	30	34	52	32
Zn	47	1107	697	2807	1103	1301	771
Cu	24	37	53	28	29	50	34
Sc	17	6	9	5	7	10	9
Zr	188	54	48	57	61	83	55
Nb	14	7	5	7	7	9	5
Y	26	29	32	42	33	28	36
La	44	12	22	12	18	15	13
Ce	88	30	43	37	45	35	45
Eu	0.5	0.5	1.0	1.0	0.8	0.5	0.5
Yb	2.7	2.4	2.5	4.9	2.2	2.7	1.0
Lu	0.2	0.0	0.0	0.4	0.4	0.2	0.0

2 - Anomalies et distributions des teneurs comparées entre les faciès (hormis les phosphates)

Les anomalies, parfois extrêmes, sont nombreuses pour un certain nombre d'éléments et confèrent à ceux-ci une distribution étalée et dissymétrique bien visible sur les diagrammes de la figure 28. Ces dispersions importantes rendent hasardeuses les comparaisons des faciès en termes de teneurs. Il peut être par contre intéressant de chercher si les anomalies qu'on y rencontre diffèrent d'un faciès à l'autre. C'est ce qu'on tente de faire dans ce qui suit.

Si l'on convient de considérer comme sûrement anormales les teneurs supérieures d'un ordre de grandeur au moins au fond géochimique, soit plus de 10 fois la médiane des schistes, les éléments présentant des anomalies sont beaucoup plus nombreux que ceux pour lesquels ont été reconnus plus haut une tendance anormale généralisée. Des anomalies repérées selon le critère indiqué ci-dessus se rencontrent en effet pour 16 éléments : Fe, Mn, P, Sr, Ba, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Y, La, Ce, Eu, Yb, Lu.

Le comptage du nombre d'anomalies sur ces 16 éléments (tableau XXXII) permet une comparaison entre les éléments et entre les faciès.

Pour les 318 échantillons considérés dans ce tableau, on note que Fe et Zn montrent plus de 200 anomalies, Mn plus de 100, Ni et Co environ 50, P, Cu et Eu environ 20 ; les autres éléments ne montrent que quelques anomalies, 6 au maximum. Ce comptage permet donc d'établir une hiérarchie entre les éléments par la fréquence décroissante de leurs anomalies : Fe-Zn, Mn, Ni-Co, P-Cu-Eu, Ba-Lu, et on retrouve bien évidemment la liste des éléments identifiés comme enrichis dans les faciès à oxydes et hydroxydes de fer.

Tableau XXXII - Comptage du nombre d'anomalies par faciès définies comme 10 fois supérieures à la médiane dans les schistes régionaux.

	Réf. 0x méd	FMS (155)		FSC (39)		FCE (28)		BF (56)		SF (35)		SFC (5)		nb total
		nb	%	nb	%	nb	%	nb	%	nb	%	nb	%	
Fe	61.0	113	72.9	27	69.2	24	85.7	26	46.4	13	37.1	5	100	208
Mn	0.5	59	38.1	16	41.0	12	42.9	20	35.7	9	25.7	1	20	117
P	1.4	11	7.1	5	12.8	0.0	0.0	7	12.5	1	2.9	0.0	0.0	24
Sr	430	0.0	0.0	2	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
Ba	8800	1	0.6	1	2.6	0.0	0.0	3	5.4	1	2.9	0.0	0.0	6
Ni	340	24	15.5	6	15.4	3	10.7	10	17.9	0.0	0.0	1	20	44
Co	160	28	18.1	7	17.9	6	21.4	12	21.4	2	5.7	1	20	56
Cr	1030	3	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
Zn	470	115	74.2	23	59.0	26	92.9	38	67.9	26	74.3	4	80	232
Cu	240	9	5.8	3	7.7	1	3.6	3	5.4	2	5.7	0.0	0.0	18
Y	260	3	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
La	440	0.0	0.0	1	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Ce	880	1	0.6	1	2.6	0.0	0.0	1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3
Eu	5	7	4.5	5	12.8	3	10.7	4	7.1	1	2.9	0.0	0.0	20
Yb	27	1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Lu	2	5	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	6

Légende : nb = nombre d'anomalies; % = pourcentage du nombre d'anomalies par rapport au nombre d'échantillons.

Les faciès montrent également des différences à ce point de vue : dans les faciès ferrugineux massifs sans structure (FMS), 14 éléments sur les 16 montrent des anomalies alors que, à l'autre extrême, dans les faciès cendriers (FCE) on n'en dénombre que 7. Ce peut être là un effet statistique résultant de la différence des nombres d'échantillons, respectivement 155 et 28. Mais le faciès cendrier apparaît quand même bien comme particulier : c'est lui, en effet, qui montre les plus fortes proportions d'échantillons anomaux pour Fe, Mn et Zn. On peut noter de même que c'est dans les brèches ferrugineuses qu'on rencontre les plus forts pourcentages d'anomalies en Ba et Ni et dans les faciès scoriacés que les anomalies en P, Sr, Cu, Eu sont les plus fréquentes.

En revenant aux diagrammes de distribution comparés de la figure 13, on peut encore noter certaines originalités des divers faciès.

- Le faciès FMS est celui où l'on note les plus fortes anomalies en Ni, Cr, Zn, Cu, Sc, Y, Yb. L'effet statistique dû au fait que ce faciès est le plus échantillonné peut expliquer en partie cette originalité. Pour Cr et Y cependant, le fait que toutes les fortes teneurs se rencontrent dans ce faciès marque bien une particularité.

- Le faciès FCE présente moins de teneurs très élevées que les autres (SFC excepté) en Si, Mn, Ti, K, P, Sr, Ba, V, Cr, Cu, Sc, Zr et aussi les plus fortes médianes en Fe, Zn, Mn, ainsi qu'en Y, Yb, Lu et la plus forte anomalie en Co (1300 ppm). Ce faciès apparaît donc comme particulièrement "propre", non seulement en éléments préférentiellement liés aux micas, Si, Ti, K, V, Cr, Sc, Zr, mais aussi en divers éléments à tendance anormale, P, Ba, Cu.

- Le faciès BF, riche en Si, possède aussi les teneurs les plus élevées en Mn (17 %), P, Ba (les 3 plus fortes teneurs, se trouvent ici), Lu ; une des deux plus fortes teneurs en Cu (1300 ppm) est aussi dans ce faciès.

- Le faciès SF est naturellement celui qui montre les plus fortes médianes et souvent aussi le plus grand nombre de teneurs élevées, en Al, Mg, Ti, Na, K, Sc, Zr, Nb, éléments liés aux micas.

- On ne peut rien dire du faciès SFC à ce point de vue, le nombre d'échantillons étant trop faible.

Résumé sur les faciès ferrugineux oxydés non phosphatés

Si on les compare à la composition des schistes encaissants, assimilés à un fond géochimique régional, les faciès ferrugineux oxydés se révèlent généralement anomaux en 8 éléments : très forte anomalie dans tous les faciès pour Fe et Zn ; anomalie moins marquée pour Mn, P, Ni, Co ; anomalie discrète mais également systématique pour Cu et Y. Il est à souligner que l'ensemble des faciès ferruginisés a des teneurs relativement basses en Ti, V, Cr, ce qui est un trait original de ces matériaux.

Les teneurs anormales (par convention, plus de 10 fois le fond géochimique) se rencontrent en outre pour de nombreux éléments. Ce sont, dans l'ordre du nombre décroissant d'anomalies rencontrées, tous faciès confondus : Zn, Fe (plus de 200 anomalies sur 318 mesures), Mn (plus de 100), Ni, Co (environ 50), P, Cu, Eu (environ 20), Ba, Lu (6), Cr, Ce (3), Sr, La, Yb (moins de 3). Le comptage des anomalies fait aussi apparaître des différences entre les faciès. En particulier le faciès cendrier est original : c'est celui qui présente le plus fort pourcentage d'échantillons anomaux en Fe, Zn et, moins nettement, Mn, mais aussi le moins d'éléments anomaux, 7 seulement (au lieu de 14 pour le faciès massif sans structures).

Enfin, l'examen des distributions met en relief des caractères particuliers de certains faciès qui méritent d'être notés, bien qu'ils ne soient pas statistiquement assurés. C'est ainsi que, conformément à ce qui précède, le faciès cendrier apparaît comme particulièrement riche en Fe et Zn, et relativement pauvre par ailleurs en d'autres anomalies. Un autre ensemble d'anomalies apparaît marquer plus particulièrement les brèches ferrugineuses : P, Ba, Lu et aussi Cu et Mn. Ces distinctions sont intéressantes car on verra qu'elles correspondent à des tendances géochimiques générales qui seront étudiées dans le chapitre de géochimie.

Par contre, les schistes ferruginisés ne se distinguent pas nettement dans l'ensemble des différentes familles de faciès ce qui traduit l'absence de vraie coupure entre les schistes ferruginisés et les chapeaux de fer.

Les faciès ferrugineux phosphatés

Les faciès phosphatés présentent des anomalies très différentes de celles des autres faciès ferrugineux. On les voit très bien sur le tableau XXX : teneurs extrêmement élevées en P, Ba, Cu ; fortes anomalies en Sr, Sc et Y ; anomalies modérées en Zn et T.R., surtout les plus lourdes (Eu, Yb, Lu). On ne rencontre pas dans ces faciès les anomalies en Mn, Ni, Co qui sont très fréquentes dans les autres faciès ferrugineux.

B - Analyses ponctuelles

Dans ce type de matériaux, le but des analyses ponctuelles était surtout de préciser la teneur en Zn, principal élément anormalique, des divers faciès de goëthite et d'hématite, les deux phases minérales essentielles, préalablement définies au microscope d'après leur texture, leur couleur et leur situation par rapport au réseau réticulé. Par ailleurs, quelques minéraux accessoires ont été analysés ; c'est le cas de la muscovite, et des oxydes de manganèse. Dans le tableau XXXIII, sont rassemblées les analyses ponctuelles présentées sous forme de moyennes par type de minéral et par échantillon.

1 - Composition moyenne des divers minéraux

De l'examen de ces tableaux, on peut tirer un certain nombre d'informations

1°) - Les oxy-hydroxydes de fer, toutes formes minéralogiques et habitus confondus, sont riches en impuretés diverses et tout particulièrement en Si, Al, P, Mn, Zn et Pb. On

Tableau XXXIII - Composition chimique des oxy-hydroxydes de fer (gœthites et hématites et de quelques minéraux accessoires des chapeaux de fer; résultats d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique CAMEBAX et LINK*

a) Minéraux oxy-hydroxydés de fer

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Oxy-hyd.	TOG 27 (5)	n.d.		1,0	3,7	-		n.d.				72,26	n.d.		0,2	n.d.	
"	TOG 13-4 (3)	"		0,5	1,5	-		"			0,2	80,03	"		1,2	"	
"	TOG 48 (5)	"		1,9	2,4	0,23	0,1	"	0,1	0,1	0,1	73,7	"			"	0,6
"*	TOG8 (3)	0,4	0,1	0,6	2,5	1,4			0,05		0,1	83,7	0,04	0,1			0,1
"*	C - 3 (8)	0,5	0,1	0,8	1,5	0,2		0,1	0,1	0,04	0,7	95,2					
"*	TOG6 (3)	0,6	0,2	0,9	1,2	1,6		0,04	0,05			92,8	0,09	0,2			
"*	Y - 4 (2)	1	0,3	4,0	4,3	0,3		0,1	0,03			88,7		0,3			
Matr. fer.*	UN-1 (3)			8,3	1,7	7,5						79,2					
Gœth. sp.*	S-5 (10)			1,3	2,8	1,7			0,1		0,7	91,2					
A Héma.	PTOG70A (8)	"	0,1	1,0	3,3	0,08	0,1	"	0,2		1,5	75,25	"		0,2	"	
A Héma.	PTOG70B (1)	"	0,1	0,7	4,3	0,18		"	0,4		3,3	65,82	"		0,7	"	
B Héma.	PTOG70A (16)	"	0,1	0,1	2,5	0,08	0,1	"	0,2		0,4	80,7	"		0,2	"	0,3
B Héma.	PTOG70B (7)	"	0,04	0,2	2,1	0,25	0,1	"	0,2		0,7	80,58	"		0,1	"	0,1
C Héma.	PTOG70A (4)	"		0,1	1,4	0,22		"	0,2		0,3	81,58	"		0,1	"	0,1
D Héma.	TOG30 (2)	"		0,2	0,7	0,10	0,3	"			0,1	82,14	"		0,4	"	0,1
D Héma.	TOG13-4 (1)	"		0,2	0,8		0,4	"			0,3	88,02	"		0,7	"	
E Héma.	PTOG70B (5)	"	0,1	0,2	1,4	0,20	0,1	"	0,1		0,6	77,92	"		0,2	"	0,2
E Héma.	TOG30 (3)	"		0,6	1,7	0,16	0,4	"				82,69	"		0,2	"	
E Héma.	TOG13-1 (7)	"		0,1	0,6	0,06	0,5	"			0,6	88,8	"		1,3	"	0,1
E Héma.	TOG13-4 (2)	"	0,1	0,4	0,5	0,04	0,4	"			1,6	81,58	"	0,06	2,2	"	
F Héma.	TOG13-1 (2)	"	0,03	0,01	0,6	0,05	0,3	"			0,2	88,46	"		0,2	"	
G Héma.	TOG30 (7)	"			1,3		1,3	"			0,7	75,03	"		1,2	"	0,1
H Gœth.	TOG30 (2)	"			2,1	0,13		"			0,2	76,7	"		1,3	"	
I Gœth.	TOG30 (6)	"	0,1	1,0	1,9	0,33	0,1	"	0,1		0,2	79,14	"		0,8	"	0,1
J Gœth.	TOG13-4 (4)	"		0,6	1,6	0,63		"	0,1		0,1	76,7	"	0,04	1,2	"	0,1
K Gœth.	TOG30 (3)	"	0,05	0,3	2,0	0,04	0,3	"				73,04	"	0,05	0,2	"	0,2
K Gœth.	TOG13-1 (9)	"	0,03	0,4	1,2	0,03	0,3	"	0,02	0,01	1,2	71,81	"	0,03	1,4	"	0,1
K Gœth.	TOG13-4 (2)	"	0,1	0,1	0,9	0,14	0,3	"	0,1			64,71	"	0,13	1,4	"	
L Gœth.	TOG30 (5)	"	0,04	0,1	1,8		0,1	"			0,1	72,15	"		1,1	"	0,7
L Gœth.	TOG13-4 (3)	"		0,3	2,1	0,11	0,2	"				79,36	"		1,1	"	0,2
M Gœth.	TOG13-4	"		0,2	2,1	0,80		"	0,1			79,58	"		1,3	"	
N Gœth.	TOG13-4 (2)	"	0,8	6,6	8,7	0,20	0,2	"			0,1	69,93	"		0,9	"	0,1
O Gœth.	TOG30 (5)	"	0,1	1,0	2,6		0,2	"	0,1		25,7	49,62	"	0,06	0,7	"	
Q	PTOG70A (5)	"	0,04	1,2	1,1	0,06	0,3	"	0,4	0,2	45,6	9,76	"	0,06	0,2	"	1,8
Q*	S-5 (6)			1,4	0,7	-		0,2	0,3		76,0	0,7					17,7
Dend. Mn*	S-5 (2)			10,3	2,5	-		0,5	0,9		64,3	5,2				9,8	1,03

Tableau XXXIII - Suite.

b) Autres minéraux

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO	Si/Al
Muscov.*	TOG8 (1)	0,4	3,	31,0	51,0	-	-	11,0	-	0,30	0,1	2,0	-	0,1	-	0,4	-	1,6
**	C - 3 (3)	0,8	3,0	31,8	51,0	-	-	9,5	-	0,35	0,1	1,4	-	-	-	0,3	-	1,6
**	Y - 4 (2)	0,6	4,6	28,1	54,7	-	-	9,5	-	0,28	-	0,7	-	-	0,1	0,3	-	1,9
**	UN-1 (4)	-	3,8	28,4	47,0	-	-	9,0	-	-	-	5,6	-	-	-	4,4	-	1,6
**	TOG 23B (2)	-	3,0	31,1	50,4	-	-	9,7	-	-	-	0,2	-	-	-	3,1	-	1,6
Crandalit*	TOG 23A (9)	-	-	44,0	-	37,2	-	-	14,5	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-
Wavellit*	TOG 23A (5)	-	-	48,0	-	50,2	-	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-
**	TOG 23A (8)	n. d.	n. d.	48,0	3,0	44,8	-	-	-	n. d.	n. d.	2,3	n. d.	1,8	n. d.	-	n. d.	-
Wavellit?*	UN-1 (3)	-	-	36,5	-	58,5	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	-	-
Wa. - Cu?*	AB 695 (6)	-	-	45,1	-	47,2	-	-	-	-	-	2,8	-	3,1	-	-	-	-
**	TOG 23A (7)	-	-	42,8	2,7	43,4	-	-	-	-	-	5,3	-	4,2	-	-	-	-
Turquoise*	TOG 23B (11)	-	-	40,8	-	44,9	-	-	-	-	-	4,1	-	8,3	-	-	-	-
**	TOG 23B (3)	n. d.	n. d.	41,1	2,6	40,9	0,2	-	-	n. d.	n. d.	4,8	n. d.	10,1	n. d.	-	n. d.	-
Gorcéixit*	TOG 23B (10)	-	-	33,4	1,6	26,8	2,3	-	-	-	-	4,4	-	-	-	29,4	-	-
**	UN-1 (1)	-	-	32,7	-	29,8	1,6	-	1,5	-	-	6,0	-	-	-	26	-	-
**	TOG 23B (3)	n. d.	n. d.	27,3	4,2	29,3	1,4	-	1,7	n. d.	n. d.	7,2	n. d.	0,2	n. d.	18,7	n. d.	-
Gor. à Fe?*	TOG 23B (3)	-	-	28	2	22,4	1,3	-	-	-	-	25,0	-	1	-	17	-	-
Ph. de Fe?*	TOG 23A (4)	-	-	9,2	0,6	7,5	-	-	-	-	-	81,0	-	-	-	-	-	-
**	AB 695 (1)	-	-	8,5	0,6	7,24	-	-	-	-	-	81,5	-	-	-	-	-	-
Ooli(noy)*	UN-1 (6)	-	-	13	3,8	11,5	-	-	-	-	-	64,1	-	-	-	-	-	-
Ooli(cort)*	UN-1 (9)	-	-	29	4	45	-	-	-	-	-	20,0	-	-	-	-	-	-
**	AB 695 (1)	-	-	37,4	-	36	-	-	-	-	-	22,0	-	2,3	-	-	-	-
Wa. alt.**	TOG 23A (5)	n. d.	n. d.	8,5	1,9	6,3	-	-	-	n. d.	n. d.	83,1	n. d.	-	n. d.	-	n. d.	-
Gor. alt.**	TOG 23B (1)	n. d.	n. d.	23,8	14,9	11,6	1,2	2,3	0,4	n. d.	n. d.	40,1	n. d.	0,4	n. d.	5,6	n. d.	-
Rutile*	UN-1 (1)	-	-	2,4	0,3	2,64	-	-	-	88,2	-	7,0	-	-	-	2,28	-	-

Légende: Les analyses avec: * ont été faites à Bondy; ** à Strasbourg; les autres à Nancy; n.d. = non dosé; .

Oxy-hyd. = Oxy-hydroxydes de fer; [A, B, C, D, E, F, G] = Différents faciès d'hématite et [H, I, J, K, L, M, N, O, P] = Divers faciès de goethite: A = Hématite fibroradiée en rosettes; B = Hématite fibroradiée microcristalline; C = Hématite microcristalline sans texture; D = Hématite microcristalline sans texture; E = Hématite de paroi de grande réticulation; F = Hématite de paroi de petite réticulation; G = Goethite microcristalline jaune de paroi de petite réticulation; H = Goethite cryptocristalline brune sans texture; I = Goethite microcristalline peu nette de paroi de réticulation; J = Goethite microcristalline de petite réticulation; K = Goethite microcristalline de cavité de grande réticulation; L = Goethite fibroradiée macrocristalline; M = Goethite cryptocristalline de paroi résiduelle; N = Goethite cryptocristalline de paroi de petite réticulation; O = Goethite manganésifère; Q = Oxydes de manganèse; Muscov. = Muscovite; Goeth. sp. = Goethite sphérolitique; Dend. Mn. = Oxydes de manganèse en dendrites; Wa. - Cu? = Wavellite à substitution en Cu?; Gor. à Fe? = Gorcéixite à substitution en Fe?; Phosp de Fe = Phosphates alumineux à substitution en Fe?; Matr. ferrug. = Matrice ferrugineuse englobant les pisolites phosphatés; Oolit = oolite phosphaté; Wa. alt. = wavellite altérée; Gorc. alt. = gorcéixite altérée.

voit que dans cette liste figurent des éléments qui sont par ailleurs notoirement en anomalies dans les chapeaux de fer.

- **Zn** est abondant dans les oxy-hydroxydes dans toutes les analyses faites à la CAMEBAX, sauf une, avec des teneurs moyennes souvent supérieures à 1 %, (le maximum mesuré est 3,7 %). L'exception est l'échantillon TOG 48, où Zn n'est pas détecté; c'est par ailleurs un échantillon particulier puisqu'il vient de Tchatchaminadé où l'anomalie en Zn est faible. Zn n'est pas détecté non plus dans les oxy-hydroxydes de fer analysés à la microsonde LINK. Les échantillons correspondant n'étant pas par ailleurs particuliers, la non détection de Zn est probablement due à une sensibilité insuffisante de l'appareil.

- **P** et **Mn** sont détectés très souvent, mais moins fréquemment et en teneurs plutôt moindres que Zn.

- **Pb** est très souvent mesurable avec des teneurs moyennes dépassant parfois 0,5 % (maximum dosé: 2,7 %).

- **Cu** enfin apparaît parfois, mais avec des teneurs trop faibles pour être considérées comme certainement significatives.

Il est intéressant de noter qu'il n'apparaît pas de différences systématiques entre les différents habitus d'un même minéral. C'est ainsi que les hématites fibroradiées (A, B dans le tableau XXXIII a) ne semblent pas différer des autres. De même les goethites fibroradiées (L dans le tableau), malgré leur caractère très particulier, ne diffèrent pas des goethites micro ou cryptocristallines; les deux types ont en particulier les mêmes teneurs en Zn.

Il est surprenant de détecter du S dans presque tous les oxy-hydroxydes de fer, avec des teneurs parfois élevées (jusqu'à 1,3 % en moyenne) pour des matériaux aussi oxydés.

2°) - Les oxydes de manganèse ont fourni à coté de Mn (45 % MnO), environ 10 % de Fe₂O₃, 2 % de PbO et 1 % de SiO₂ et de Al₂O₃. Dans un échantillon, du psilomélane titrant 64 à 76 % de MnO et 9 à 18 % de BaO a été mis en évidence. Il renferme par ailleurs des impuretés en Si, Al et Fe.

D'autre part, des goethites manganésifères analysées ont donné des teneurs en Fe et Mn respectivement 50 % de Fe₂O₃ et 25 % de MnO environ; celles-ci contiennent en outre des impuretés systématiquement en Si, Al et parfois en Zn, S, Ca, Cu et en Mg.

3°) - Les muscovites analysées présentent, pour leurs trois principaux constituants (Si, Al et K), des teneurs peu différentes: de 47 à 55 % pour SiO₂ avec une moyenne de 51 %; 28 à 32 % pour Al₂O₃, moyenne 30 %; 9 à 11 % pour K₂O, moyenne 9,7 %. Elles présentent aussi des rapports SiO₂ / Al₂O₃ élevés compris entre 1,6 et 1,9, avec une moyenne de 1,7 comme dans les roches primaires. Elles sont riches en Fe et surtout en Mg avec respectivement des teneurs moyennes de 2 % et 3,5 %. Ba y a été détecté de façon systématique, les plus fortes valeurs voisines de 4 % de BaO étant observées dans les muscovites des échantillons phosphatés. Il s'agit des muscovites roses ou pink muscovites décrites plus haut. Enfin, des teneurs très faibles en Ti, Mn et en Cu ont été parfois enregistrées.

4°) - Les minéraux phosphatés sont très variés et présentent des compositions chimiques très diverses. Il s'agit de phosphates de Al et / ou de Fe. Les phosphates de Al sont de type wavellite avec 37 à 48 % de Al₂O₃ et 45 à 50 % de P₂O₅. Ces phosphates de Al sont d'autre part caractérisés par:

- l'abondance de Cu, sauf dans les échantillons AB-695 et TOG-23A; il s'agit de turquoise;

- l'abondance de Ba dans les échantillons TOG-23B et UN-1; c'est la gorcéixite avec une composition chimique variant entre 27 et 29 % pour P₂O₅, 33 % pour Al₂O₃, 26 et 29 % pour BaO;

- l'abondance de Ca dans l'échantillon TOG-23A montre qu'il s'agit de crandallite avec une composition chimique moyenne de 37 % de P₂O₅, 44 % de Al₂O₃, 14 % de CaO et 2,5 % de BaO.

voit que dans cette liste figurent des éléments qui sont par ailleurs notoirement en anomalies dans les chapeaux de fer.

- **Zn** est abondant dans les oxy-hydroxydes dans toutes les analyses faites à la CAMEBAX, sauf une, avec des teneurs moyennes souvent supérieures à 1 %, (le maximum mesuré est 3,7 %). L'exception est l'échantillon TOG 48, où Zn n'est pas détecté; c'est par ailleurs un échantillon particulier puisqu'il vient de Tchatchaminadè où l'anomalie en Zn est faible. Zn n'est pas détecté non plus dans les oxy-hydroxydes de fer analysés à la microsonde LINK. Les échantillons correspondant n'étant pas par ailleurs particuliers, la non détection de Zn est probablement due à une sensibilité insuffisante de l'appareil.

- **P** et **Mn** sont détectés très souvent, mais moins fréquemment et en teneurs plutôt moindres que Zn.

- **Pb** est très souvent mesurable avec des teneurs moyennes dépassant parfois 0,5 % (maximum dosé: 2,7 %).

- **Cu** enfin apparaît parfois, mais avec des teneurs trop faibles pour être considérées comme certainement significatives.

Il est intéressant de noter qu'il n'apparaît pas de différences systématiques entre les différents habitus d'un même minéral. C'est ainsi que les hématites fibroradiées (A, B dans le tableau XXXIII a) ne semblent pas différer des autres. De même les goethites fibroradiées (L dans le tableau), malgré leur caractère très particulier, ne diffèrent pas des goethites micro ou cryptocristallines; les deux types ont en particulier les mêmes teneurs en Zn.

Il est surprenant de détecter du S dans presque tous les oxy-hydroxydes de fer, avec des teneurs parfois élevées (jusqu'à 1,3 % en moyenne) pour des matériaux aussi oxydés.

2°) - Les oxydes de manganèse ont fourni à coté de Mn (45 % MnO), environ 10 % de Fe₂O₃, 2 % de PbO et 1 % de SiO₂ et de Al₂O₃. Dans un échantillon, du psilomélane titrant 64 à 76 % de MnO et 9 à 18 % de BaO a été mis en évidence. Il renferme par ailleurs des impuretés en Si, Al et Fe.

D'autre part, des goethites manganésifères analysées ont donné des teneurs en Fe et Mn respectivement 50 % de Fe₂O₃ et 25 % de MnO environ; celles-ci contiennent en outre des impuretés systématiquement en Si, Al et parfois en Zn, S, Ca, Cu et en Mg.

3°) - Les muscovites analysées présentent, pour leurs trois principaux constituants (Si, Al et K), des teneurs peu différentes: de 47 à 55 % pour SiO₂ avec une moyenne de 51 %; 28 à 32 % pour Al₂O₃, moyenne 30 %; 9 à 11 % pour K₂O, moyenne 9,7 %. Elles présentent aussi des rapports SiO₂ / Al₂O₃ élevés compris entre 1,6 et 1,9, avec une moyenne de 1,7 comme dans les roches primaires. Elles sont riches en Fe et surtout en Mg avec respectivement des teneurs moyennes de 2 % et 3,5 %. Ba y a été détecté de façon systématique, les plus fortes valeurs voisines de 4 % de BaO étant observées dans les muscovites des échantillons phosphatés. Il s'agit des muscovites roses ou pink muscovites décrites plus haut. Enfin, des teneurs très faibles en Ti, Mn et en Cu ont été parfois enregistrées.

4°) - Les minéraux phosphatés sont très variés et présentent des compositions chimiques très diverses. Il s'agit de phosphates de Al et / ou de Fe. Les phosphates de Al sont de type wavellite avec 37 à 48 % de Al₂O₃ et 45 à 50 % de P₂O₅. Ces phosphates de Al sont d'autre part caractérisés par:

- l'abondance de Cu, sauf dans les échantillons AB-695 et TOG-23A; il s'agit de turquoise;

- l'abondance de Ba dans les échantillons TOG-23B et UN-1; c'est la gorceixite avec une composition chimique variant entre 27 et 29 % pour P₂O₅, 33 % pour Al₂O₃, 26 et 29 % pour BaO;

- l'abondance de Ca dans l'échantillon TOG-23A montre qu'il s'agit de crandallite avec une composition chimique moyenne de 37 % de P₂O₅, 44 % de Al₂O₃, 14 % de CaO et 2,5 % de BaO.

Ces divers minéraux présentent souvent des impuretés en Si et en S.

Les phosphates de Fe présentent des compositions chimiques caractérisées par des teneurs fortes et variables en Fe comprises entre 20 et 81 % de FeO et par conséquent par des teneurs relativement basses en P et en Al. Ils renferment souvent, tout comme les phosphates de Al, des impuretés en Si, parfois Cu, Ba, et en S.

2 - Comparaisons entre goëthite et hématite.

Tableau XXXIV - Composition statistique et test de différences des moyennes des goëthites et hématites.

a - Statistiques comparées de goëthite et d'hématite

Elém.	Goëthite (47 analyses)					Hématite (60 analyses)				
	Moy.	Méd.	Ec.T.	Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	Min.	Max.
Fe ₂ O ₃	67,27	69,65	7,72	44,60	77,88	72,97	72,81	4,79	59,34	82,15
P ₂ O ₅	0,18	0,08	0,35	0,00	2,02	0,13	0,13	0,12	0,00	0,44
TiO ₂	0,01	0,00	0,02	0,00	0,10	0,02	0,00	0,04	0,00	0,25
CuO	0,03	0,00	0,05	0,00	0,20	0,02	0,00	0,05	0,00	0,24
SiO ₂	1,87	1,57	1,98	0,42	14,35	1,90	1,57	2,01	0,23	15,39
CaO	0,04	0,02	0,05	0,00	0,22	0,14	0,12	0,13	0,00	0,45
ZnO	1,05	1,00	0,59	0,00	3,20	0,35	0,25	0,54	0,00	3,69
Al ₂ O ₃	0,63	0,28	1,69	0,00	11,59	0,30	0,16	0,51	0,00	3,68
PbO	0,15	0,00	0,41	0,00	2,74	0,13	0,00	0,36	0,00	2,73
Mn ₃ O ₄	0,40	0,16	0,76	0,00	4,12	0,63	0,36	0,77	0,00	3,81
MgO	0,08	0,03	0,20	0,00	1,33	0,06	0,04	0,07	0,00	0,46
SO ₃	0,15	0,11	0,15	0,00	0,53	0,20	0,11	0,21	0,00	0,74

Légende: Moy. = Moyenne; Ec.T. = Ecart - type; Méd. = Médiane;

b - Test de différence des moyennes

	d	2.S _d	d > 2.S _d *
Fe	-5,70	2,56	oui
P	0,05	0,10	
Ti	-0,01	0,012	
Cu	0,00	0,02	
Si	-0,03	0,78	
Ca	-0,10	0,04	oui
Zn	0,70	0,22	oui
Al	0,33	0,50	presque
Pb	0,02	0,16	
Mn	-0,23	0,30	presque
Mg	-0,02	0,06	
S	-0,05	0,07	

Légende: d = différence des moyennes.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

(S_d = écart-type de la distribution statistique de d); * condition pour que les moyennes aient 95 chances sur 100 d'être différentes.

La comparaison entre les compositions chimiques des goëthites et des hématites acquises par micro-analyses est faite à l'aide des statistiques univariées (tableau XXXIV a et b), des histogrammes (figure 29) et des coefficients de corrélation (tableau XXXV).

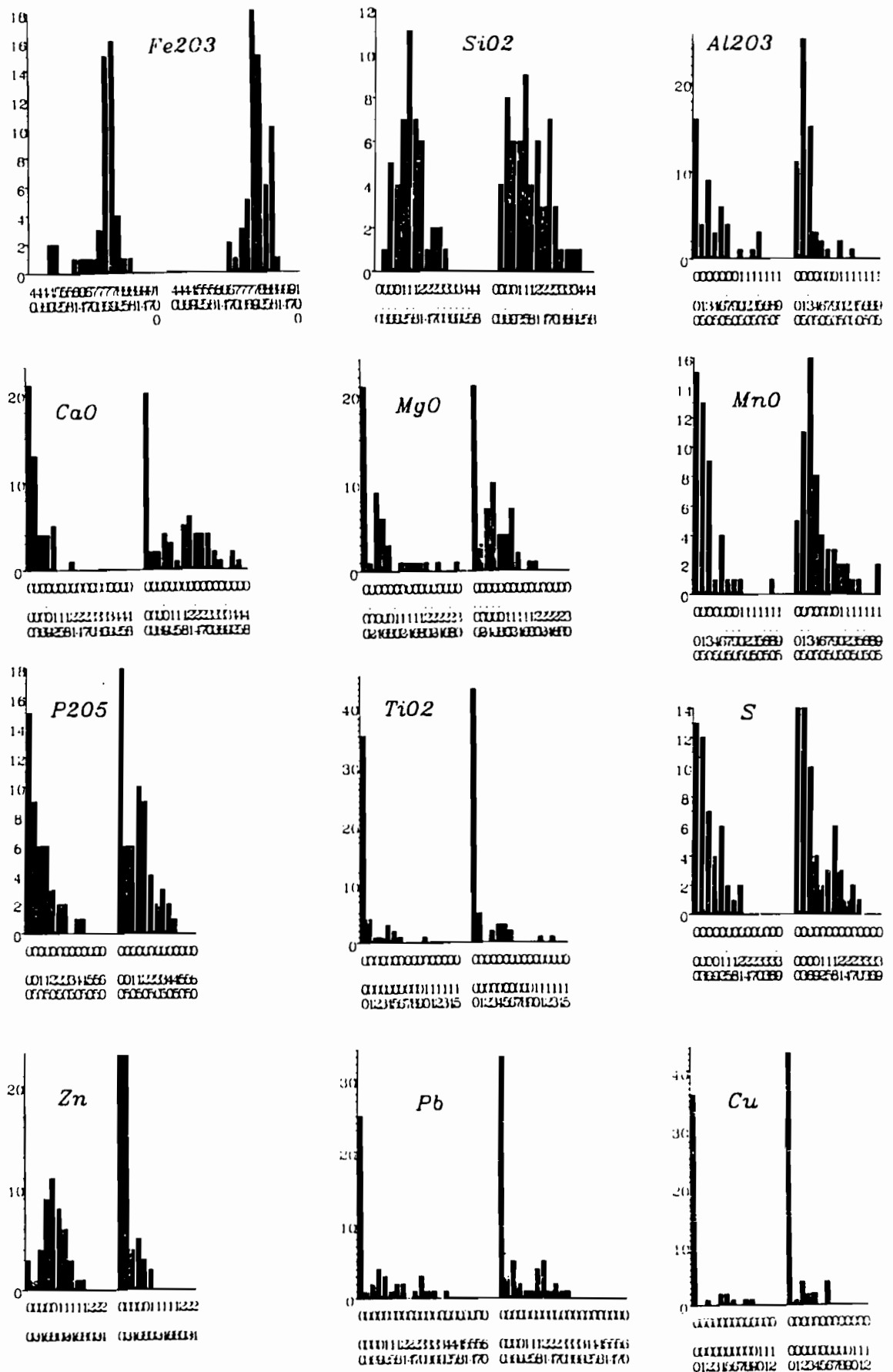


Figure 29 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les goëthites et hématites (analyses ponctuelles).

Quelques différences notables apparaissent dans les niveaux moyens de teneurs. La différence essentielle, en valeur moyenne comme médiane, concerne le zinc, avec 1 % ZnO environ dans la gœthite contre 3 à 4 fois moins dans l'hématite, même si le maximum détecté (3,7 %) concerne une hématite. On trouve par ailleurs plus de Ca et Mn dans l'hématite que dans la gœthite, et moins d'Al.

Les histogrammes montrent que la plupart des distributions sont fortement dissymétriques avec, Fe excepté, le plus grand nombre de valeurs aux basses teneurs. Dans quelques cas la dissymétrie s'accompagne d'une bimodalité avec un mode aux teneurs les plus basses; c'est le cas pour Ca, Mg, P, S dans l'hématite et dans la gœthite.

Deux éléments ont des distributions symétriques: Si dans les deux minéraux, Zn dans la gœthite seule. Les tableaux de corrélations (tableau XXXV a et b) montrent quelques associations d'éléments.

Tableau XXXV - Coefficients de corrélation inter-éléments à partir des résultats d'analyses microsituées.

(a) - **Gœthite** (n = 48)

	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	CuO	SiO ₂	CaO	ZnO	Al ₂ O ₃	PbO	MnO	MgO
SO ₃	-.02	-.09	-.07	-.06	.05	-.09	.03	-.05	-.03	.05	-.05
MgO	-.25	-.01	.20	-.06	.90	.12	-.12	.95	-.04	-.04	
MnO	.03	-.16	.21	.04	-.12	-.08	.62	-.06	-.06		
PbO	.06	-.12	.30	-.11	-.01	-.17	.07	-.07			
Al ₂ O ₃	-.20	.12	.19	-.07	.93	.08	-.10				
ZnO	.20	-.12	.21	-.02	-.05	-.26					
CaO	-.10	.27	-.24	.20	.07						
SiO ₂	-.15	.05	.20	-.05							
CuO	-.17	-.05	-.08								
TiO ₂	-.14	-.07									
P ₂ O ₅	.08										

(b) - **Hématite** (n = 68)

	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	CuO	SiO ₂	CaO	ZnO	Al ₂ O ₃	PbO	MnO	MgO
SO ₃	-.05	-.05	.10	-.05	.03	.15	-.05	-.05	-.05	-.09	-.12
MgO	-.32	-.10	.16	.06	.26	.17	-.10	.77	.15	.10	
MnO	-.46	-.18	.05	-.14	-.22	.24	.33	.25	-.06		
PbO	-.06	-.09	.24	.06	.79	.15	-.07	-.08			
Al ₂ O ₃	-.46	-.10	.01	-.03	-.01	-.05	.00				
ZnO	.19	-.26	-.07	-.10	-.01	-.32					
CaO	-.43	.15	.27	-.04	.75						
SiO ₂	-.51	.05	-.01	-.13							
CuO	.03	.04	.17								
TiO ₂	-.09	-.14									
P ₂ O ₅	-.10										

Légende: Gras: coefficients de corrélation significativement différents de zéro au seuil de confiance de 90 %

Dans la gœthite, Si, Al et Mg sont fortement corrélés, indiquant qu'ils ont de fortes chances d'être associés à une même phase minérale, probablement des micas. P et Ca sont corrélés et par suite peut-être minéralogiquement associés; s'il en est ainsi, la gœthite pourrait contenir des inclusions d'apatite. La corrélation Ti - Pb ne suggère pas d'association minérale spécifique.

Dans l'hématite, les corrélations sont plus éparées et suggèrent beaucoup moins des associations minérales: l'intercorrélation Si, Al, Mg est lâche car Si n'est pas corrélé à Mg;

Ca n'est plus corrélé à P, mais à Ti et Si, de même que Pb; Mn reste corrélé à Zn, bien que moins fortement, mais il est aussi corrélé à Ca et Al.

3 - Tentative de localisation des éléments dans les phases minérales

Les cartes de répartition des éléments montrent d'abord les répartitions attendues: Si dans des quartz et des paillettes de micas; Al, Mg, K dans les micas; Fe uniformément réparti dans la matrice ferrugineuse. La photo 4 (Pl. V) montre la répartition de Fe, Mn, Si et Mn dans la plage correspondante (photo 3, Pl. V).

Les autres éléments sont distribués de manière homogène dans la matrice ferrugineuse, tout au moins à l'échelle de l'observation. Zn en particulier ne montre nulle part de tendance à s'accumuler. Seul Mn apparaît parfois en enclaves très petites et aussi sous forme de rares plages entourées d'un liséré enrichi en Fe.

4 - Résumé et interprétation sur les oxy-hydroxydes de fer

Les analyses microsituees complètent bien la connaissance sur les oxy-hydroxydes de fer et permettent d'apporter quelques interprétations nouvelles.

- Ils sont riches en impuretés, principalement Si, Al, Mn, Zn, Pb. Ce sont eux qui portent en particulier Zn, et non les autres minéraux. L'abondance de celles-ci ne semble pas liée à l'habitus des minéraux; les formes fibroradiées, en particulier, ne diffèrent pas à ce point de vue des autres, ni pour la goëthite, ni pour l'hématite. Cela conduit à penser que les différentes formes de goëthite ou d'hématite ne correspondraient pas forcément à des cristallisations successives, car cela devrait sembler-t-il entraîner des différences dans les charges en impuretés. Les différences de formes observées proviendraient alors plutôt de variations locales des paramètres géométriques des sites où se cristallisent ces minéraux, comme le pense Kosakévitch (1983).

- Certains éléments en impuretés sont accumulés en minéraux autonomes: Si, Al, k, et Mg en micas; peut-être Ca, P en apatite. Mais les autres sont dispersés de façon homogène dans les oxydes de fer; c'est le cas de Zn, Pb et, à de rares exceptions près, Mn. On est donc autorisé à penser que ces éléments sont inclus dans les réseaux de la goëthite et de l'hématite.

- Des différences marquées apparaissent entre la goëthite et l'hématite. Différence de teneurs en impuretés: la goëthite est plus riche en Zn et Al que l'hématite et moins en Mn et Ca. Différence surtout dans la forme des distributions: plusieurs éléments sont bimodaux dans l'hématite, Ca, Mg, P, S, Pb et Cu dont deux seulement (Pb et Cu) le sont aussi dans la goëthite; distribution de Zn symétrique dans la goëthite, dissymétrique dans l'hématite.

Ces différences des teneurs entre goëthite et hématite peuvent peut-être s'expliquer par la nature des réseaux. Par contre les différences des courbes de distribution s'expliquent mal de cette manière et conduit à penser que les deux types de minéraux se sont formés dans des conditions géochimiques différentes.

IV - Conclusions tirées de l'étude des faciès oxy-hydroxydés

A - Du point de vue pétrographique et minéralogique

1 - Les faciès oxy-hydroxydés (faciès typiques des chapeaux de fer et roches ferruginisées) sont dans l'ensemble essentiellement constitués de goëthite et d'hématite qui forment une phase ferrugineuse secondaire enrobant une phase silicatée résiduelle constituée de quartz et de micas souvent très corrodés, dispersés ou rassemblés en fragments de roches.

Lorsque les micas sont dispersés dans le plasma ferrugineux, ils présentent une orientation privilégiée, parfois dans deux directions sécantes comme dans les éléments de roches. Cette disposition des micas, ainsi que le carriage généralisé des quartz et des micas conduit à émettre l'hypothèse d'une épigénie antérieure à l'oxydation d'une roche primaire quartzo-micacée par un matériau dont la nature ne nous est pas à priori connue. L'épigénie aurait conservé les volumes puisqu'elle semble avoir préservé la disposition des micas. On verra plus loin que des hypothèses assez probables peuvent être formulées sur la nature du matériau en épigénie.

2 - Les faciès typiques des chapeaux de fer diffèrent de ceux des roches ferruginisées par l'existence très générale d'une matrice réticulée qu'on observe dans les premiers et non dans ces dernières. La phase ferrugineuse des faciès typiques des chapeaux de fer présente en effet des réseaux réticulés de deux types; des micro et des macro-réticulations. Les réticulations peuvent être interprétées comme correspondant à la pseudomorphose de matériaux préexistants par des oxy-hydroxydes de fer. La nature de ces matériaux différencierait selon le type de réticulation: les macro-réticulations sont certainement dérivées de quartzites ou de filons de quartz (présence de quartz résiduel dans les grandes réticulations), les micro-réticulations proviendraient d'un autre matériau dont la nature sera précisée plus loin.

3 - Ces divers faciès minéralogiques et texturaux sont parfois organisés en couches concentriques alternées donnant les faciès en cendriers probablement développés à la faveur des fissures existant dans le matériau initial.

4 - Les schistes ferruginisés constituent un faciès d'altération météorique des épontes des volumes épigénisés évoqués ci-dessus. Les particularités des schistes ferruginisés sont la conservation de la structure schisteuse, et surtout l'absence de micro-réticulations. Cependant, les faciès à cendriers rencontrés dans quelques échantillons de schistes ferruginisés pourraient être considérés comme intermédiaires entre les deux types. Il en est de même de l'échantillon CF V-3 dans lequel sont observés des figures de répliques de minéraux géants. Avant leur altération météorique, les volumes qui ont fourni le faciès de schistes ferruginisés pourraient donc sporadiquement avoir été visités par le matériel d'épigénie, sous forme de microfilonnets.

5 - Enfin l'altération des quartzites ferrugineux à magnétite et hématite conduit aux minéraux secondaires gœthite et hématite en abondances relatives dépendant de la constitution minéralogique de la roche-mère. Les réticulations dérivant du quartz sont du type macro-réticulation décrite plus haut et les figures de répliques de la magnétite sont bien caractéristiques et ne peuvent être confondues avec les autres types de réseaux réticulés rencontrés ailleurs.

6 - Les analyses minéralogiques effectuées par diffraction RX complétées par quelques analyses thermiques n'ont guère apporté d'information nouvelle. Elles ne font que confirmer de manière chiffrée la très large dominance de la gœthite sur l'hématite.

B - Du point de vue de la géochimie globale et microsituée

1 - Les faciès ferrugineux diffèrent des schistes régionaux par l'appauvrissement très marqué en éléments lithophiles, conséquence de la raréfaction de la phase silicatée au dépens de la phase ferrugineuse secondaire. Ils sont par contre enrichis en plusieurs éléments qui sont, par ordre de fréquence décroissante des anomalies, Fe-Zn, Mn, Ni-Co, P-Cu-Eu, Ba-Lu, Sr, La, Yb. On peut supposer que le ou les minéraux constituant le matériel ayant épigénisé les schistes étaient riches en Fe et contenaient du Zn (ainsi que les autres éléments du cortège anormalique).

2 - Ces anomalies, en particulier Zn, ne diffèrent guère les chapeaux de fer sensu stricto des schistes ferruginisés. La ferruginisation supergène des divers faciès primaires

(schistes et matériel d'épigénie) a favorisé une certaine tendance à l'homogénéisation chimique.

3 - Parmi les divers faciès ferrugineux étudiés, deux se distinguent assez bien des autres ; ce sont les faciès cendriers et les brèches ferrugineuses. Le faciès cendrier apparaît comme particulièrement riche en Fe et Zn, alors que les brèches ferruginisées le sont en P, Ba, Lu et aussi en Cu et Mn.

4 - Les faciès ferrugineux phosphatés, par leurs anomalies très marquées en P, Ba, Cu, constituent un cas particulier qui ne doit pas être confondu avec les autres faciès ferrugineux même si l'on peut soupçonner des relations génétiques éventuelles avec ceux-ci.

5 - Outre les principales anomalies observées dans les faciès de chapeaux de fer en particulier Zn, Mn, Pb, les oxy-hydroxydes de fer (gœthite et hématite) qui en constituent le support, renferment aussi des impuretés en Si, Al, Mg, Ca, P, etc... Ces dernières, surtout Si, Al et Mg, apparaissent souvent concentrées en minéraux propres, micas par exemple; alors que Zn, Pb et sauf exception Mn présentent une répartition homogène dans les oxydes de fer.

6 - Pour la gœthite comme pour l'hématite, la charge en impuretés ne semble pas dépendre de l'habitus du minéral, ce qui suppose que la diversité des formes que prend l'un ou l'autre de ces minéraux est due à des différences de condition de cristallisation qu'à des étapes successives de celle-ci.

Chapitre VIII

LA CASCADE D'OPOBLE

I - Description du site (fig.30)

Le site est situé à 200 m au Nord du chapeau de fer n° 3 dans le secteur d'Opoblé. Il occupe une position topographique basse, dans une vallée très étroite. C'est un lieu caché par une petite forêt galerie et accessible par un sentier. C'est à cet endroit qu'a été observée la sidérite massive, au cours des prospections précédentes ORSTOM-BNRM, dans un puits peu profond d'un mètre environ au-dessous d'un niveau ferrugineux avec lequel elle est en contact.

Sur le site, se voient de gros blocs ferruginisés très compacts de plusieurs m³. En outre, un affleurement de 5 à 6 m de haut sur plus de 10 m de long constitue une petite falaise à rebord oriental abrupt. La face verticale de la falaise présente des linéaments horizontaux et verticaux qui débitent la surface en éléments rectangulaires pluridécimétriques correspondant à un débit prismatique de l'ensemble. Chacun des prismes présente en outre des figures circulaires concentriques assimilables à une organisation en cendriers (fig. 30). En tombant de la falaise, le ruisseau souvent à sec en saison sèche forme une petite cascade. Au pied de la cascade, se trouve une auge encaissée, pleine d'eau en toutes saisons. C'est dans cette auge sous l'eau, que la sidérite massive a été trouvée. Cette sidérite est particulièrement intéressante car elle présente, comme les faciès ferrugineux massifs du site, de fortes anomalies en Zn et apparaît donc comme directement liée aux chapeaux de fer. Elle affleure très mal, même dans le puits, ce qui rend impossible l'appréciation de ses dimensions et de sa forme.

Le contact entre la sidérite et les faciès oxydés est localisé au dessous du niveau de l'eau qui occupe l'auge. Ce contact est diffus et le passage d'un faciès à l'autre est progressif. L'échantillonnage de la sidérite saine a été fait en vidant l'eau en continu et après grattage sur une profondeur d'environ un mètre du fond de l'auge. La localisation des échantillons des divers faciès étudiés est portée sur la figure 16. L'échantillon 77 qui est un faciès particulier, est situé à proximité de cette coupe. Dans ce qui suivra, seront présentés successivement les faciès carbonatés, les faciès oxydés massifs et les faciès de transition entre ces deux premiers.

II - Description des faciès

A - Le faciès carbonaté

La sidérite se présente sous forme de masse carbonatée à inclusions quartzo-micacées et de sulfures et peut aussi apparaître en association avec du micaschiste abondant, représentant alors un faciès de contact avec l'encaissant. Ces deux types seront

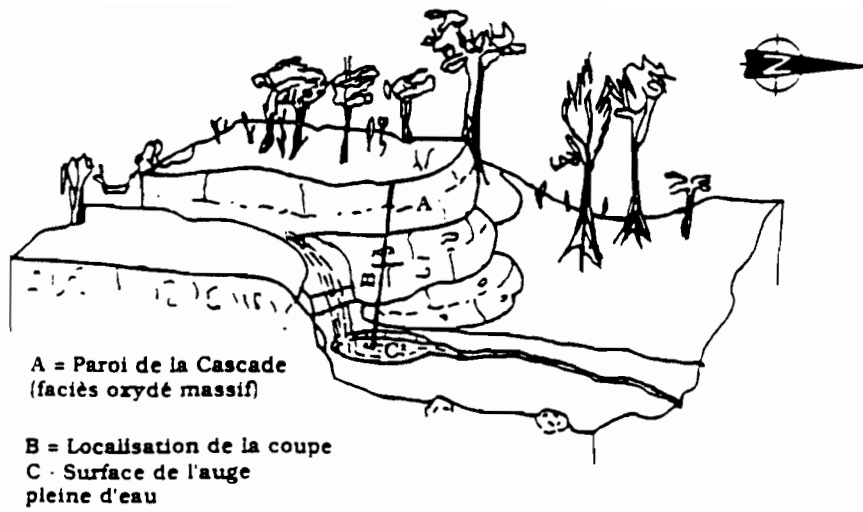


Figure 30 - Schéma de la situation de la Cascade d'Opoblé.

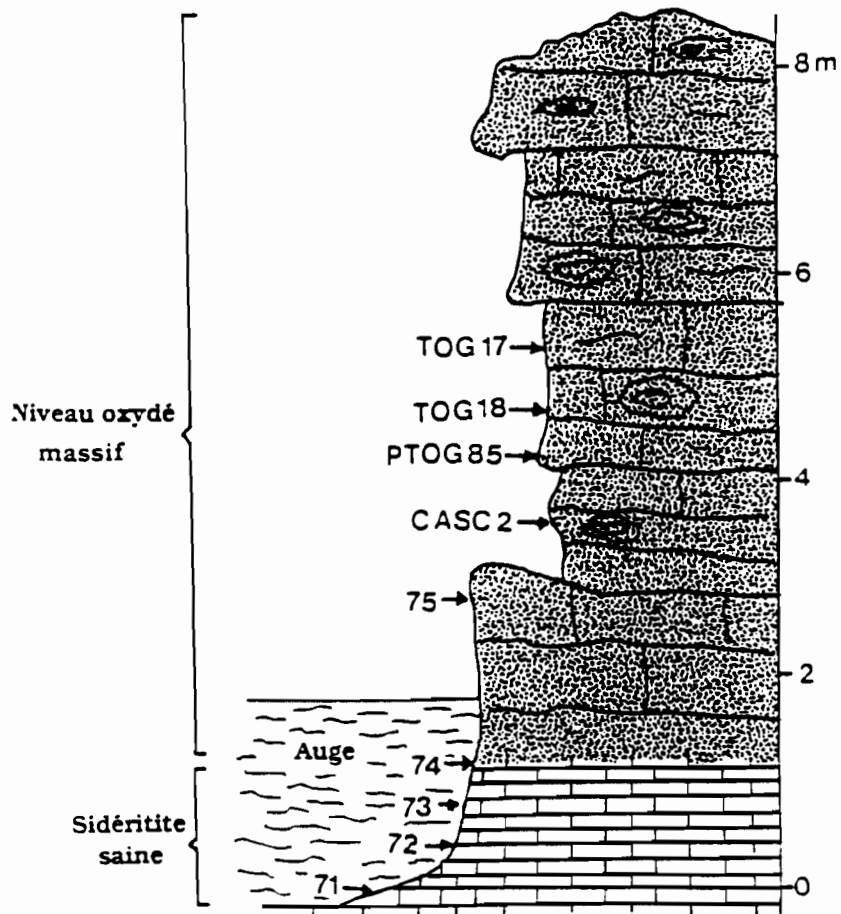


Figure 31 - Schéma de l'affleurement et localisation des échantillons sériés.

présentés successivement. Cette sidérite est tout à fait distincte des dolomies cristallines précédemment décrites qui affleurent à proximité.

1 - La sidérite typique

a - Description minéralogique et pétrographique

Il s'agit de roche massive et dure. Macroscopiquement, elle est de couleur jaune évoluant en brun, en passant par le caramel dans les zones à oxydation commençante. Elle présente un aspect bréchoïde avec des éléments centimétriques de roches (quartzites, schistes et micaschistes) pris dans un ciment sidéritique. À la loupe binoculaire, se reconnaissent noyés dans la sidérite, outre quelques éléments lithiques, un semis de paillettes de micas, quelques quartz dispersés et de nombreuses inclusions millimétriques de pyrite.

La sidérite constitue plus de 80 % de la roche sous forme d'une mosaïque de grains à contours à tendance polygonale. La dimension des grains conduit à distinguer deux types: des grains de petite et de grande tailles. Les grains de petite taille font 20 à 50 μm , avec une majorité ayant 20 μm . Ils apparaissent légèrement jaunâtres en lumière naturelle (LN). Cette sidérite microcristalline constitue l'essentiel des lames. Les gros grains de sidérite se présentent sous forme de nodules plus limpides et de couleur beige clair. Leur taille est comprise entre 50 et 150 μm . Ils sont souvent localisés à proximité de fractures et associés à des quartz à caractère filonien.

Les grains peuvent être jointifs et ne se distinguer alors les uns des autres qu'en lumière polarisée (LP). Mais ils sont aussi souvent séparés entre eux par une mince fissure de dissolution continue très régulière qui dessine alors très nettement le contour des grains en LN. Par ailleurs s'observent fréquemment des zones montrant un début d'oxydation. Les limites des grains sont alors soulignées par des oxydes de fer et l'intérieur prend en tout ou en partie une teinte brune soutenue.

Le quartz et les micas se présentent en grains et paillettes isolés, ou formant des fragments de roches variées: éléments de quartzites à grains en mosaïque; éléments quartzo-micacés, micaschistes ou schistes; plus rarement de gros quartz à caractère filonien de forme irrégulière formant de grandes plages sans micas. Lorsque les micas sont isolés, ils sont fréquemment disposés de telle manière qu'ils forment des alignements qui se recoupent comme c'est le cas dans les éléments lithiques micacés où les deux phases S₁ et S₂, reconnues précédemment, sont marquées par deux schistosités sécantes. Parfois ils dessinent des charnières de microplis relictuels (Pl. V photo 5).

Les grains de quartz et, dans une moindre mesure les micas, ont un aspect chagriné ou corrodé avec souvent des figures de dissolution. Ces minéraux présentent sur leurs bordures des cavités qui sont, dans la plupart des cas, occupées partiellement ou totalement par la sidérite. Ces observations montrent qu'ils sont épigénisés par la sidérite. Très souvent, se note une mise en place progressive de la sidérite dans les fragments de roches et cet envahissement conduit à leur démantèlement, avec une dispersion des grains de quartz et de micas dans la matrice carbonatée (Pl. VI, photos 1 et 2). Parfois se voient de fines paillettes de micas frais qui peuvent témoigner d'une recristallisation secondaire. Dans les éléments lithiques, les grains de quartz sont, comme les grains de sidérite, disjoints et séparés par des fissures qui traduisent des phénomènes de dissolution.

Les sulfures sont en grains isolés ou groupés en amas composés de quelques cristaux de très grande taille, formant de grandes plages très contournées. Les grains de sulfures ont une taille allant de 10 μm à plus du centimètre. Ils sont automorphes à sub-automorphes (Pl. VI photo 3) pour les très petits grains et de forme irrégulière d'aspect anguleuse ou arrondie pour les plus gros et montrent des fissures intragranulaires. Ces sulfures sont exclusivement de la pyrite. Les amas pyriteux présentent souvent une forme amiboïde avec des golfes plus ou moins fermés. Dans ces golfes, on rencontre les mêmes matériaux qu'alentours.

Des minéraux accessoires, rutile et zircon, se présentent en grains très souvent associés aux éléments lithiques micacés et parfois disséminés dans la sidérite. Le rutile est particulièrement abondant dans les lames E-71 et E-72 où il se présente sous forme de grains ovoïdes de 10 à 30 μm , parfois groupés en agrégats de quelques dizaines de grains. Le zircon se présente en sections hexagonales zonées.

b - Essai d'interprétation

La sidérite se présente donc comme une micrite à rognons sparitiques, incluant d'une part des éléments lithiques quartzo-miacés ainsi que des quartz et des micas dispersés et d'autre part des sulfures (pyrite), parfois abondants.

Le carriage généralisé des quartz et des micas, les figures fréquentes d'épigénie de ceux-ci par le carbonate, et surtout la conservation d'alignements des micas dispersés simulant les directions S_1 et S_2 des schistes et micaschistes encaissants, suggèrent que la genèse de la sidérite résulte d'une épigénie quasi totale d'une roche silicatée préexistante par le carbonate.

2 - Faciès de contact entre la sidérite et l'encaissant micaschisteux

Un échantillon (77), présente deux grandes zones: l'une est constituée de sidérite à grains fins comme dans la plupart des lames étudiées; l'autre correspond à du micaschiste. Ce micaschiste est banal: micas de type muscovite, alignés selon deux directions liées S_1 et S_2 ; petits grains ovoïdes de rutile et parfois sulfures en grains isolés ou agrégés. Dans la zone micaschisteuse, se remarquent par ailleurs des cristaux de sidérite (Pl. VI, photo 4) en grains ou en plages dans les différents niveaux qui marquent la schistosité de la roche. De plus, le contact entre les deux zones n'est pas franc et est souvent souligné par des invaginations ou indentations de la sidérite à l'intérieur du micaschiste. Ces invaginations conduisent parfois, au voisinage de la limite sidérite - micaschiste, à une fragmentation donnant des lambeaux de micaschistes, des grains de quartz et des paillettes de muscovites noyés dans une matrice carbonatée.

Ce faciès peut être interprété comme un faciès de bordure où l'imprégnation de la roche par le carbonate est moins avancée que dans la sidérite typique. Notons par ailleurs que le site est à moins de 200 m des échantillons de sondage SP-51 et SP-54 précédemment décrits (Pl. I, photo 2) où ont été observées des mouches de sidérite dans des micaschistes. Ces échantillons de sondage et le faciès décrit ci-dessus pourraient représenter deux étapes dans le processus de sidéritisation des micaschistes.

3 - Diffraction des rayons X

Les observations pétrographiques ont été confirmées et complétées par la diffraction des rayons X (tableau. XXXVI). Les faciès de sidérite présentent à côté de la sidérite, minéral principal, de la muscovite plus ou moins abondante et du quartz en traces sauf dans l'échantillon 77 où, comme on l'a vu ci-dessus, le micaschiste est particulièrement abondant. La pyrite n'est assez abondante pour être détectée au RX que dans un échantillon (AB-836). La goëthite et l'hématite sont bien exprimées dans un échantillon correspondant au faciès de transition avec la zone oxydée (éch. 74), et apparaissent dans deux autres échantillons sous forme de traces. Enfin, la tridymite a été soupçonnée dans un échantillon (CASC-11).

Tableau XXXVI - Constitutions minéralogiques des sidérites et des faciès massifs oxydés de la Cascade par diffraction des rayons X.

Echantillon	Nature	Sidérite	Muscovite	Quartz	Goethite	Hématite	Pyrite	Divers
AB-836	Sidérite	A	P	Tr			P	
CASC-9	"	A	P	Tr				
CASC-10	"	A	P	Tr	Tr	Tr		
CASC-11	"	A	P					Tr Tridymite
CASC-12	"	A	Tr	Tr				
71	"	A	Tr	Tr				
72	"	A	Tr	Tr	Tr			
73	"	A	Tr	Tr				
74	"	A	P	Tr	P	P		
120	"	A	P	Tr				
77	Micaschiste. à sidérite	P	A	P				
CASC-14	Schiste		P	A				
TOG-17A	Faciès oxydés		P	P	A	P		Tr. Kaolinite
TOG-17B	"		P	P	A	P		
TOG-18	"		P	P	A	P		
TOG-19	"		P	P	A	P		
PTOG-85	"		P	P	A	P		
PTOG-86	"		P	P	A	P		
CASC-1	"		P	P	A			
CASC-2	"		P	P	A			
CASC-7	"		P	Tr	Tr	A		
CASC-13	"		P		P	P		
75	"		P	Tr	P	A		
119	"		P	P	A	P		

Légende: A = abondant; P = présent; Tr = trace.

B - Les faciès oxy-hydroxydés massifs

1 - Description macroscopique

Ce sont des matériaux très durs et massifs, de couleur brune. Ils présentent une tendance à une organisation en boules décimétriques très irrégulières, à couches concentriques, qui évoquent la forme des cendriers très contournés décrits par ailleurs (figure 31). A l'oeil nu ou à la loupe se voient des grains de quartz de taille variable, des micas blancs, des fragments de schistes emballés dans un ciment sombre. Sur l'affleurement s'observe de gros quartz d'exsudation de couleur blanc nacré. La présence de fragments de roches confère à ces matériaux un aspect bréchoïde qui ne signifie pas forcément qu'il s'agit de brèches ferruginisées.

2 - Description pétrographique

Au microscope, ces matériaux ne diffèrent pas des faciès typiques des chapeaux de fer déjà décrits, avec une matrice réticulée constituée essentiellement de goëthite et d'hématite englobant des minéraux résiduels dispersés ou groupés en fragments lithiques.

La goëthite est plus abondante que l'hématite. Ces deux minéraux apparaissent très souvent sous forme microcristalline, avec une meilleure perception des cristallites pour la goëthite. De très belles goëthites fibroradiées associées à l'hématite ont été observées au voisinage des cavités millimétriques à centimétriques où elles dessinent les parois des réseaux réticulés. La goëthite cryptocristalline se localise à l'intérieur du réseau réticulé sous forme de faciès de remplissage.

Les minéraux résiduels sont essentiellement des quartz et surtout des micas. Ils se présentent souvent sous forme de grains dispersés ou d'éléments lithiques identiques à ceux déjà décrits par ailleurs. Des plages constituées uniquement de gros quartz à caractère filonien ont été rencontrées. Les mêmes observations que pour les faciès oxydés typiques des chapeaux de fer, à savoir la corrosion des quartz, des micas et des éléments lithiques, leur envahissement par des oxydes de fer, etc..., ont été faites. Des paillettes fraîches de muscovite ont été également observées.

Par ailleurs, les micas isolés sont, comme cela a déjà été décrit à plusieurs reprises, disposés dans une direction préférentielle doublée parfois d'une seconde direction qui est sécante à la première. De même, dans les éléments lithiques quartzo-micacés, deux directions d'alignement des micas correspondant à deux phases tectoniques S_1 et S_2 peuvent être notées. Un fait important est la concordance d'alignement observée entre les micas isolés et ceux des fragments de roches (Pl. VI, photo 5).

Accessoirement, des minéraux titanés sont observés dans les éléments lithiques. A la microsonde électronique, un oxyde de manganèse a été mis en évidence. Enfin, la pyrite en voie d'oxydation (Pl. VII, photo 2) a été observée dans un échantillon (éch. 75) proche de la zone de transition. L'oxydation totale de la pyrite donne un type particulier de cavité très rarement observée. Il est lié à des fantômes de pyrite formés de couches plus ou moins concentriques d'hématite et de gœthite guidées par la morphologie du sulfure et ménageant des vides de taille et de dimensions variées (Pl. VII, photo 1).

Plus généralement, les microtextures (cavités) examinées peuvent pour la plupart être regroupées en deux classes en fonction de leurs dimensions: il s'agit de réseaux réticulés identiques aux macro et micro-réticulations, décrites précédemment (100 à 350 μm et 20 à 50 μm).

En résumé, le faciès oxydé massif de la cascade est en tout point identique aux faciès décrits plus haut comme typiquement caractéristiques des chapeaux de fer: éléments quartzo-micacés noyés dans une matrice d'oxy-hydroxydes de fer à texture réticulée; structure macroscopique à tendance en cendriers; hématite et gœthite constituant le plasma réticulé avec des réticulations de grande et petite tailles.

C- Les faciès de transition entre sidérite et faciès oxy-hydroxydés

Le contact entre la sidérite et le faciès oxydé massif se fait de manière floue. Cependant l'échantillon 74 représente un cas où le passage entre les deux est continu et se fait à l'échelle centimétrique. La lame, taillée perpendiculairement à la zone de passage (fig. 32; Pl. VII, photo 3), présente une évolution d'un faciès vers l'autre qui peut être décrite comme suit.

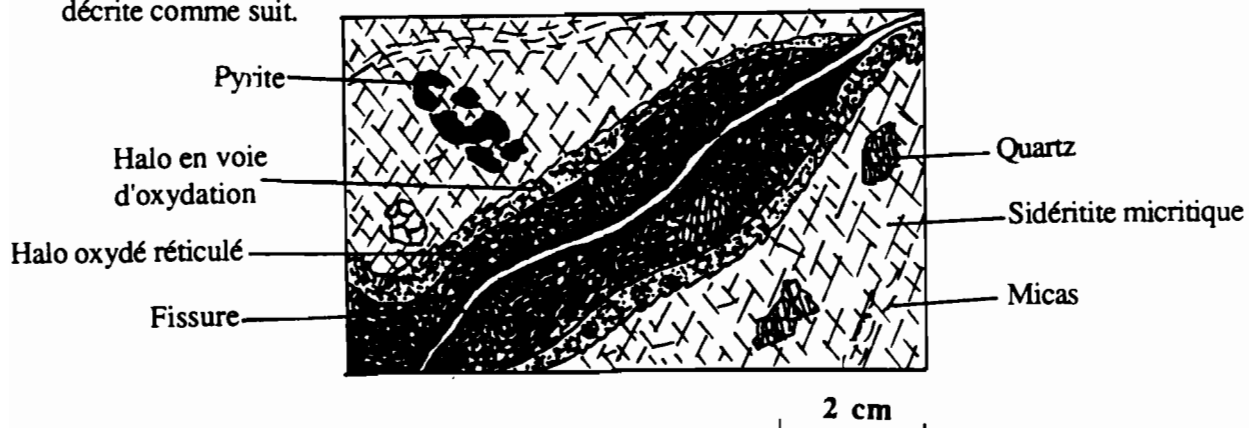


Figure 32 - Schéma montrant le début de l'oxydation de la sidérite à partir d'une fissure.

Le matériel de départ est une sidérite à grains jointifs. Puis apparaissent des fissures intergrains qui se généralisent. Celles-ci tendent à s'emplir d'oxy-hydroxydes de fer. En même temps peuvent se former localement des fissures intra-grains qui séparent les grains en deux ou trois morceaux et s'emplissent elles aussi d'oxy-hydroxydes de fer. Les contours des grains se trouvent ainsi dessinés par les oxy-hydroxydes de fer. Ensuite les grains de sidérite disparaissent et ménagent des cavités bordées de goëthite-hématite bien cristallisées et remplies partiellement de goëthite microcristalline. Les figures (Pl. VII, photos 4, 5 et 6) représentent les divers stades d'évolution de la sidérite au faciès oxydé massif. Sur la lame, la sidérite massive grise et saine est traversée par une diaclase d'un demi-millimètre de large environ, bordée d'un halo d'oxy-hydroxydes de fer. De toute évidence, l'oxydation a commencé au voisinage de la fissure pour s'étendre progressivement à toute la masse.

Cette évolution correspond à une oxydation de la sidérite, laquelle disparaît au profit d'un réseau réticulé d'oxydes de fer calqué sur la texture de celle-ci. L'oxydation a emprunté principalement les diaclases de la sidérite préexistante avant d'affecter l'ensemble de la roche, avec une conservation quasi totale de sa structure et de sa texture. Eventuellement, du fait du fractionnement des grains de sidérite, les dimensions des réticulations du faciès oxydé peuvent devenir un peu plus petites que celles des grains de sidérite.

Il est à noter que les minéraux rélictuels, quartz et micas, n'ont pas été affectés, ou seulement très peu, par l'oxydation de la sidérite les renfermant. Il en est de même des éléments lithiques. Les sulfures par contre, à l'exception de ceux en inclusions dans les quartz, ont évolué dans le même sens que la sidérite. C'est ainsi que des plages de sulfures résiduels ont été observées dans l'échantillon 75 situé à 20 cm au-dessus de l'échantillon 74 (Pl. VII, photo 2) où des grains de sulfures résiduels sont entourés d'enveloppes de goëthite et d'hématite. L'oxydation complète conduit aux figures de répliques décrites plus haut (Pl. VII, photo 1).

La diffraction des rayons X (tableau XXXVI) confirme l'abondance des minéraux oxy-hydroxydés de fer avec une dominance de la goëthite sur l'hématite. Seuls deux échantillons sont plus riches en hématite qu'en goëthite. Outre la goëthite et l'hématite, de la muscovite et du quartz existent en abondance notable. La kaolinite a été détectée en trace dans un échantillon.

D - Principaux enseignements pétrographiques

De ce qui précède trois ensembles d'observations fondamentales peuvent être retenues.

1 - Les faciès oxydés massifs de la Cascade sont semblables aux faciès typiques des chapeaux de fer avec les caractères structuraux, pétrographiques et texturaux spécifiques de ceux-ci: structure en cendriers, composition minéralogique analogue, texture réticulée.

2 - Les faciès oxydés massifs proviennent, sur le site de la cascade, de l'oxydation d'une sidérite à sulfures avec conservation de la structure et de la texture de celle-ci. Le rôle de l'oxydation des sulfures apparaît très marginal dans le mécanisme de la formation du chapeau de fer. Ces observations conduisent directement à une conclusion importante pour la recherche des protores possibles. Sur ce site, la sidérite est le protores des faciès oxydés massifs, lesquels sont par ailleurs identiques aux faciès typiques des chapeaux de fer.

3 - La sidérite s'est mise en place en épigénisant une roche quartzo-micacée dont ne subsistent que quelques éléments lithiques et des micas dispersés dans le carbonate.

III - Caractérisations géochimiques des matériaux de la Cascade

La démarche suivie ici s'inspire du cas des roches primaires et des faciès oxyhydroxydés de fer. D'abord, les résultats d'analyses multi-élémentaires seront présentés, ensuite ceux obtenus à la microsonde électronique seront exploités.

A - Analyses chimiques roche totale (fig. 33; tableau XXXVIII)

Tableau XXXVII - Composition chimique de la sidérite massive et des faciès oxydés de la Cascade (données statistiques élémentaires).

Elém.	Sidérite saine (10 éch.)						Faciès oxydés massifs (12 éch.)					
	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	%Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	%Min.	Max.
SiO ₂	15,8 %	15,3	3,6	25	10,1	22	29,38 %	25,14	11,7	40	17,22	52,64
Al ₂ O ₃	3,2	2,9	0,7	22	2,4	4,5	6,06	4,88	2,91	48	3,33	12,88
MgO	0,7	0,7	0,1	14	0,5	0,7	0,63	0,57	0,25	40	0,35	1,17
CaO	0,3	0,3	< 0,2	54	< 0,2	0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,10
Fe ₂ O ₃	51,1	50,7	4,1	8	46,5	58,3	53,05	58,52	14,98	28	21,2	68,23
Mn ₃ O ₄	1,35	1,32	0,20	15	1,06	1,63	0,49	0,40	0,36	73	0,02	1,21
TiO ₂	0,18	0,16	0,05	30	0,12	0,30	0,31	0,23	0,18	58	0,15	0,71
Na ₂ O	< 0,05	< 0,05	< 0,05	64	< 0,05	0,08	0,07	0,07	< 0,05	51	< 0,05	0,15
K ₂ O	1,07	1	0,26	25	0,82	1,53	2,06	1,7	0,94	46	1,08	4,19
P ₂ O ₅	0,14	0,15	< 0,1	24	< 0,1	0,16	0,15	0,15	< 0,1	24	0,10	0,24
P1000	24,8	23,7	3,2	13	21,8	32,5	6,86	6,63	1,64	24	4,10	9,51
Sr	16 ppm	15	8	46	7	30	19 ppm	14	13	70	6	41
Ba	1697	1713	714	42	800	3088	2090	1780	1443	69	501	5376
V	36	31	19	53	25	89	50	45	19	37	35	99
Ni	117	118	29	25	82	177	100	93	31	31	42	177
Co	94	92	25	27	65	141	63	61	28	44	8	118
Cr	28	26	7	24	22	45	42	58	15	35	27	79
Zn	6778	5413	4405	65	2502	17111	3074	2261	2150	70	1096	6750
Cu	12	10	6	50	5	27	16	15	7	43	5	29,5
Sc	6,2	4,9	3,9	64	3,4	16,3	6	6,2	1,86	29	4	9,7
Zr	86	81	22	25	60	135	141	123	55	39	88	285
Nb	< 10	< 10	< 10	39	< 10	12	10,18	10	< 10	33	< 10	17
Y	83	65	41	50	38	171	45	44	15	32	25	67
La	18	17	6	36	10	32	20	19	10	49	8	41
Ce	61	55	27	45	29	124	53	52	13	25	36	76
Eu	2,6	< 2	1,7	66	< 2	6,8	< 2	< 2	< 2	55	< 2	2,8
Yb	6,4	5,7	2,7	41	3,5	12	3,35	3	1,58	47	1,6	6,8
Lu	0,4	0,2	0,4	101	< 0,1	1,0	0,28	0,12	0,27	98	< 0,1	0,70

Légende: Moy. = Moyenne; Ec.T. = Ecart - type; C.V. = Coefficient de variation; Méd. = Médiane; Min. = Minimum; Max. = Maximum.

1 - Composition chimique (Tableau

a - Particularités chimiques de la sidérite

La composition chimique est typique de celle d'une roche carbonatée ferrifère avec une perte au feu (P1000) très élevée, correspondant au CO₂, et une teneur en Fe également élevée. Cette roche qui contient des quartz et des micas est riche en Si (15 % SiO₂), Al (3% Al₂O₃), K (1) et Mg comme il a été souligné pour les carbonates (dolomies et calcschistes) déjà présentés. Par ailleurs, cette composition est marquée par trois autres aspects:

- des anomalies manifestement élevées en trois éléments Zn, Mn et Ba, dont les niveaux moyens de teneurs (médianes) sont respectivement de 5400 ppm, 1,3 % et 1700ppm ;
- une abondance relative élevée des terres rares lourdes par rapport aux légères avec un rapport La / Yb voisin de 3;
- une homogénéité remarquable de ces faciès bien soulignée par des coefficients de variation faibles, très inférieurs à 100 %.

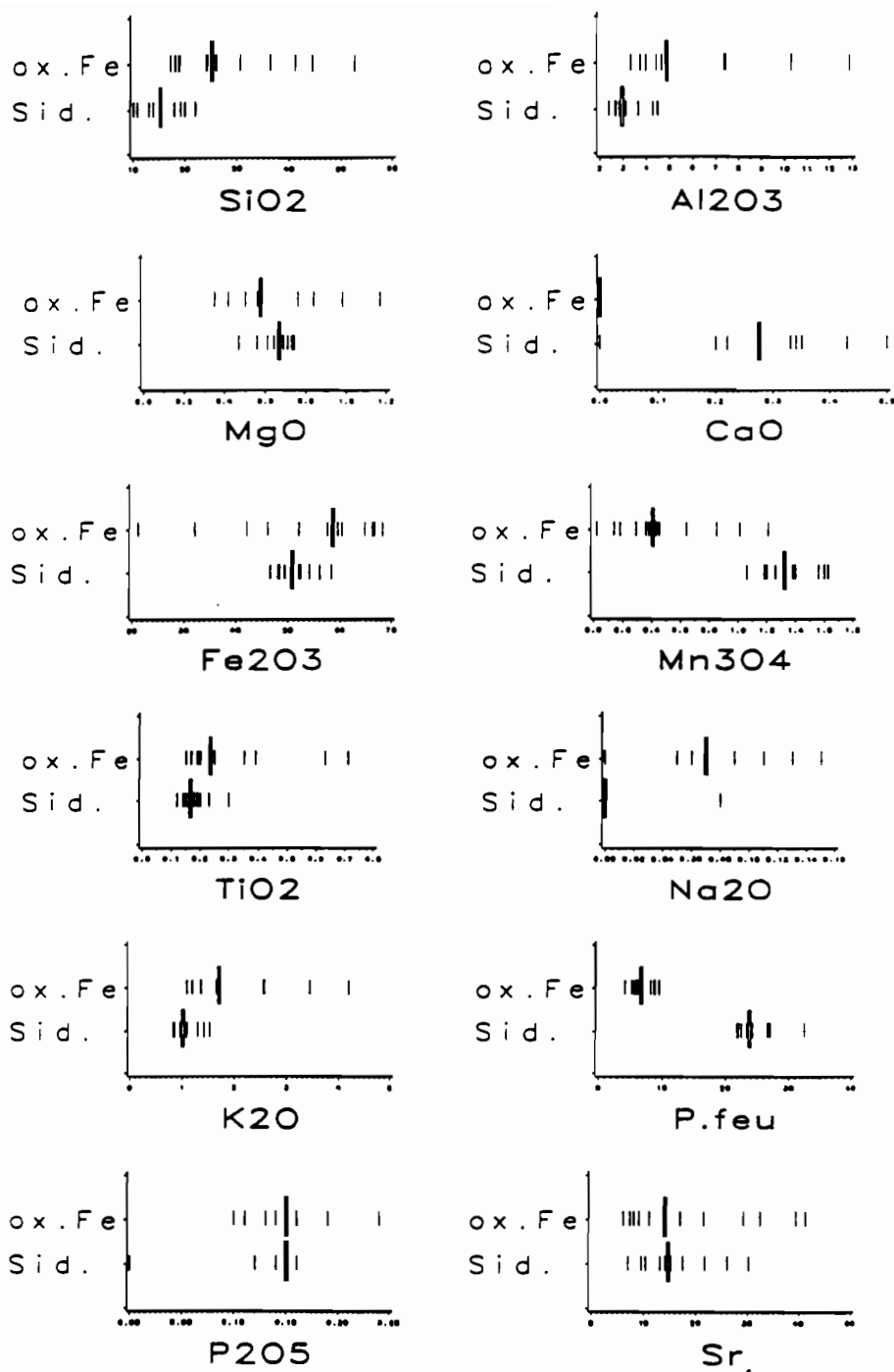


Figure 33 - Cascade d'Opoblé. Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans la sidérite et dans le faciès oxydé massif.

Légende: - Chaque trait représente un échantillon.

- Le trait long porté pour chaque faciès représente la médiane de l'élément dans ce faciès.

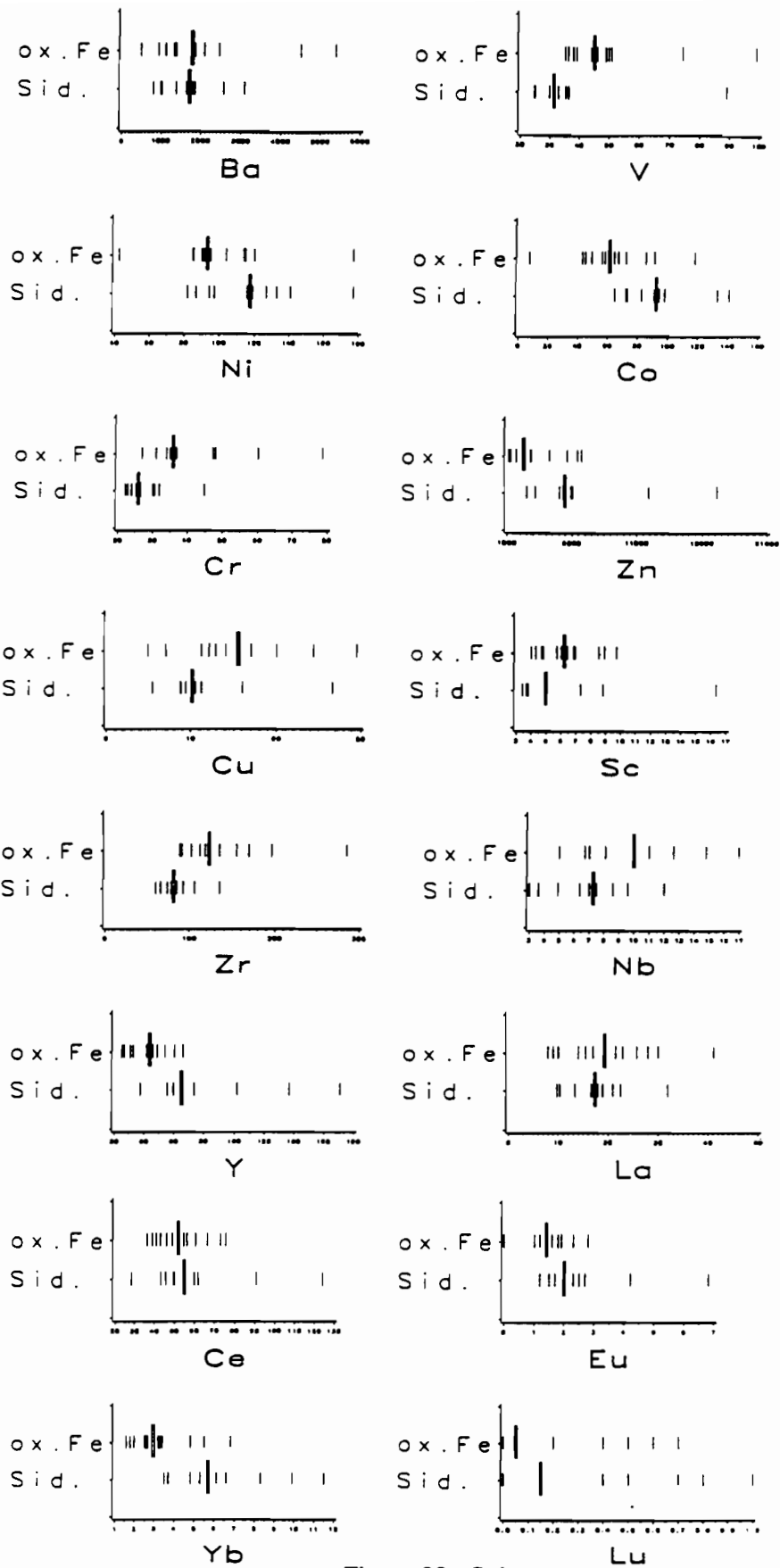


Figure 33 - Suite.

b - Particularités chimiques des faciès oxydés

Comme les sidérites, ils sont riches en Si (25 % SiO_2), Al (5 % Al_2O_3), Mg et K, qui sont en relation avec l'abondance des micas et des quartz. D'autre part, ils présentent

des anomalies en Zn (2300 ppm) et Ba (1800 ppm). Enfin comme pour les sidérites, ils sont caractérisés par des coefficients de variation faibles.

c - Comparaison des composition chimiques des deux faciès

En considérant les distributions des teneurs sur les diagrammes et en comparant les paramètres statistiques entre eux, les remarques suivantes peuvent être faites. Outre Fe, de nombreux éléments sont plus abondants dans les faciès oxydés que dans la sidérite: Si, Al, Ti, Na, K, V, Cr, Cu, Sc, Zr et Nb. D'autres éléments sont moins abondants dans les faciès oxydés: Mn, Ni, Co, Zn, Y, Eu, Yb et peut-être Lu. Comme il sera vérifié par les traitements statistiques multi-variés, les éléments les plus abondants dans les faciès oxydés sont ceux qui sont préférentiellement liés à la phase silicatée, donc aux micas.

2 - Problèmes posés par ces différences de teneurs

L'augmentation apparente de l'abondance des micas traduite par l'augmentation des teneurs en éléments des silicates déjà observée dans les ferruginisations sur sidérite en Australie (Taylor, 1977) est à première vue surprenante. Il est en effet difficile de l'attribuer à des différences de constitution de départ, la formation étant apparemment homogène. Il n'est par ailleurs pas raisonnable d'envisager que l'évolution d'un faciès à l'autre a néoformé des micas. Pour expliquer cette augmentation, on peut envisager qu'il y a enrichissement relatif dans une évolution isovolume.

L'étude pétrographique a en effet montré que l'évolution de la sidérite en faciès oxydé se fait par une pseudomorphose des grains de sidérite qui conserve les textures et doit donc conserver également les volumes. Ceci conduit à l'hypothèse d'une diminution de densité comme responsable de l'augmentation apparente des micas. Pour vérifier cette hypothèse, des mesures de densités et des calculs isovolumes ont été pratiqués.

Compte tenu de la conservation des microtextures, le raisonnement à isovolume est une approche parmi d'autres, car il a été démontré que l'oxydation de la sidérite se fait avec une réduction de volume ménagée (Liao et al; 1983). De plus, les micas ayant servi de guides dans la reconstitution des phénomènes d'altération et d'oxydation, leur persistance dans les matériaux ferruginisés autorise à un autre type de calcul. Il s'agit de calcul à alumine constante d'après la méthode de Streng (1858-1860).

a - Méthodes de calculs

- A volume constant

Des mesures de densités ont été effectuées sur deux échantillon dont un de sidérite et un du faciès oxydé par comparaison des poids dans l'air et dans l'eau. Elles ont donné 3,49 g / cm³ pour la sidérite et 2,68 g / cm³ pour le faciès oxydé. Les poids d'éléments par unité de volume ont été calculés, pour les deux faciès, par la relation $q_e = d.E/100$ (avec q_e = poids par unité de volume; d = densité; E = pourcentage pondéral).

- A alumine constante

Dans la méthode de Streng, on admet que dans le profil d'altération climatique, un oxyde le plus souvent TiO₂ ou Al₂O₃ n'a pas subi de changements de quantité absolue dans les différents horizons. Pour le calcul on applique la formule:

$$x = \frac{a*B}{b*A} \text{ dans laquelle,}$$

A = pourcentage en poids d'un composant chimique dans la roche initiale;

a = pourcentage en poids du même composant dans l'horizon H₀ (la partie oxydée);

B = pourcentage en poids du composant de référence dans la roche initiale;

b = pourcentage en poids du composant de référence dans l'horizon H₀.

(Le facteur 100 indique l'enrichissement en pourcentages des différents composants par rapport à la roche initiale).

Ici les calculs sont faits en considérant que Al_2O_3 demeure constant. Les résultats sont donnés dans le tableau XXXVIII où sont portés seulement les pourcentages pondéraux et les différences Δ (V) et Δ (Al)

Tableau XXXVIII - Evolution des teneurs lors de l'oxydation de la sidérite: 1 = calcul à volume constant avec $d = 3,49$ et $2,68$; 2 = calcul à alumine constante.

Eléments	Sidérite (% pondéral)	Faciès oxydé (% pondéral)	Δ (V)	Δ (Al)
SiO_2	15,3	25,1	+ 26,0	- 3
Al_2O_3	2,9	4,9	+ 29,7	-
MgO	0,7	0,6	- 34,0	- 49
CaO	0,3	0,1	- 74,3	- 80
Fe_2O_3	50,7	58,5	- 11,4	- 32
Mn_3O_4	1,32	0,4	- 76,8	- 82
TiO_2	0,16	0,23	+ 10,7	- 15
Na_2O	0,04	0,07	+ 171,0	+ 3
K_2O	1,0	1,7	+ 30,4	0
P_2O_5	0,15	0,15	- 23,1	- 49
	ppm pondéral	ppm pondéral		
Sr	15	14	- 28,8	- 45
Ba	1713	1780	- 20,2	- 39
V	31	45	+ 12,0	- 14
Ni	118	93	- 39,6	- 54
Zn	5413	2261	- 67,9	- 75
Zr	81	123	+ 16,5	- 10
Co	92	61	- 49,2	- 61
Cr	26	58	+ 72,2	+ 32
Cu	10	15	+ 15,2	- 12
Sc	5	6	- 0,1	- 30
Nb	7	10	+ 0,1	- 16
Y	65	44	- 48,0	- 60
La	17	19	- 13,5	- 34
Ce	55	52	- 27,6	- 44
Eu	2	1,4	- 47,1	- 59
Yb	5,7	3,0	- 54,7	- 69
Lu	0,2	0,12	- 54,3	- 65

Légende. Δ % = différence des q. e. en pourcentage du q. e. dans la sidérite; ce sont les médianes qui ont été prises en compte pour les calculs à alumine constante à l'exception de Na dont la moyenne a été considérée à cause des valeurs souvent très faibles.

b - Résultats (tableau XXXVIII)

Les résultats du calcul à volume constant montrent que, malgré la forte diminution de la densité, les éléments liés aux micas restent plus abondants dans le faciès oxydé que dans la sidérite. Comme un enrichissement absolu est très peu probable, force est de conclure que la transformation n'est pas rigoureusement isovolume, mais se fait avec un certain tassement. Sachant que les textures sont conservées à l'échelle microscopique (échelle des réticulations), on peut penser que le tassement se fait à une échelle plus grande par élimination de matière dans des fissures et des drains divers de taille supérieure au millimètre. D'autre part, le calcul montre un appauvrissement en Mn, Ca, Zn, Co, Ba, Ni, P, Sr, Y et toutes les terres rares: il s'agit d'un lessivage de ces éléments intervenant conjointement à l'oxydation. Par ailleurs, les terres rares lourdes sont plus appauvries que les légères et le rapport La / Yb est voisin de 6 au lieu de 3 dans la sidérite.

Le calcul à Al constant vient confirmer les résultats de la première méthode. Comme précédemment, on note une élimination de tous les éléments à l'exception de Si relativement maintenu et de Cr qui présente une augmentation. Par ailleurs, on constate que l'évolution pour K est nulle. K a un rapport constant aussi bien dans la sidérite que dans son faciès

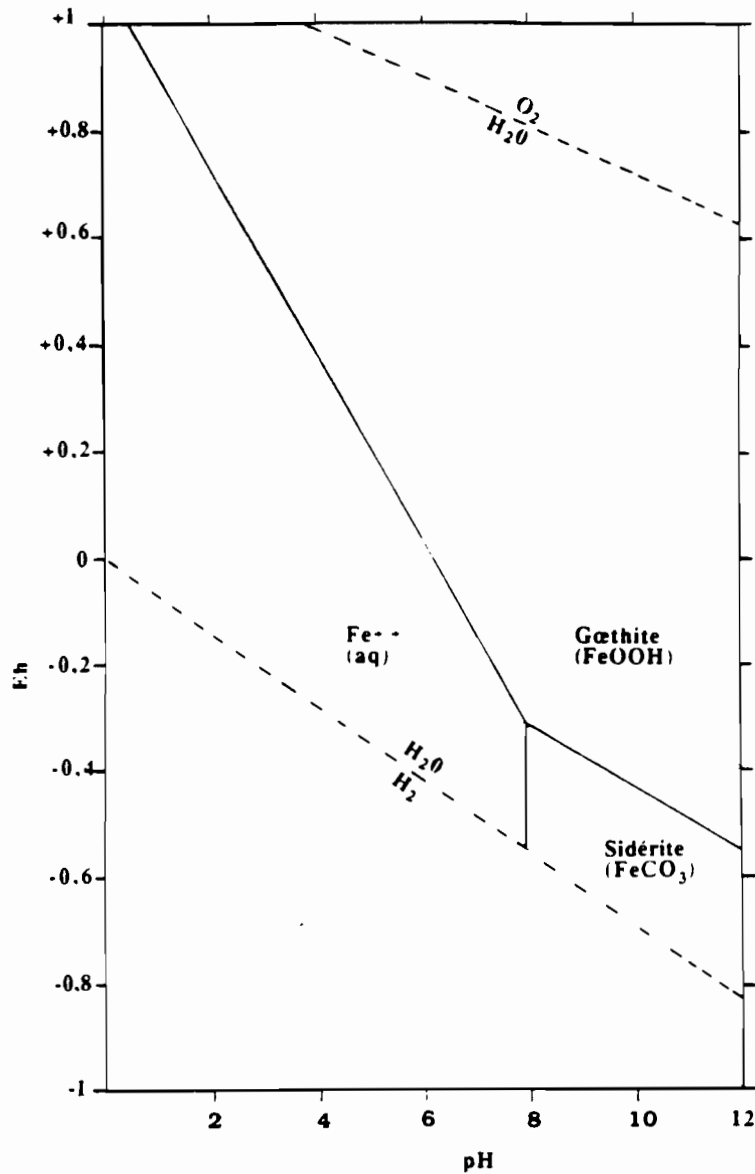


Figure 34 - Diagramme montrant les relations entre la sidérite, la gœthite et Fe^{++} à une température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\log P_{\text{CO}_2} = -2,50$. avec une activité des ions égale à 10^{-6} .

la figure 34. Ainsi dans les conditions de Eh et pH correspondant respectivement à -0,1 et 7,98, les trois espèces vont coexister. Une augmentation du Eh et / ou une augmentation du pH favorise la transformation de la sidérite en gœthite sans subir de lessivage. Lorsque l'inverse se produit, la sidérite est mise en solution: une partie évolue en gœthite et l'autre sous forme de fer ferreux.

A la différence du fer qui précipite sous forme d'hydroxyde après oxydation, le zinc contenu dans la sidérite sera maintenu en solution. Le contrôle de la teneur en Zn de la solution est réalisé par l'adsorption partielle de cet élément sur la gœthite. Les conditions dans lesquelles s'est déroulée la transformation de la sidérite en chapeau de fer peuvent être estimées à pH inférieur à 8 et Eh de l'ordre de +0,1 à +0,2 V.

4 - Conclusion

La sidérite se présente donc comme un carbonate chargé de micas et fortement anormal en Zn, et aussi Mn, Ba. Bien que la structure microscopique de la sidérite soit conservée, l'oxydation météorique de ce matériau se fait par un processus qui n'est pas tout à fait isovolume, et s'accompagne d'un tassement. Il y a d'autre part une perte globale d'éléments importante puisque la densité baisse sensiblement. La perte se fait par un départ

composé principalement de CO₂ (qui n'apparaît pas dans le tableau) et de Fe (environ 11 % de départ). Le résultat final est un faciès ferrugineux massif qui garde de fortes anomalies en Zn, Mn, et Ba malgré un lessivage notable de ces éléments.

B - Analyses microsituées

Elles ont porté d'une part sur les minéraux de la sidérite saine (sidérite, dolomite, pyrite, muscovite, rutil et zircon), d'autre part sur ceux des faciès oxydés essentiellement la goëthite et l'hématite dont plusieurs faciès ont été préalablement définis au microscope d'après leur texture, leur couleur et leur situation par rapport au réseau réticulé. Des oxydes de manganèse ont été aussi analysés. Les résultats d'analyses ponctuelles sont donnés dans le tableau XXXIX. Après avoir présenté les caractères géochimiques des divers minéraux analysés, on cherchera à préciser la composition des sidérites et en particulier comment le zinc y est distribué.

1 - Compositions moyennes des divers minéraux

a - Dans la sidérite

La sidérite. Elle présente une composition homogène avec une teneur en fer relativement basse puisqu'elle est au maximum de 52 % FeO alors que la teneur théorique est de 62 %. Elle contient systématiquement en teneurs assez élevées Mn (jusqu'à plus de 2 % MnO en moyenne par lame), Zn (jusqu'à 2,4 % ZnO), Mg (jusqu'à 2 % MgO), Si (jusqu'à 1,4 % SiO₂), Ca (jusqu'à 1,3 % CaO). D'autre part, des abondances notables de Al, P, S, Ba et Pb sont fréquemment détectées; Pb en particulier dépasse 1 % à cinq reprises.

La dolomite. Elle a été mise en évidence dans un seul échantillon à la microsonde électronique et donne une composition chimique de l'ordre de 28 % de CaO, 22 % de MgO, 3 % de FeO, 1 % de SiO₂ et un peu de Mn.

La pyrite fraîche. Elle a été analysée dans deux échantillons et présente une composition normale avec des teneurs en Fe et en S homogènes voisines de 45,6 % de Fe et 53,7 % de S. Des traces de Si, Al, Mg, Mn et Ba ont été détectées dans l'une des pyrites. Aucune trace de Zn n'a été détectée.

Les muscovites. Elles ont une composition chimique voisine de 50 % de SiO₂, 29 % de Al₂O₃, et 10 % de K₂O avec un rapport SiO₂ / Al₂O₃ voisin de 1,70. Elles sont aussi riches en Mg (jusqu'à 3,7 MgO) et aussi en Fe (jusqu'à 2 % FeO) et contiennent parfois en teneurs notables Ba (jusqu'à 2,7 % BaO) et des traces de Pb, Mn et S.

Le rutil. Comme ceux analysés dans les roches primaires, les grains de rutil contiennent en plus de Ti (95,4 % de TiO₂), des impuretés en Si, Al et Fe.

Le zircon. Il présente une composition moyenne de 61 % ZrO, 31 % de SiO₂, 2,6 % de P₂O₅, et des traces de Al, Ca, Ti et Fe.

b - Dans le faciès oxydés

Goëthite. Si l'on excepte le faciès crypto-cristallin (G₄ dans le tableau XL), les goëthites ont des compositions qui varient relativement peu avec des teneurs en Fe voisines de 81 % Fe₂O₃ et 1 à 2 % de SiO₂, 0,2 % de Al₂O₃; Mn est le plus souvent dosable avec des teneurs voisines de 0,3 % MnO; Zn enfin apparaît en teneurs variées pouvant dépasser 1 % ZnO. Seul le faciès cryptocristallin diffère nettement des autres avec des teneurs en Fe n'excédant pas 42 % Fe₂O₃. Cela s'explique par des bouclages très largement inférieurs à 100 % qui traduisent une microporosité plus grande dans ce faciès

Tableau XXXIX

Composition chimique de quelques minéraux de la sidérite et de faciès oxydé massif de la Cascade
(résultats d'analyses à la microsonde électronique: les résultats avec * ont été obtenus à la microsonde LINK, les autres à la CAMEBAX).

Sidérite saine

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	ZrO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Sidérite																	
Coeur	71 (11)	n.d.	0,60		0,47		0,20	n.d.	0,33	n.d.	1,65	53,58	n.d.		0,37		
	72 (3)	"	0,47	0,20	0,49				0,16	"	1,21	54,57	"		1,18		
	73 (5)	"	0,50	0,09	0,30			"	0,11	"	1,25	53,13	"		0,51		
	74 (6)	"	1,87				0,07	0,08	"	"	1,47	53,65	"		0,06		0,47
	120 (4)	"	1,96		0,16		0,04	0,03	"	1,14	"	53,58	"		0,14		0,03
	836-1 (34)	"	-				0,06	"	"	"	1,69	50	"		0,67		0,10
	836-2 (5)	"	n.d.				0,30	"	"	"	1,60	49,52	"		1,60		
Bord	71 (13)	"	0,61	0,14	1,38		0,17	"	1,29	"	1,60	51,51	"		1,21		0,09
	72 (3)	"	0,52	0,15	0,22			"	0,42	"	1,90	53,52	"		1,15	0,41	0,05
	73 (4)	"	0,36	0,04	0,22	0,05		"	0,10	"	1,64	52,05	"		0,48		
	74 (7)	"	0,73		0,32	0,07	0,10	"	0,51	"	1,48	52,33	"				0,24
	120 (5)	"	0,51		0,05		0,05	"	0,18	"		55,04	"		0,54		0,09
	836-1 (31)	"	0,25					"	0,06	"	2,09	50,80	"		2,38		
	836-2 (6)	"	n.d.				0,07	"	"	"	1,38	48,48	"		1,16		0,68
Joint	71 (2)	"	0,64	0,28	0,85			"	0,44	"	1,10	36,26	"		0,90		0,20
	72 (1)	"	0,39		0,76		0,07	"	0,12	"	1,22	55,87	"				
	74 (1)	"	0,92		0,19	0,26		"	0,79	"	1,72	54,59	"	0,34			
Sidérite*	71 (9)		0,84	0,25	0,39				0,65		2,04	55,24	"		0,56		

Autres minéraux

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	ZrO	CuO	ZnO	BaO	PbO	
Musco.	72 (4)	"	3,14	29,09	50,11		003	"		"		1,35	"			1,01	0,18	1,72
	73 (3)	"	3,74	29,60	51,11		1,08	"		"	0,60	0,91	"				1,08	1,72
	836-1 (5)	"	3,63	28,88	48,29			"		"	0,04	1,83	"		0,06	2,67	0,05	1,69
Musco.*	71 (8)		3,72	29,58	49,47			9,80		0,55		1,95	"			2,67		1,67
Rutile*	71 (3)			0,27	0,95					95,44		0,24						
Zircon*	71 (5)			0,57	30,88	2,64			0,37	0,86		0,53	61,09					
Dolom.	836-1 (1)	"	22,03					"	27,94		0,12	2,87	"					

Pyrite

Minéral	N° Echant.	Na	Mg	Al	S	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr	Cu	Zn	Ba	Pb
Pyrite	836-1 (28)	"					53,40	n.d.		"		45,73	"	0,01	0,01		
	71 (3)	"	0,26	0,78	1		53,93	"		"	0,27	47,71	"		0,03	0,30	

Facès oxydé massif

Minéral	N° Echant.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZrO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Héma.	PTOG 85 (1)	n. d.		0,54	3,39		0,11	n.d.			0,09	88,33					
H ₁	TOG17B (2)	"		0,12	0,66	0,28	0,60	"				81,19		0,12			
Goet.	PTOG 85(12)	"		0,16	1,13			"			0,25	79,27			0,65		
G ₁	TOG17B (2)	"	0,18	0,40	0,82	0,06	0,50	"			0,16	75,82					
G ₂	74 (3)	"			0,71		0,13	"			0,37	84,8			0,15		
	75 (10)	"	0,04	0,20	2,21		0,10	"	0,04		0,45	69,53			1,00		
G ₃	75 (2)	"		0,36	1,48	0,06	0,07	"	0,05			86,45			1,15		0,14
G ₄	74 (1)	"			0,74		0,10	"			0,26	39,41					
	75 (5)	"	0,18	0,38	5,43	0,06	0,42	"	0,17		0,21	44,28			0,60	0,05	
Q	75 (1)	"	0,40		2,57			"	0,89		63,59	1,31			2,11	6,80	0,41

Légende : Coeurs et bords des grains de sidérite; Joints entre grains de sidérite; **Héma.** = Hématite non différenciée; **H₁** = Hématite microcristalline sans texture; **Goet.** = Goethite non différenciée; **G₁** = Goethite microcristalline peu nette de paroi de réticulation; **G₂** = Goethite microcristalline de petite réticulation; **G₃** = Goethite microcristalline de cavité de grande réticulation; **G₄** = Goethite cryptocristalline brune sans texture; **Q** = Minéraux résiduels de manganèse; **Muscov.** = Muscovite; **sidérite.** = Sidérite non différenciée; **Dolom.** = Dolomite; **n.d.** = non dosé.

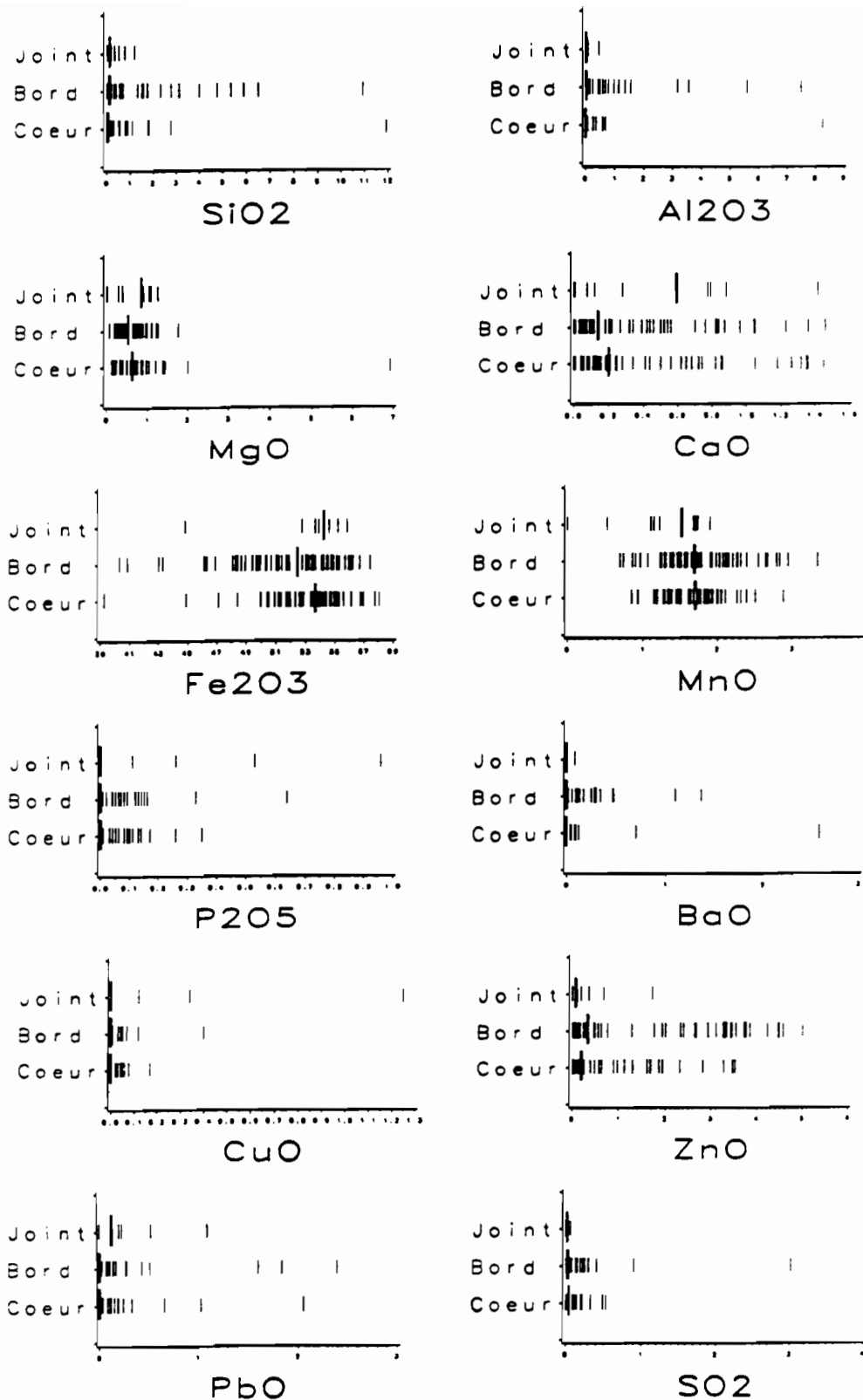


Figure 35 - Cascade d'Opblé. Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques entre le bord et le coeur des grains de sidérite, (valeurs extrêmes éliminées).

Légende: - Chaque trait vertical représente une analyse microsituée.
 - Le trait long représente la médiane de l'élément .

Tableau XL

Composition statistique (a) et test de différences des moyennes (b) entre le bord et le coeur des grains de sidérite.

a - Composition statistique

		MOYENNES											
		Fe2O3	P2O5	BaO	CuO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO3
TOTAL	132	52.08	0.05	0.08	0.02	0.72	0.45	1.05	0.33	0.13	1.69	0.67	0.13
coeur	52	52.96	0.04	0.07	0.01	0.51	0.41	0.72	0.23	0.11	1.68	0.76	0.10
bord	69	51.69	0.04	0.10	0.01	0.95	0.47	1.43	0.45	0.13	1.77	0.60	0.15
joint	11	50.31	0.17	0.01	0.16	0.29	0.52	0.29	0.08	0.21	1.30	0.65	0.03
		ECARTS TYPES											
		Fe2O3	P2O5	BaO	CuO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO3
TOTAL		4.50	0.12	0.30	0.12	1.77	1.01	1.41	1.16	0.37	0.51	0.65	0.36
coeur		3.20	0.07	0.37	0.03	1.70	0.43	0.99	1.14	0.33	0.41	0.94	0.14
bord		3.71	0.09	0.26	0.05	1.93	1.34	1.65	1.25	0.41	0.54	0.34	0.45
joint		10.55	0.31	0.02	0.38	0.39	0.46	0.52	0.13	0.33	0.59	0.45	0.03
		MINIMUMS											
		Fe2O3	P2O5	BaO	CuO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO3
coeur		39.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.11	0.00
bord		40.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.06	0.00
joint		19.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		MAXIMUMS											
		Fe2O3	P2O5	BaO	CuO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO3
coeur		58.04	0.35	2.59	0.17	11.93	1.45	3.52	8.24	2.05	2.88	6.91	0.53
bord		57.42	0.64	1.37	0.40	10.93	1.1	5.01	7.49	2.39	3.34	1.76	3.01
joint		55.87	0.96	0.08	1.25	1.20	1.42	1.73	0.48	1.09	1.90	1.26	0.07
		MEDIANES											
		Fe2O3	P2O5	BaO	CuO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO3
TOTAL		53.17	0.00	0.00	0.00	0.09	0.18	0.21	0.02	0.00	1.67	0.56	0.03
coeur		53.65	0.00	0.00	0.00	0.04	0.20	0.20	0.01	0.00	1.70	0.63	0.04
bord		52.46	0.00	0.00	0.00	0.11	0.14	0.34	0.03	0.00	1.69	0.52	0.03
joint		54.24	0.00	0.00	0.00	0.12	0.59	0.08	0.03	0.12	1.52	0.85	0.02

b - Test de différence des moyennes entre coeur et bord.

	d	2.S _d	d > 2.S _d *
Fe	-1,27	1,26	oui
P	0	.029	
Ba	0,03	.12	
Cu	0	.015	
Si	0,45	.66	presque
Ca	0,06	.34	
Zn	0,71	.48	oui
Al	0,22	.44	
Pb	0,02	.13	
Mn	0,09	.17	
Mg	-0,16	.27	
S	0,05	.11	

Légende: d = différence des moyennes.

$$S_d = (\text{écart-type de la distribution statistique de } d) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

* condition pour que les moyennes aient 95 chances sur 100 d'être différentes.

que dans les autres. Les goëthites issues de l'altération des pyrites ne se distinguent en rien des autres.

Hématite. Elle renferme elle aussi des impuretés silico-alumineuses notables, en abondances du même ordre que les goëthites ; contrairement à celles-ci, on n'y détecte que très peu de Mn et pas de Zn.

Un oxyde de manganèse a été mis en évidence à la microsonde dans un échantillon du faciès oxydé et a donné outre Mn (63,6 % MnO), des teneurs assez fortes en Ba (7 % BaO), en Zn (2,11 % ZnO), en Si (2,5 % SiO₂) et secondairement en Fe (1,1 % Fe₂O₃). Il s'agit de psilomélane.

2 - Compléments sur la composition des sidérites (tableau XL)

Le fait qu'elle soit porteuse de fortes anomalies a conduit à approfondir l'étude de la sidérite à la microsonde, en cherchant à situer dans les grains de carbonate les éléments en anomalie et tout particulièrement le zinc. On a pour cela multiplié les analyses ponctuelles, tracé des profils de teneurs à travers les grains et des cartes de répartition pour divers éléments.

a - Analyses ponctuelles

Les analyses ponctuelles ont fait l'objet d'une statistique comparative entre trois types de sites dans les grains de sidérite: le cœur, le bord et les joints entre grains. La comparaison est faite à l'aide des paramètres statistiques univariées (tableau XLa) et des diagrammes de distribution (figure 35).

Une différence se note entre les bords et les cœurs des grains : les bords apparaissent comme enrichis en plusieurs éléments et tout particulièrement en Zn, pour lequel le test statistique indique que la différence est significative (tableau XL b) et moins sûrement en Si et Al ; ils sont appauvris en Fe (test significatif) et moins sûrement en Mg. Il semble donc qu'il y ait une certaine pollution des bords des grains et ceci particulièrement en Zn. Les joints, pour lesquels le nombre de points est insuffisant pour faire un test statistique, tendent à être enrichis en P, Cu, Ca ; mais ces mesures sont peu sûres en raison du sillon qui sépare fréquemment les grains et perturbe l'analyse.

Les diagrammes de la figure 35 montrent des distributions fortement dissymétriques pour la plupart des éléments, ce qui est bien traduit par les écarts type élevés et les médianes très différentes des moyennes. Seul parmi les éléments dosés, Mn a une distribution bien symétrique aussi bien dans le cœur des grains que sur les bords. Zn enfin montre une distribution bimodale sur les bords des grains avec un mode pour de basses teneurs et l'autre vers 3,5 % ZnO. Cette bimodalité est attribuable à la contamination par des fluides oxydants.

b - Profils de teneurs

Des profils de teneurs ont été tracés à la CAMECA SX 50 pour cinq éléments (Fe, Mg, Mn, Zn et Y) dans diverses zones de la lame AB836-1 préalablement observées au MEB en électrons rétrodiffusés. Les résultats des points d'analyses composant les profils sont donnés dans le tableau en annexe. L'yttrium n'est pas considéré dans ce qui suit car il est très mal détecté. L'observation faite au MEB en électrons rétrodiffusés montre que la sidérite est fréquemment zonée avec des zones claires et sombres souvent concentriques, parfois de géométrie quelconque par rapport à celle du grain (Pl. VIII, photos 1 et 2).

Les profils de teneurs au travers des grains montrent des variations souvent importantes, mais pas systématiques, en relation avec ces zonations. Deux exemples en sont donnés:

- figure 36a (zone 005) et photo 1 (Pl. VIII). Un grain présente une grande auréole sombre sur fond clair. Le profil traverse le grain en recoupant deux fois l'auréole sombre. En ces deux endroits l'auréole correspond à un enrichissement en Zn, Mn et Mg.
- figure 36b (zone 004) et photo 2, (Pl. VIII). Le grain étudié présente deux zones sombres, recoupées par le profil. De gauche à droite, la première zone est enrichie en trois éléments, Zn, Mn, Mg ; la deuxième l'est en Mn et Mg, mais pas en Zn; par

contre, Zn apparaît en forte teneur en bordure du grain, à un endroit où il n'y a pas de zone sombre.

De plus, plusieurs profils, couplés à des cartes de distribution de Zn, mais sans images en électrons rétrodiffusés permettant de distinguer des auréoles, ont été réalisés et confirment la tendance à l'enrichissement en Zn en bordure des grains. La figure 36 c (YB-AB-36 2e profil), avec les photos correspondantes, en est un exemple. Cet exemple montre aussi une distribution semblable à Zn de Mn, mais non de Mg. Cette étude des distributions géochimiques à travers les grains fait apparaître un double effet sur la distribution de Zn : effet d'une zonation réglant par ailleurs l'abondance de Mn et Mg ; effet de bordure, apparemment plus généralisé que le précédent.

On note enfin que le zinc se présente dans la sidérite sous forme d'imprégnations diffuses et non sous forme de micro-enclaves. La présence de zones plus ou moins riches en Zn suggère un apport du zinc synchrone à la formation des zones, et postérieur à la sidéritisation par une pollution de bordure à la faveur de microfissures de dissolution observées en lame mince.

c - Cartes de répartition

Des cartes de répartition de trois éléments Zn, Mn et Mg, ont été réalisées sur les échantillons de sidérite (AB-836.1 et AB836.2) à la CAMECA SX 50. Elles viennent compléter les analyses ponctuelles et les profils de répartition. Les cartes ne montrent pas, sauf pour Zn, de variations de composition dans les grains de sidérite. Les seules variations observables sont en effet celles qu'entraîne la présence de micas, de quartz ou de pyrite (Pl. IX, photos 1, 2, 3 et 4).

Zn par contre a une distribution qui n'est pas uniforme, avec une tendance à l'enrichissement à la périphérie des grains (Pl. IX, photos 2; Pl. VIII, photos 3). Cette observation confirme et permet de généraliser les conclusions des analyses ponctuelles et des profils quant à l'enrichissement en Zn des bordures de grains.

Les cartes montrent, d'autre part, que ni Zn, ni les autres éléments détectés dans la sidérite, ne sont concentrés en enclaves riches, ni en minéraux autonomes observables à l'échelle du MEB, soit quelques microns. Ils se présentent au contraire sous forme d'imprégnation diffuse correspondant probablement à des substitutions dans le réseau carbonaté.

3 - Récapitulation sur les analyses ponctuelles

Les minéraux prospectés dans les deux types de matériaux présentent des compositions chimiques banales. Dans la sidérite, seule la sidérite présente des teneurs anormales en Zn. Cette anomalies en Zn semble se répartir préférentiellement sur les bordures et dans les auréoles de zonations des grains de sidérite. Dans le faciès oxydé, les principaux constituants (gœthite et hématite) présentent des teneurs notables en Si (3,3 % SiO₂) dans l'hématite), Zn (1 % ZnO dans la gœthite), et accessoirement en Mn, S, et Al.

IV - Interprétation et conclusions

Le site de la cascade présente une coupe avec une sidérite massive à la base passant à un faciès oxydé à son sommet. L'étude de la transition entre les deux faciès montre que le second résulte d'une altération oxydante du premier. L'extension latérale des phénomènes décrits ici n'a pas été recherchée. Ceci exclut en particulier l'éventualité d'un cortège hydrothermal argileux reconnu sur l'extension de ce site à 200 m au Sud.

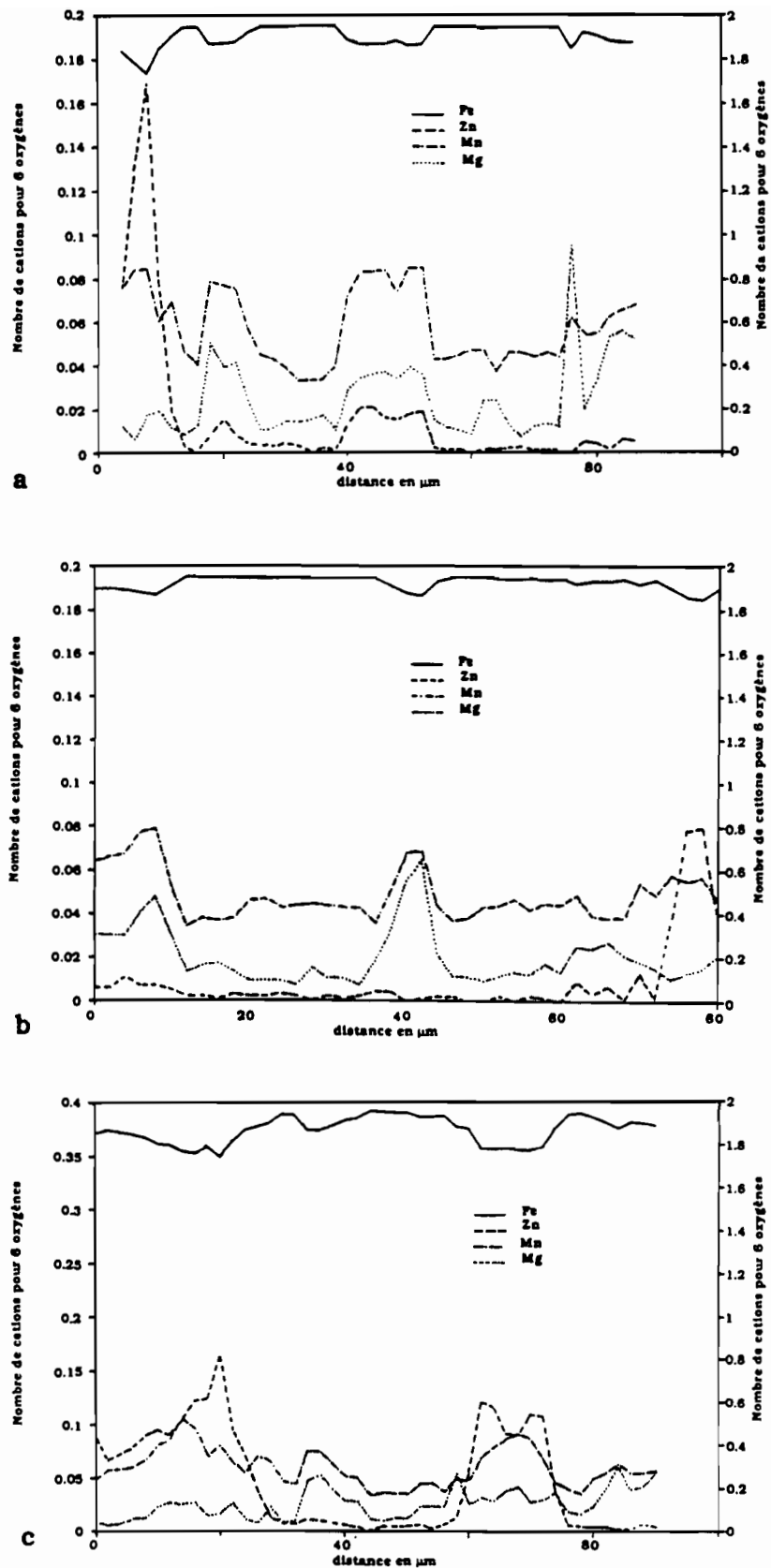


Figure 36 - **Cascade d'Opoblé**. Profils des teneurs de Fe, Zn, Mn et Mg à travers trois plages de sidérite. (éch. AB 836-2).

- a) - Profil représenté sur la photo 1 Pl. VIII
- b) - Profil représenté sur la photo 2 Pl. VIII
- c) - Profil représenté sur la photo 3 Pl. VIII

La sidérite renferme des éléments lithiques quartzo-micacés ainsi que des quartz, micas et pyrites dispersés. Un échantillon se présente par ailleurs avec une partie micaschisteuse, une autre sidérite, la jonction entre ces deux se faisant par une surface contournée montrant un développement de la seconde au détriment de la première. L'examen pétrographique de ces faciès conduit à l'hypothèse d'une genèse de la sidérite par épigénie quasi-totale d'une roche quartzo-micacée préexistante. Cette hypothèse est fondée sur les caractères de l'échantillon mixte, rappelés ci-dessus, le carriage généralisé des quartz et des micas, la tendance qu'ont les micas dispersés dans le carbonate à s'aligner selon deux directions sécantes, comme dans les éléments lithiques et les encaissants.

La composition chimique de la sidérite est marquée par des anomalies en Zn, Mn et Ba et par un rapport T.R. lourdes / T.R. légères faible (La/Yb voisin de 3). Ces caractères particuliers sont ceux des faciès de chapeau de fer et en partie des argiles blanches. La relation entre cette sidérite et les chapeaux de fer est donc étroite.

Les analyses à la microsonde montre que les anomalies les plus fortes et les plus nombreuses, celles de Zn et Mn, n'affectent dans le faciès carbonaté que la sidérite. En particulier, ni les pyrites, ni les micas ne donnent des teneurs notables en ces éléments. En outre, Zn est distribué dans tout le volume des grains, mais avec un enrichissement fréquent sur leurs bordures et les auréoles de zonation: ici Zn apparaît en partie synchrone et en partie liée à la circulation des fluides à la faveur des microfissures.

Le faciès oxy-hydroxydé de la cascade résulte d'une oxydation de la sidérite, altération dont on observe en lame mince tous les intermédiaires. Elle se fait par un remplacement de la sidérite par de la goëthite et de l'hématite, à partir du pourtour des grains, et conduit à une texture réticulée conservant le dessin de la trame sidérite. Les mailles de la réticulation sont l'équivalent exact, en forme et en taille, des micro-réticulations généralisées dans les faciès typiques des chapeaux de fer. Le devenir de la pyrite est une évolution dans le même sens avec un développement d'un boxwork typique.

La composition chimique du faciès oxydé est marquée par les mêmes anomalies que la sidérite. Le passage de celle-ci à celui-là se fait de manière presque isovolume, avec une bonne conservation des micas, un relatif maintien de la texture, un développement d'une microporosité (microréticulations). L'oxydation de la sidérite s'accompagne d'une élimination massive des éléments qui loin s'en faut ne se retrouvent pas dans le chapeau de fer. Les éléments les plus affectés sont Zn et Mn. Les exceptions sont un maintien des éléments constitutifs des micas (Al, K) et un enrichissement sensible en Cr. En outre, le lessivage affecte plus (2 à 3 fois) les terres rares lourdes que les légères; si bien que le faciès oxydé présente encore un rapport La/Yb faible par rapport aux encaissants (environ 6 au lieu de 10 à 20), mais sensiblement plus élevé que dans la sidérite.

Les faciès oxydés ont donc les caractères texturaux et géochimiques des faciès typiques des chapeaux de fer et certaines affinités géochimiques avec les argiles blanches hydrothermales voisines. Leur protore est, dans ce site de la cascade, la sidérite.

Chapitre IX

ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES CHIMIQUES

Après les descriptions détaillées des divers matériaux, nous tenterons ici de présenter les grandes tendances géochimiques qui ressortent de l'ensemble des faciès des chapeaux de fer, faciès oxy-hydroxydés, sidérites, altérations argileuses blanches. Pour bien mener cette démarche, les faciès de chapeaux de fer seront comparés à l'ensemble des roches encaissantes précédemment décrites (schistes, micaschistes, quartzites francs et brèches). Cette étude géochimique a porté sur 410 échantillons dont 342 de chapeaux de fer et 68 d'encaissants. Les dolomies cristallines, les calcschistes, les phospharénites et l'hématite massive présentés dans les divers chapitres de la troisième partie ne sont pas pris en compte ici.

Les points suivants seront tout d'abord présentés:

- une comparaison statistique des deux ensembles de matériaux;
- les terres rares et leurs particularités;
- les corrélations entre les éléments dans les chapeaux de fer.

Ensuite sera proposée une synthèse fondée sur la recherche des phases géochimiques par analyses statistiques multivariées.

I - Comparaison statistique de l'ensemble des chapeaux de fer et de l'ensemble des encaissants

Le tableau XLI donne les divers paramètres statistiques calculés pour les deux ensembles d'échantillons (chapeaux de fer et encaissants). Les histogrammes comparés entre les deux ensembles par chacun des éléments sont donnés sur la figure 37.

A - Comparaison des niveaux moyens de teneurs

En prenant les médianes, considérées comme les meilleurs estimateurs des niveaux moyens de teneurs, les chapeaux de fer se distinguent d'une part par leur richesse en Fe, avec un niveau moyen de teneur supérieur d'un facteur 10 à celui de l'encaissant, et d'autre part en Zn avec un niveau moyen de teneur de 1135 ppm contre 45 ppm dans l'encaissant soit plus de 20 fois. De plus, les chapeaux de fer présentent des teneurs légèrement supérieures que les roches encaissantes en d'autres éléments mineurs et traces en particulier Mn, P, Ni, Co et Cu dont les médianes sauf pour Cu, sont au moins le double de celles des encaissants.

D'autre part, les chapeaux de fer sont caractérisés par de faibles teneurs en éléments majeurs, mineurs et traces Si, Al, Mg, Ti, Na, K, V, Cr, Sc, Zr et Nb, leurs médianes étant au moins deux fois inférieures à celles des encaissants.

Pour Ba, les médianes sont très voisines et ne permettent pas une distinction entre les deux groupes.

Tableau XLI - Composition comparée des chapeaux de fer et les encaissants (données statistiques univariées).

Elém.	Chapeau de fer (342 éch.)						Encaissant (68 éch.)					
	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.*	% Min.	Max.	Moy.	Méd.	Ec.T.	C.V.	% Min.	Max.
SiO ₂	22,0 %	16,9	16,7	76	1,0	93,8	66,7	64,6	15,6	23	43,3	98,5
Al ₂ O ₃	5,5	3,5	7,4	136	< 0,2	50,0	15,4	17,5	8,8	57	< 0,2	30,0
MgO	0,3	0,3	0,3	78	< 0,2	1,5	1,6	1,6	1,3	81	< 0,2	7,0
CaO	< 0,2	< 0,2	< 0,2	74	< 0,2	0,8	0,4	< 0,2	1,3	305	< 0,2	8,7
Fe ₂ O ₃	59,9	66,2	19,7	33	< 0,01	96,2	5,5	5,8	3,7	67	0,5	19,0
Mn ₃ O ₄	0,74	0,22	1,42	192	< 0,01	16,6	0,11	0,04	0,35	317	< 0,01	2,78
TiO ₂	0,15	0,13	0,15	95	< 0,2	1,37	0,74	0,73	0,56	76	< 0,2	3,95
Na ₂ O	0,07	0,06	0,10	141	< 0,05	1,61	0,36	0,25	0,48	132	< 0,05	2,72
K ₂ O	0,83	0,64	0,78	94	< 0,05	4,96	4,49	5,04	2,79	62	< 0,05	9,35
P1000	9,2	8,9	4,1	45	0,3	32,5	3,9	3,8	2,9	74	0,0	14,7
P ₂ O ₅	0,51	0,35	0,5	97	< 0,1	3,02	0,18	0,07	0,48	263	< 0,1	3,94
Sr	30 ppm	9	75	253	< 1	867	49	20	92	187	< 1	590
Ba	1518	690	2583	170	2	25900	2120	677	3854	182	< 1	25200
V	67	52	70	105	2	963	97	98	51	53	< 1	219
Ni	181	130	191	105	4	2456	69	29	220	319	< 1	1437
Co	96	61	121	126	< 5	1353	21	14	30	142	< 5	199
Cr	66	32	270	407	5	4631	127	90	362	284	< 1	3044
Zn	2301	1104	3110	135	3	19925	147	45	300	205	< 1	1548
Cu	76	34	182	240	< 2	2680	27	21	34	123	< 1	261
Sc	9,1	7,0	8,0	88	0,3	69,0	13,4	14,9	7,8	58	< 0,5	28,1
Zr	62	32	56	111	< 1	500	26	23	24	94	< 1	174
Nb	6,9	7,0	3,2	46	< 5	18,0	14,0	13,0	12,0	86	< 5	90,5
Y	50	57	38	62	< 5	334	167	165	98	59	< 5	488
La	24	14	51	212	< 10	825	40	38	33	83	< 10	177
Ce	61	36	145	238	< 10	1815	83	73	65	78	< 10	324
Eu	1,5	0,5	2,6	169	< 2	32	1,0	0,5	0,9	87	< 2	4,3
Yb	4,3	2,6	5,1	120	< 0,1	39	2,4	2,4	1,9	80	< 0,1	14
Lu	0,4	0,1	0,5	128	< 1	4,1	0,4	0,3	0,3	83	< 1	1,1
La/Yb	53,7	5,39	259	482	0,28	2780	19,86	16,07	19,81	99,77	0,15	146

Légende: Moy. = Moyenne; Ec.T. = Ecart - type; C.V. = Coefficient de variation; Méd. = Médiane; Min. = Minimum; Max. = Maximum; (P1000 = Perte à 1000 °C); C.V*: coefficients de variation calculés avec transformation des valeurs normales en valeurs logarithmiques.

Les niveaux moyens des teneurs en terres rares dans les deux ensembles sont également peu différents. On verra cependant que cette apparente constance des terres rares est infirmée dans ce qui suit.

B - Comparaison des distributions des teneurs (Fig. 37)

Les distributions des teneurs des éléments sont illustrées par les histogrammes (figure 43). Deux éléments dosés Ca et Lu n'ont pas été pris en considération à cause du grand nombre des teneurs inférieures aux limites de détection. Nous avons été amenés à tronquer la plupart des histogrammes de manière à bien les étaler; c'est le cas pour Al, Mg, Mn, Ti, Na, P, Sr, Ba, V, Ni, CR, Cu, Sc, Zr, Nb, Y, La, Ce et Yb. D'autre part pour Zn, l'intérêt particulier de cet élément ici et le grand étalement de ses teneurs ont conduit à donner deux histogrammes, l'un couvrant toute la gamme des teneurs, l'autre tronqué à 9000 ppm. De ces diagrammes ressortent les points suivants.

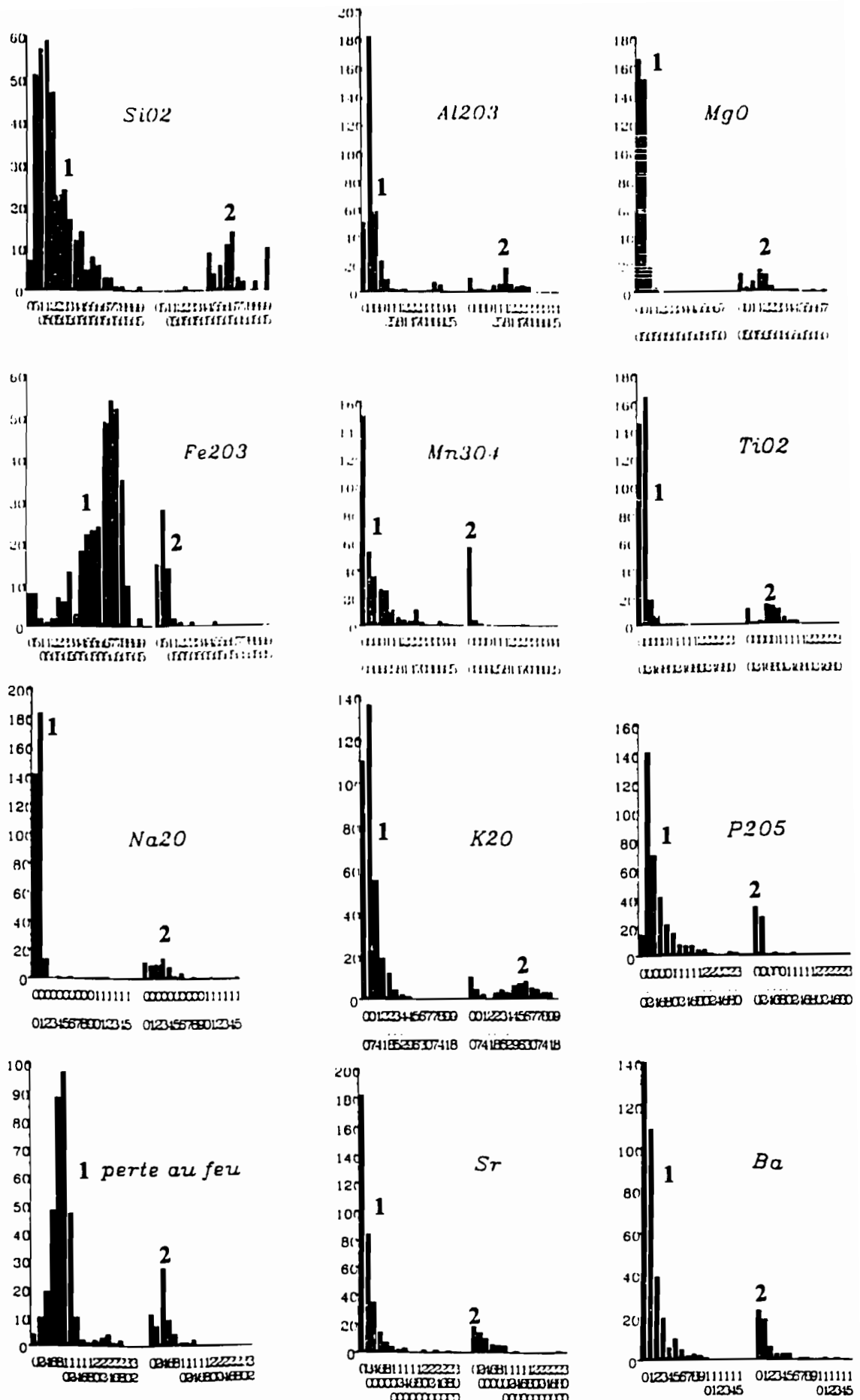


Figure 37 - Diagrammes de distribution des éléments chimiques dans les matériaux de chapeaux de fer et d'encaissants

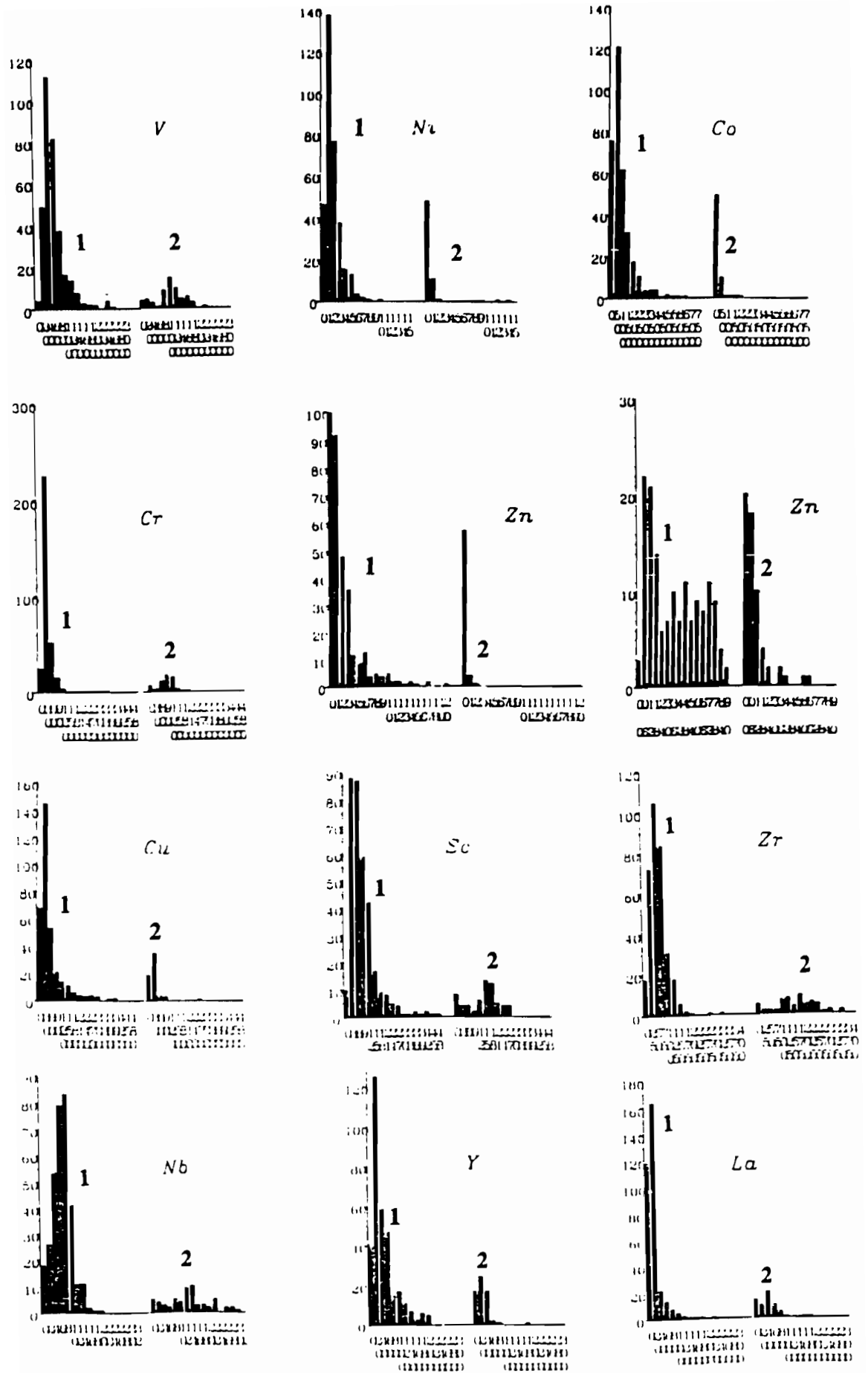


Figure 37 - Suite.

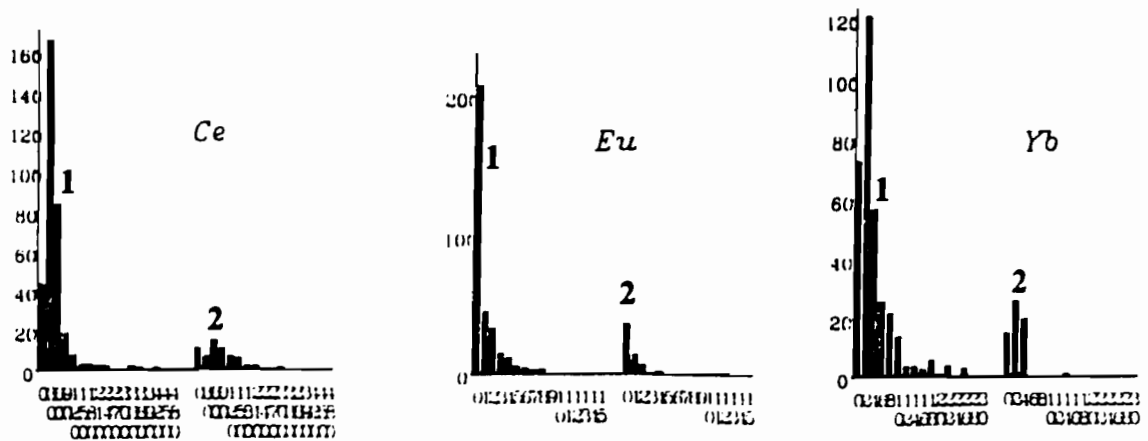


Figure 37 - Suite.

Les distributions sont très différentes dans les encaissants et dans les chapeaux de fer. Dans les encaissants, les éléments se rangent en deux familles à distributions de tendance symétrique pour l'une, dissymétrique pour l'autre. Les éléments à tendance symétrique sont Si, Al, Mg, Ti, K, V, Cr, Sc, Zr, Nb, Y, La, Yb. Ils ont en outre une tendance bimodale, à l'exception de V, Cr, Y. Ceux à tendance dissymétrique sont Fe, Mn, P, Sr, Ba, Ni, Co, Zn, Cu, Ce, Eu. Si l'on excepte le cas particulier des T.R. dont l'étude sera approfondie plus loin, il apparaît que la première famille d'éléments est celle des éléments liés préférentiellement aux micas, alors que ceux de la seconde famille se rencontrent de façon privilégiée dans les chapeaux de fer. Cette distinction n'est donc pas fortuite, mais semble bien liée au fait que la série des encaissants contient des chapeaux de fer. Il serait intéressant de rechercher plus précisément la nature de cette relation, laquelle nous échappe pour le moment.

Dans les chapeaux de fer, tous les éléments ont une distribution à tendance dissymétrique, même si elle est peu marquée comme pour Cr, Zr et Nb. En outre un seul élément, Zn, montre une tendance bimodale. Les différences de distribution entre les chapeaux de fer et les encaissants sont donc importantes. C'est un des caractères géochimiques généraux des chapeaux de fer. La raison, là encore, nous en échappe aujourd'hui.

C - Les anomalies (tableau XLI)

Les écarts types sont pour les deux ensembles souvent très grands, ce qui illustre la grande diversité des matériaux. Les coefficients de variation permettent de classer les éléments d'après l'importance de leurs dispersions.

Sur un échantillonnage très diversifié avec une distribution dissymétrique très caractéristique comme celle-ci, le calcul des coefficients de variation peut conduire à des aberrations si on tient compte des valeurs les plus extrêmes. L'élimination de ces dernières, considérées comme des "monstres" a été faite sur la famille des chapeaux de fer uniquement et pratiquée comme suit: transformation en log, ce qui donne des distributions plus symétriques, élimination des valeurs supérieures à moyenne + 2 * écarts-types sur la distribution des valeurs logarithmiques; retour aux valeurs normales. Ceci dit, les coefficients de variation dans le groupe encaissant doivent être considérés avec prudence. L'analyse des coefficients de variation permet de noter une grande disparité entre les éléments dans les deux groupes de matériaux.

- Dans le groupe chapeau de fer, le coefficient va de 20 % pour Ca jusqu'à 156 % pour Mn. Quelques éléments ont des coefficients particulièrement élevés (supérieurs à 100 %): Mn, Zn, Sr, Ba, Cu, et les terres rares lourdes Yb et Lu. Cette grande dispersion rend compte du fait que ces éléments ont plus que les autres, des teneurs extrêmes nombreuses ou des anomalies importantes.

- Dans le groupe des encaissants, les coefficients de variation sont de même très variés et vont de 24 % pour SiO₂ à 319 % pour Mn et parmi les éléments à fort coefficients de

variation, Ba, Ni, Cr et Zn ont été déjà notés comme présentant quelques fortes teneurs. Ca, Mn, Na, P et Co quoique ayant des coefficients élevés, ne présentent que de rares anomalies notables dans ces matériaux.

II - Caractères particuliers des Terres Rares

A côté des anomalies déjà connues dans les chapeaux de fer (particulièrement Zn, Ba, Mn, Cu, Ni) se notent des anomalies en terres rares très irrégulièrement distribuées et pouvant être importantes. Les valeurs maximales observées sont en effet de 825 ppm pour La, 1815 pour Ce, 32 pour Eu, 39 pour Yb, 4 pour Lu, 500 ppm pour Y. Ces concentrations sont de 15 à 60 fois supérieures aux niveaux moyens de teneurs observés dans les roches de l'encaissant (tableau XLII).

Tableau XLII - Fréquence des anomalies en T. R. en pourcentage du nombre d'échantillons en référence aux abondances moyennes dans la croûte supérieure de Taylor et Mc Lennan (1985).

	La	Ce	Eu	Yb	Lu	Y
A. M. : Clarke (ppm)*	30	64	0.9	2.2	0.32	22
Encaissants (68 éch.) médiane (ppm)	38	73	0.5	2.4	0.3	23
teneurs supérieures à 2x A.M.	16%	20	17	8.8	21	13
----- 3x -----	4.4	5.9	5.9	1.5	5.9	2.9
----- 4x -----	2.9	2.9	4.4	1.5	0	1.5
----- 5x -----	2.9	1.5	0	1.5	0	1.5
Chapeaux de fer (342 éch. médiane (ppm)	14 ppm	36	0.5	2.6	0.1	32
teneurs supérieures à 2x A.M.	7.9	5.5	22	30	24	37
----- 3x -----	3.5	3.2	14	20	12	22
----- 4x -----	1.7	2.0	9.3	12	6.4	16
----- 5x -----	1.2	1.7	6.7	7.6	3.2	10

* d'après Taylor et Mc Lennan (1985)

De plus, des différences importantes peuvent être notées entre les comportements des terres rares lourdes et légères. Ces différences mettent en évidence une nouvelle particularité géochimiques des chapeaux de fer. Elles sont de deux types.

1) Une forte différence s'observe d'abord dans les abondances relatives terres rares légères / terres rares lourdes, entre les chapeaux de fer et les encaissants: la distribution du rapport La / Yb (figure 38) est marquée par un mode aigu pour des rapports voisins de 2 pour les matériaux de chapeaux de fer, alors que les encaissants donnent une distribution étalée à tendance bimodale avec des modes à 16 et 45.

2) Les fréquences des anomalies diffèrent également entre les chapeaux de fer et les encaissants: elles sont globalement plus élevées dans les chapeaux de fer; les anomalies sont par ailleurs beaucoup plus nombreuses pour les terres rares lourdes que pour les légères dans les chapeaux de fer, à l'inverse de ce qu'on observe dans les encaissants.

Cette forte abondance des terres rares lourdes par rapport aux terres rares légères est, au même titre que les anomalies en Zn, Mn, Ba, etc, un caractère géochimique fréquent des matériaux de chapeaux de fer. Elle signe très probablement une origine absolument différente de celle des formations encaissantes, signature vraisemblablement du matériel d'épigénie dont l'oxydation a conduit aux chapeaux de fer.

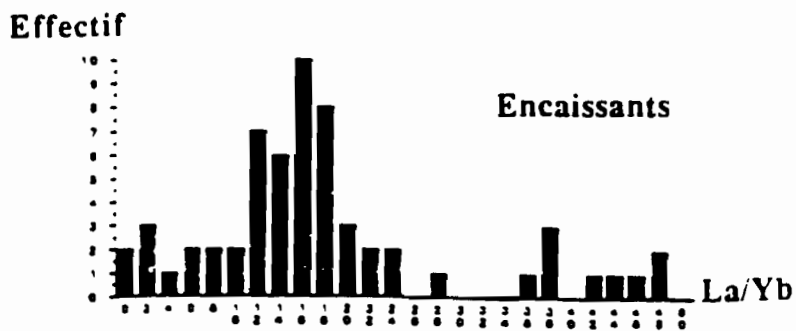
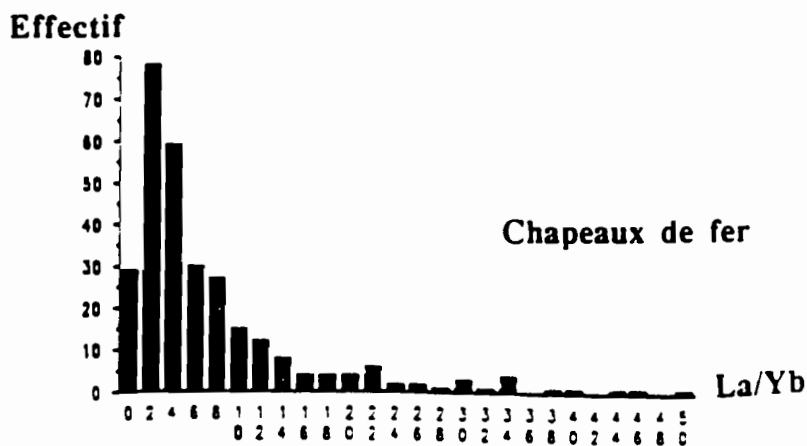


Figure 38 - Diagrammes de distribution des rapports La/Yb dans les matériaux de chapeaux de fer et d'encaissants

III - Etude des corrélations

Pour préciser les relations existant entre les éléments dans les chapeaux de fer, une brève étude de corrélation a été effectuée.

Un examen attentif du tableau des corrélations (tableau XLIII) fait apparaître plusieurs familles d'éléments inter-corrélés. Pour illustrer ces familles, quelques diagrammes de représentation des coefficients de corrélation ont été tracés (figure 39).

Un autre rangement des meilleures corrélations inter-éléments est donné dans le tableau XLIV. Trois familles d'éléments de mêmes affinités se sont individualisées:

- la famille d'Al regroupant préférentiellement les éléments liés aux micas;
- la famille de Fe associant Pf, les éléments traces et les terres rares lourdes opposée à la précédente;
- la famille de P avec des éléments proches de Fe, mais très nettement séparée de la famille de ce dernier et opposée à la famille d'Al.

Les T. R. se distribuent différemment selon qu'elles sont légères ou lourdes; les légères de préférence avec la famille de P et les lourdes avec celle de Fe.

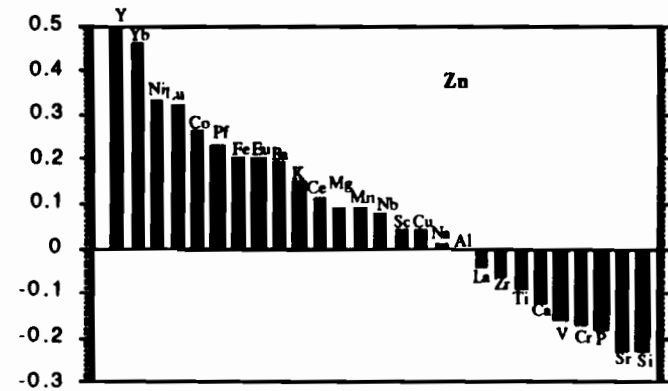
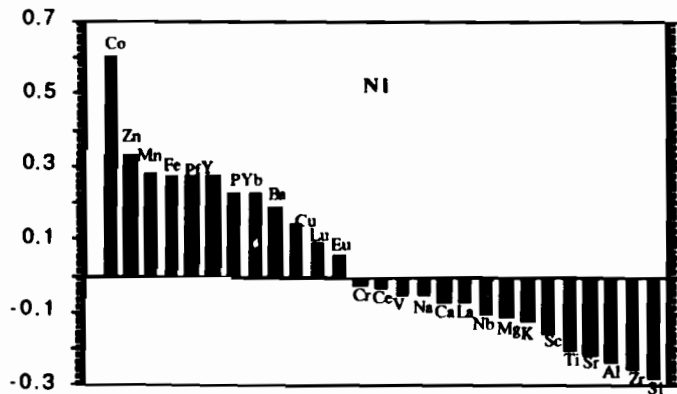
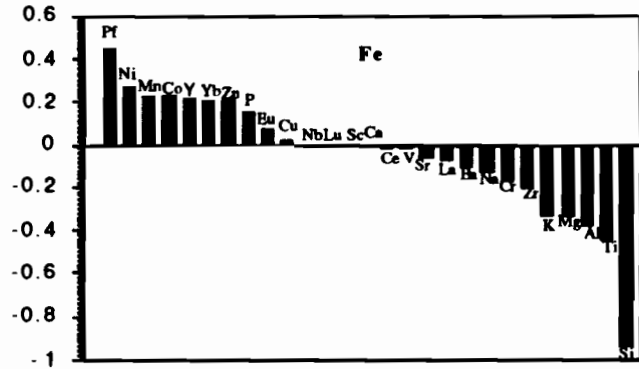
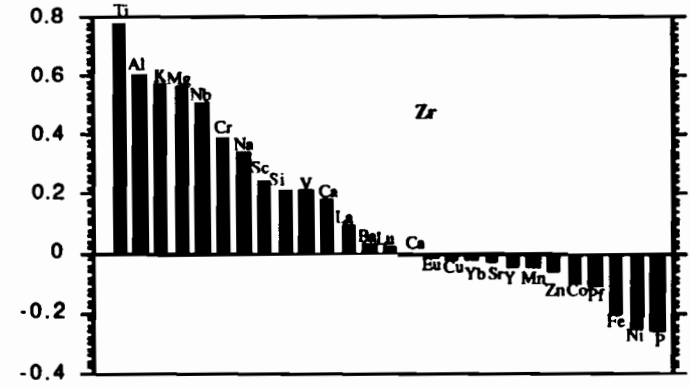
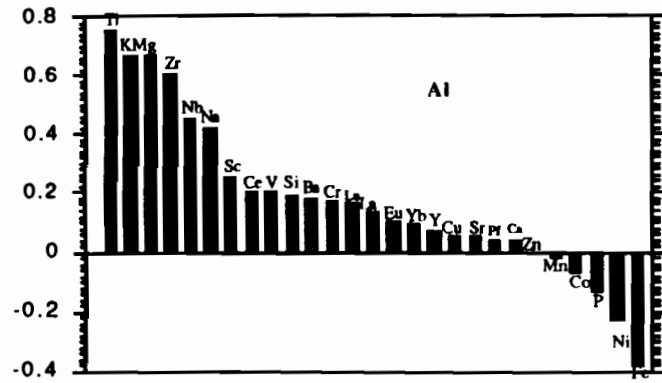
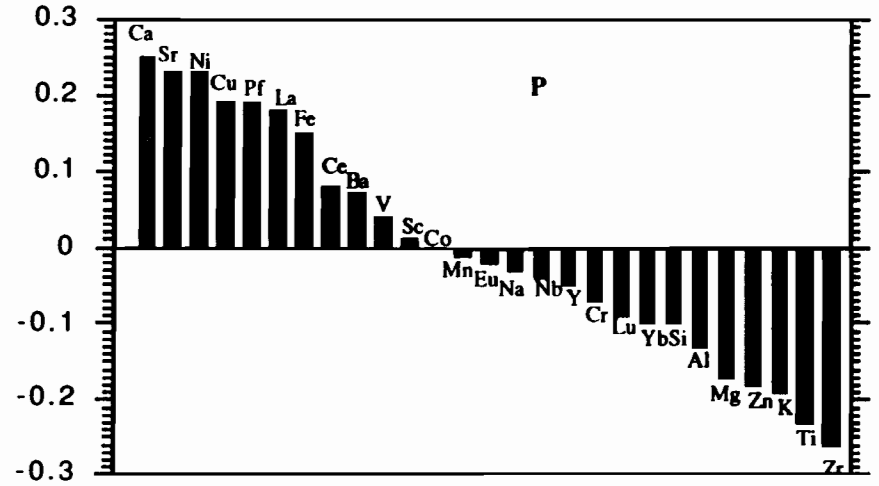
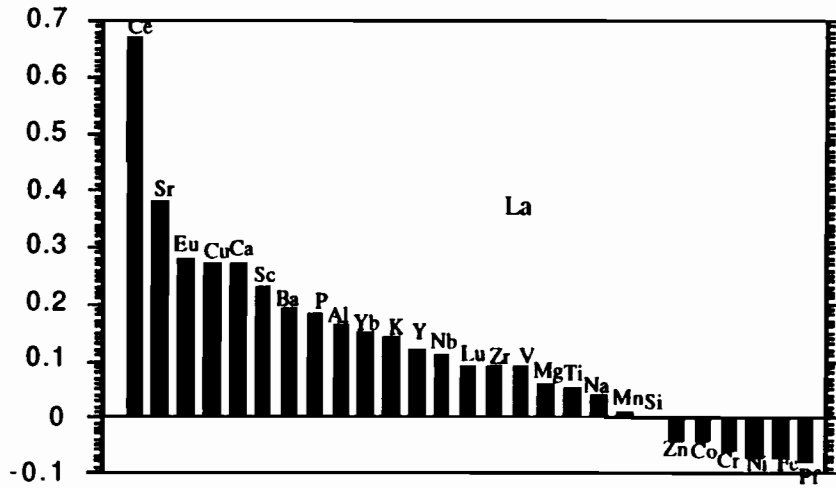


Figure 39 - Diagrammes de corrélation inter-éléments dans les échantillons de chapeaux de fer.



170

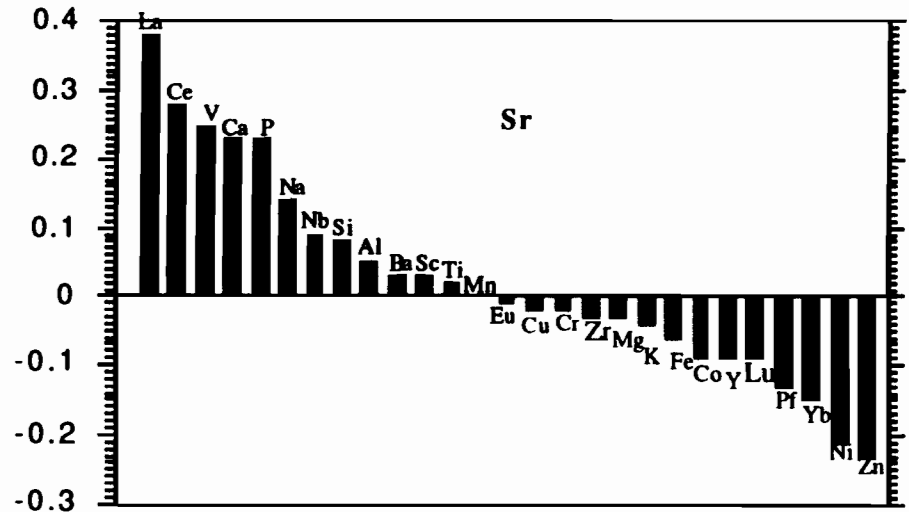
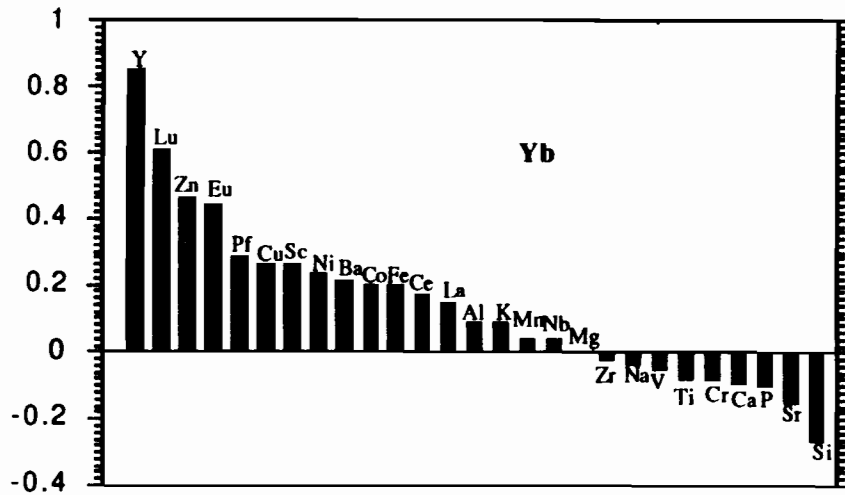


Figure 39 - Suite.

Tableau XLIV - Quelques corrélations inter-éléments

Eléments	Corrélations positives	Corrélations négatives
Al	Ti, K, Mg, Zr, Nb, Na, Sc, Ce, V, Si ...	Fe, Ni, P, Co, Mn, ...
Zr	Ti, Al, K, Mg, Nb, Cr, Na, Sc, Si, V, ...	P, Ni, Fe, Pf, Co, Zn, Mn, Y, ...
Fe	Pf, Ni, Mn, Co, Y, Yb, Zn, P, ...	Si, Ti, Al, Mg, K, Zr, ...
Ni	Co, Zn, Mn, Fe, Pf, Y, P, Yb, Ba, Cu, ...	Si, Zr, Al, Sr, Ti, Sc, K, ...
P	Ca, Sr, Ni, Cu, Pf, La, Fe, ...	Zr, Ti, K, Zn, Mg, Al, ...
Sr	La, Ce, V, Ca, P, Na, ...	Zn, Ni, Yb, Pf, Lu, Y, Co, Fe, ...
La	Ce, Sr, Eu, Cu, Ca, Sc, Ba, P, Al, ...	Pf, Fe, Ni, Cr, Co, Zn, ...
Yb	Y, Lu, Zn, Eu, Pf, Cu, Sc, Ni, Ba, Co, Fe, ...	Si, Sr, P, Ca, Cr, Cr, Ti, ...

Cette étude des corrélations donne donc un premier aperçu sur les regroupements d'éléments de mêmes affinités. Cette première approche est approfondie dans ce qui suit en utilisant la notion de "phases géochimiques" précisée par analyses factorielles.

IV- Les phases géochimiques

A - Notion de phases géochimiques

La tendance à un comportement commun d'un ensemble d'éléments chimiques, traduite par des corrélations positives entre ceux-ci, peut indiquer que ces éléments appartiennent, ou ont appartenu, à un même matériel, ou encore, ont été mis en place par un même processus. On peut appeler un tel ensemble une " phase géochimique " (Besnus, 1977). Plus généralement, on entend par "phase géochimique" un ensemble d'éléments dont les abondances tendent à varier parallèlement quand on parcourt le lot d'échantillons considéré (Besnus 1982). Les phases géochimiques se repèrent par une analyse factorielle.

L'analyse factorielle est un moyen efficace pour estimer les similitudes ou mettre en évidence les affinités entre les éléments chimiques nombreux dosés sur un échantillonnage important. Dans ce but nous avons pratiqué l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Le programme utilisé est celui de la bibliothèque ADDAD qui travaille sur les variables centrées réduites. Les valeurs manquantes sont systématiquement mises à la moyenne. Les résultats des traitements sont présentés sous forme d'un diagramme en trois dimensions où les éléments sont placés dans l'espace des trois premiers facteurs.

Le traitement a été pratiqué sur quatre lots d'échantillons, chacun inclus dans le précédent, de manière à simuler un "effet de zoom" sur des ensembles à faciès de plus en plus spécifiques des chapeaux de fer. La sélection des lots a été faite en tenant compte d'une part, de la distinction chapeaux de fer-encaissants et, d'autre part, de la richesse en fer. On peut en effet considérer que plus les échantillons sont riches en fer, mieux ils rendent compte du phénomène chapeau de fer, ce qui a conduit à sélectionner des lots à teneurs croissantes en fer, les coupures étant choisies d'après la courbe de distribution de cet élément (figure 40 comprenant tout l'échantillonnage).

Les lots retenus sont les suivants: l'ensemble des 410 échantillons, les 342 faciès de chapeaux de fer sensu lato, les 291 échantillons à $Fe_2O_3 > 40 \%$, les 213 échantillons à $Fe_2O_3 > 60 \%$.

Deux traitements comparatifs avec et sans élimination des teneurs extrêmes ont été fait sur le premier ensemble en vue de voir l'influence des très fortes valeurs (figures 41 a et b). Les autres ACP (figures 42 a, b et c) ont été effectuées sur les derniers lots avec élimination des valeurs extrêmes.

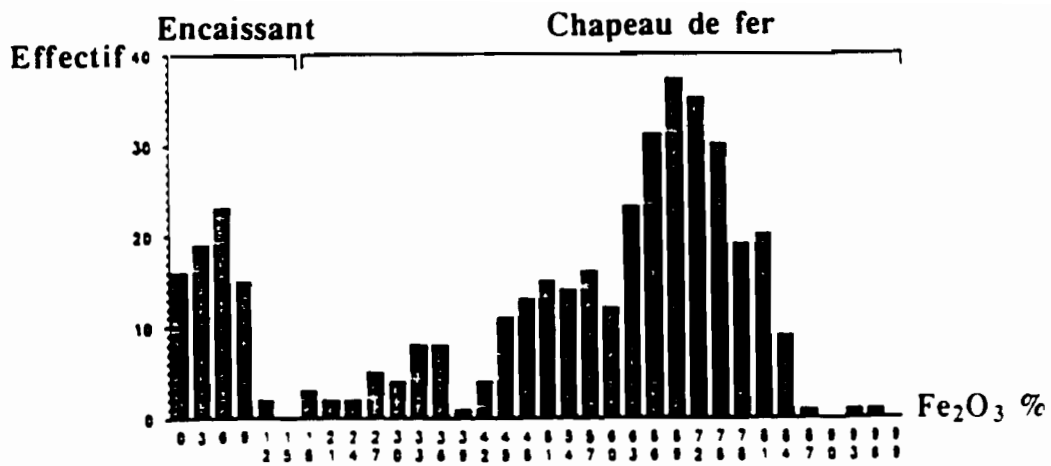


Figure 40 - Distribution des teneurs en Fe₂O₃ dans l'ensemble des échantillons de chapeaux de fer et d'encaissants.

L'élimination des valeurs extrêmes a été faite en égalant, pour chaque élément, à la moyenne de celui-ci les valeurs extérieures à l'intervalle "moyenne \pm 3 écarts types", procédé très empirique qui a l'avantage de n'éliminer qu'un très petit nombre de valeurs.

B - Résultats des traitements

Les pourcentages de variance expliqués par les trois premiers facteurs des ACP effectuées sont consignés dans le tableau XLV. Ces trois premiers facteurs rendent compte de 40 à 44 % de la variance des tableaux.

On note d'autre part que les variances expliquées diffèrent d'autant moins entre les facteurs que le lot est plus riche en fer, ce qui est en bon accord avec le fait que l'hétérogénéité diminue d'un lot à l'autre.

Tableau XLV - ACP. Pourcentages de variance expliqués par les trois premiers facteurs dans les ACP pratiquées sur quatre lots d'échantillons.

	F1 %	F2 %	F3 %
Ens. des éch. (410)	22.4	13.8	7.9
Ens. des éch. (410) (val. ext. éliminées)	22.4	13.8	7.9
Ech. à faciès C. F. (342)	18.5	13.1	9.4
Ech. à Fe ₂ O ₃ >40% (291)	17.1	14.2	9.5
Ech. à Fe ₂ O ₃ >60% (213)	15.6	15.0	10.0

1 - Premier ensemble

Un premier traitement a été effectué sur les 410 échantillons sans sélection de teneurs (figure 41 a). Dans ce traitement sont donc prises en compte des teneurs très fortes qui peuvent influencer de façon importante les résultats du traitement. Afin de diminuer ces effets, nous avons effectué une nouvelle ACP (figure 41 b) toujours sur le même nombre d'échantillons, après avoir éliminé les valeurs les plus extrêmes.

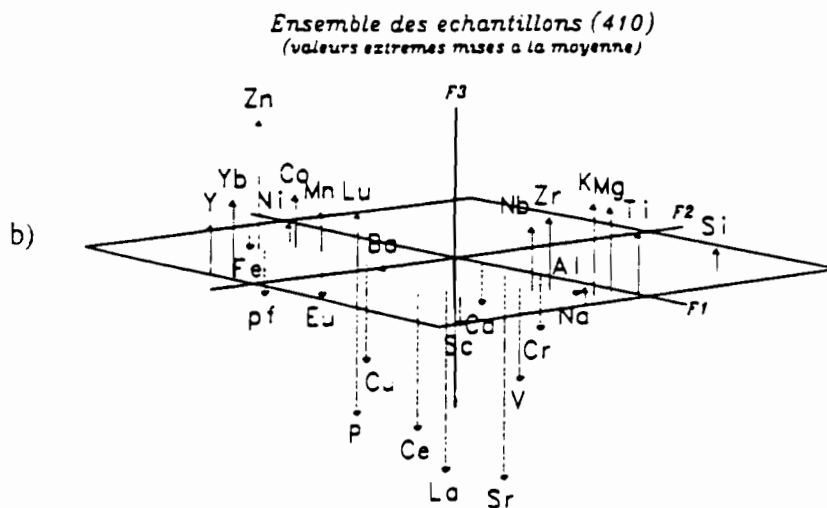
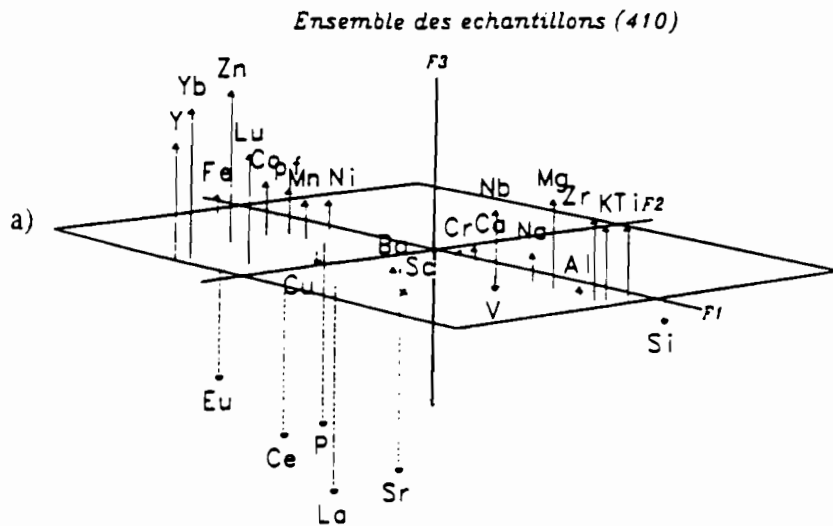


Figure 41 - Représentation des éléments chimiques dans l'espace des trois premiers facteurs d'une Analyse en Composantes Principales pratiquée sur l'ensemble des 410 échantillons.

a) avec toutes les valeurs

b) avec les valeurs extrêmes mises à la moyenne.

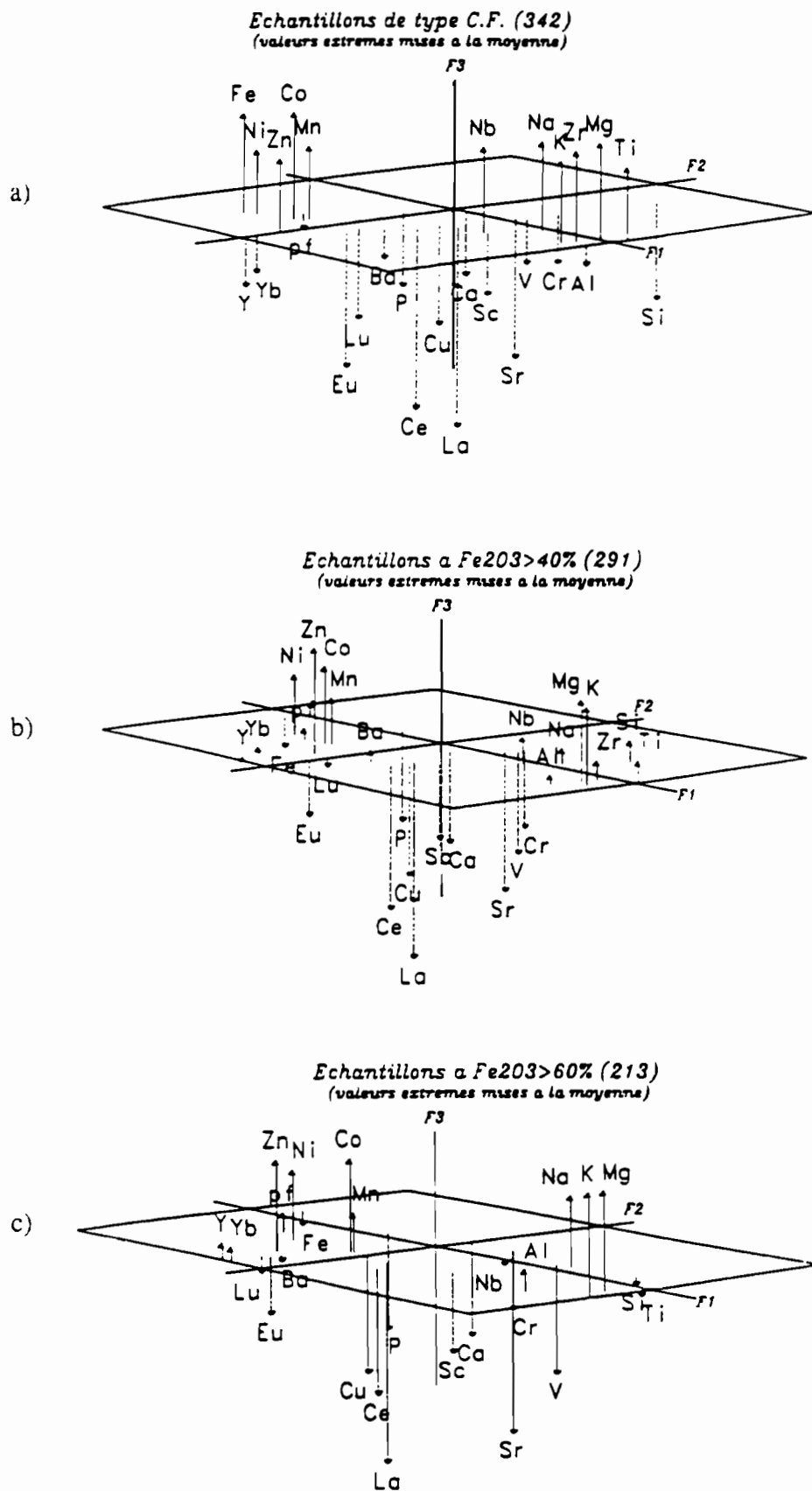


Figure 42 - Représentation des éléments chimiques dans l'espace des trois premiers facteurs d'une Analyse en Composantes Principales pratiquée sur trois lots d'échantillons.
a) Ensemble des faciès de type chapeau de fer (342 éch.).
b) Ensemble des faciès à Fe₂O₃ > 40 % (291 éch.).
c) Ensemble des faciès à Fe₂O₃ > 60 % (213 éch.).

a - ACP sur 410 échantillons avec toutes les valeurs (fig. 47 a)

Sur la figure 41 a, on peut observer trois groupes d'éléments bien définis.

Le premier groupe, bien individualisé par des valeurs positives sur F1, rassemble les éléments Si, Al, Mg, Ti, Na, K, Zr et Nb.

Le deuxième groupe, qui apparaît avec des valeurs sur F1 négatives, est formé par plusieurs éléments de la première série de transition Fe, Mn, Ni, Zn, auxquels s'ajoutent Y, et les terres rares lourdes, Yb, Lu et enfin Pf (perte au feu).

Le troisième groupe s'individualise par des valeurs proche de 0 sur F1 et surtout des valeurs fortement négatives sur F3; il est composé de P, Sr, et des terres rares légères, La, Ce et Eu.

Certains éléments, Ba, Ca, Cr, Sc et V, sont proche du centre du diagramme et ne semblent appartenir directement à aucun des trois groupes. Cu, enfin, apparaît en position intermédiaire entre les deux derniers groupes.

b - ACP sur 410 échantillons avec élimination des valeurs extrêmes (fig. 41 b)

La figure 41 b conduit aux mêmes observations très voisines de celles de la figure précédente. En effet il existe également trois groupes d'éléments comprenant chacun les mêmes éléments que sur la figure 47 a. Quelques différences mineures apparaissent: Si change de signe sur F3; Fe et Pf également; Ca, Sc, Cr, et V se rapprochent du troisième groupe; Cu également.

On remarque ainsi que l'élimination des valeurs extrêmes n'a que peu changé les résultats, contrairement à ce qu'on aurait pu attendre. Ces fortes valeurs ne doivent donc pas être considérées comme monstrueuses, mais plutôt comme des bornes supérieures d'une tendance générale de l'échantillonnage.

2 - Ensemble des échantillons de chapeaux de fer (342) (fig. 42 a)

Sur la figure (42 a) sont mis en évidence également trois groupes comme sur les figures précédentes.

- un premier groupe caractérisé par des valeurs fortement positives sur F1, comprend les éléments , Si, Al, Mg, Ti, Na, K, V, Cr, Zr et Nb;

- un deuxième groupe rassemble cinq éléments de transition, Fe, Mn, Ni, Co, Zn, très bien regroupés par des valeurs négatives sur F1 et fortement positives sur F3, ainsi que les T. R. lourdes Y, Yb, et Pf;

- un troisième groupe bien séparé du précédent par des valeurs fortement négatives sur le F3, est formé de P, Ca, Ba, Sr, Cu, Sc, et quatre terres rares, La, Ce, Eu Lu.

On remarque que V et Cr sont intermédiaires entre les premier et troisième groupes. Ba, de son côté se rapproche du troisième groupe.

La situation des terres rares dans ce diagramme mérite un commentaire. En effet, on note que Y et Yb sont en position intermédiaire entre les deuxième et troisième groupe alors que dans les ACP précédentes, ces éléments étaient nettement associés au groupe du fer. Mais on remarque aussi que, selon le facteur 1, les terres rares se rangent dans un ordre cohérent: les plus légères, La et Ce sont le plus à droite, puis viennent dans l'ordre du facteur 1 décroissant, Eu, Lu puis Yb, Y. Or c'est par le facteur 1 que le groupe du fer est tout d'abord individualisé, lequel facteur est par ailleurs celui qui porte statistiquement le plus d'information. Le groupe des terres rares apparaît alors comme très significativement scindé: les plus lourdes représentées par Yb et Y, (on a vu que Lu avait une représentation douteuse), sont pour une grande part à rapporter au groupe du fer, les plus légères, La et Ce, en sont tout à fait dissociées.

3 - Troisième et quatrième lots (fig. 42 b et c)

Pour chacun d'eux apparaissent bien dissociés les trois groupes d'éléments précédemment rencontrés, mais avec des légères différences. Fe tend à se dissocier des autres éléments de transition en prenant une valeur négative sur F3; les terres rares plus lourdes, Y, Yb, Lu, Eu, se rapprochent plus nettement du deuxième groupe; Ba tend à passer du troisième groupe au second; Cr et V s'associent plus fortement au troisième groupe.

C - Comparaisons et synthèse des ACP en termes de phases géochimiques

Comme on peut le voir donc sur les diagrammes présentés, les résultats varient assez peu d'un lot d'échantillons à l'autre. Pour chacun d'eux apparaissent bien dissociés trois groupes d'éléments, différant peu entre les quatre lots. Chacun de ces groupes peut alors être assimilé à une phase géochimique. Ainsi trois phases géochimiques ont été bien mises en évidence. En fonction de ce que l'on sait sur la composition minéralogique de ces matériaux, on peut interpréter ces groupes comme suit:

- une phase silicatée correspondant au premier groupe de chacune des trois figures, et caractérisée par les éléments Si, Al, Mg, Ti, Na, K, Zr Nb, (V, Cr);
- une phase ferrugineuse correspondant au deuxième groupe, et composée d'éléments de transition, Fe, Zn, Mn, Ni, Co, de la perte au feu (Pf), et des T. R. lourdes, Y et Yb, (Lu);
- enfin une phase phosphatée formée de P, Ca, Sr, Cu, Sc, La, Ce, Eu, (Lu, V, Cr).

Les éléments énumérés ci-dessus sont ceux qui se rencontrent dans tous les cas dans les phases correspondantes. Les autres éléments passent d'une phase à l'autre: Ba se partage entre les phases ferrugineuse et phosphatée; Lu n'apparaît qu'une fois (traitement à 342 échantillons) vers la phase phosphatée et est partout ailleurs, avec Y et Yb, dans la phase ferrugineuse; V et Cr, partagés entre la phase silicatée et la phase phosphatée, sont, à fer croissant, de plus en plus associés à cette dernière.

L'examen comparé des quatre diagrammes conduit à quelques remarques complémentaires:

- sur les deux diagrammes les plus généraux (fig.41), Si apparaît assez nettement dissocié des autres éléments de la phase silicatée, par les facteurs 2 et 3. Ceci traduit la dualité micas-quartz de cette phase.
- Dans les deux derniers lots (fig.42 b et c), Fe tend à se séparer des autres éléments de la phase ferrugineuse alors que la perte au feu leur reste associée. Sachant que, dans ces faciès, la perte au feu est principalement due aux OH de la goëthite, on voit apparaître ici une différence géochimique entre goëthite et hématite, la première contenant plus que la seconde les divers éléments traces de la phase ferrugineuse.
- Nous avons appelé "phase phosphatée" l'ensemble des éléments individualisé principalement par des valeurs fortement négatives sur le facteur 3, parce que P est le seul élément majeur qu'on y trouve (Ca, autre majeur qu'on y rencontre, est à considérer avec méfiance en raison de ses concentrations le plus souvent inférieures au seuil de dosage). Mais il faut noter que l'association de P avec les autres éléments de la phase est assez lâche puisque P est toujours plus ou moins séparé de ceux-ci par son signe sur les facteurs 1 et 2. Si on s'en tient aux seuls facteurs 1 et 2, lesquels, sont évidemment les plus significatifs, la phase apparaît comme intermédiaire entre les phases silicatée et ferrugineuse et P se rapproche beaucoup plus de cette dernière. Notons qu'il en est de même pour Cu.

D - Hypothèse sur la signification des phases géochimiques

Sur l'ensemble de l'échantillonnage comme sur les faciès les plus ferrugineux apparaissent trois phases géochimiques, toujours les mêmes à très peu de choses près. Celles-ci sont par conséquent hautement significatives, puisqu'elles ne dépendent pas de "l'échelle faciologique" à laquelle on se place.

La première où l'on trouve Si, Al, Mg, Na, K, Ti, Zr, Nb correspond de toute évidence aux quartz et aux micas; ce sont les matériaux de l'encaissant et aussi des filons. Dans les faciès les plus ferrugineux, elle correspond aux micas plus ou moins altérés qui parsèment généralement les oxy-hydroxydes de fer et aux rognons de quartz filonien. Ces matériaux peuvent être considérés comme résiduels.

A l'autre extrémité de l'échelle factorielle se rencontrent le fer et un ensemble d'éléments qu'on sait abondants dans les chapeaux de fer, Zn, Mn, Co, Ni, souvent Ba, et aussi les T. R. lourdes, Yb, Lu ainsi que Y. C'est une phase géochimique très typée caractérisant les matériaux oxy-hydroxydés des chapeaux de fer. On a vu de plus que cette phase caractérise plus précisément la gëthite.

Entre ces deux phases apparaît un ensemble d'éléments dont la persistance d'un lot d'échantillons à l'autre montre qu'il n'est pas fortuit: P, Ca, Sr, Cu, Sc, souvent V et Cr, parfois Ba. Dans cet ensemble se rencontrent aussi les T. R. légères, La, Ce ainsi que Eu. Cette phase ne correspond pas, comme les deux autres, à un type de matériau bien repéré. Sa situation intermédiaire dans l'espace factoriel peut faire hésiter entre un matériel relictuel d'encaissant et un constituant spécifique des faciès de chapeau de fer. Le doute nous paraît levé par le fait que P, qui fait incontestablement partie de cette phase, est situé vers le pôle Fe, à l'opposé du pôle Si-Al, par le facteur 1, lequel est le plus discriminant.

On parvient alors à conclure que, outre une phase silicatée relictuelle, les chapeaux de fer de Pagala sont typiquement constitués de deux phases géochimiques liées spécifiquement à sa genèse. L'une, ferrugineuse, contient les éléments très généralement anomaux, Zn, Mn, Co, Ni et en partie Ba; cette phase est aussi caractérisée par les T. R. lourdes. L'autre phase, phosphatée, contient Cu, et en grande partie Ni, éléments souvent abondants mais beaucoup moins fréquemment que les précédents; c'est elle qui, de plus, contient la plus grande partie des T. R. légères.

On a vu par ailleurs que les T. R. lourdes étaient en anomalies plus fréquentes que les légères et que, de manière plus générale, les T. R. lourdes étaient, relativement aux légères, beaucoup plus abondantes dans les chapeaux de fer que dans les encaissants. Cela illustre bien la discrétion de la phase phosphatée, qui contient les T. R. légères, devant la phase ferrugineuse qui contient les lourdes.

V - PRESENTATION ET COMPARAISON DES FACIÈS EN TERMES DE PHASES GEOCHIMIQUES

Pour pouvoir comparer les divers faciès entre eux, les 28 éléments dosés ont été projetés dans un système d'axes rectangulaires portant les deux premiers facteurs F1 et F2. Sur le même système ont également projetés les 410 échantillons. Puis les faciès sont l'un après l'autre mis en évidence par des étoiles (fig. 43). Il ressort ainsi les caractéristiques géochimiques de chaque faciès par rapport à l'ensemble de l'échantillonnage retenu.

Les trois phases géochimiques définies ci-dessus sont bien représentées sur tous les diagrammes. La phase silicatée définie par les éléments tels que Si, Al, Mg, Ti, Na, K, V, Cr, Zr et Nb, se rencontre vers l'Est du diagramme avec Si séparé des autres. La phase ferrugineuse caractérisée par Fe, Mn, Ni, Co, Zn, les T. R. lourdes Y, Yb, et enfin de pf, occupe le quart SW du diagramme. Enfin la phase phosphatée comprenant P, Ca, Ba, Sr, Cu, Sc, et quatre terres rares, La, Ce, Eu, Lu, est située entre les deux premières mais dans la moitié S du diagramme avec cependant P dans le quart SW comme pour la phase ferrugineuse.

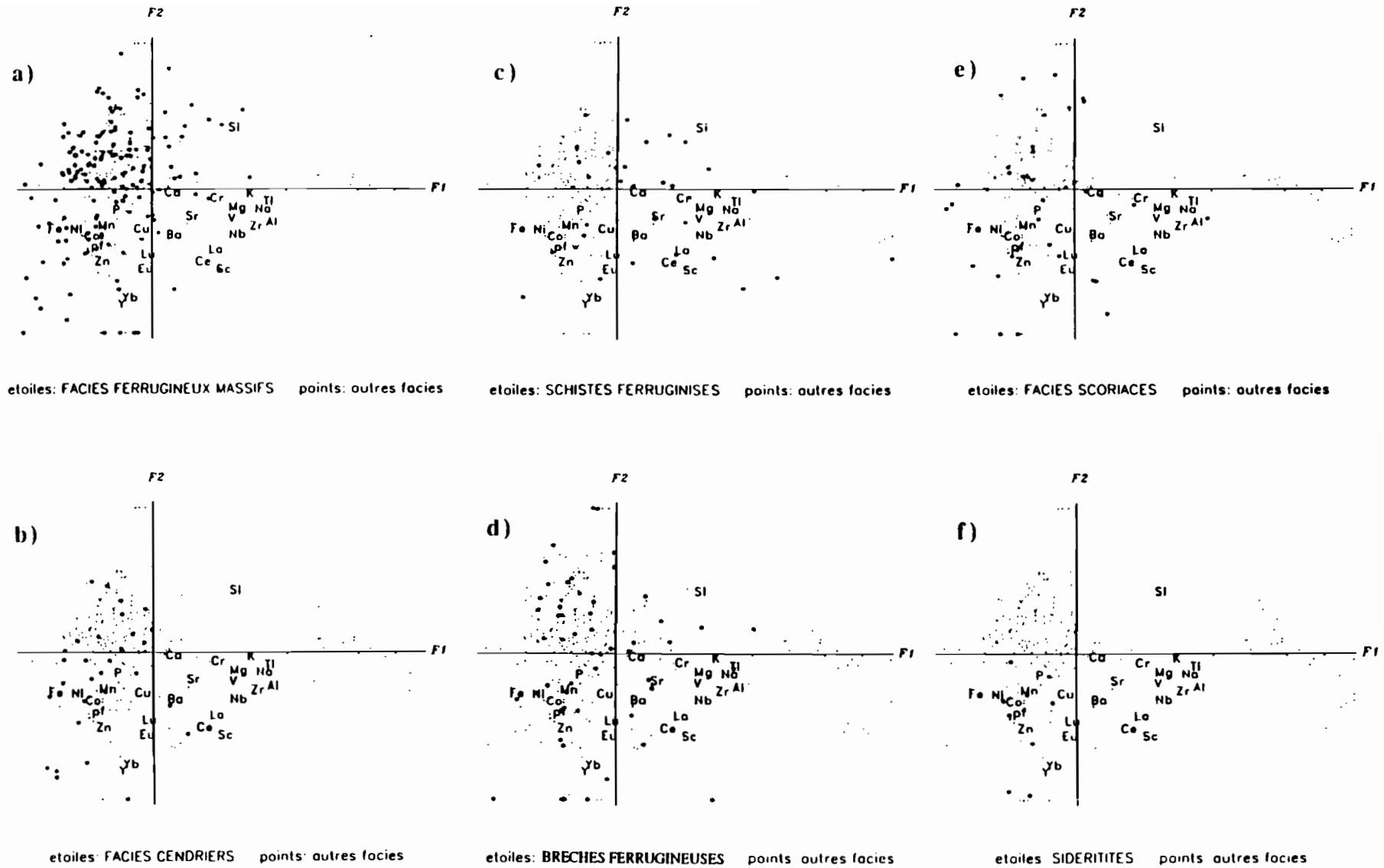
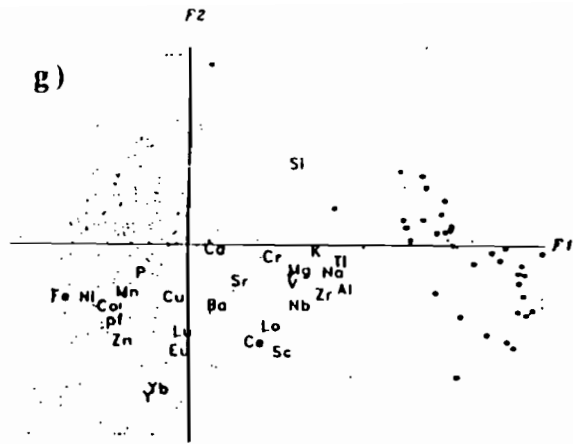
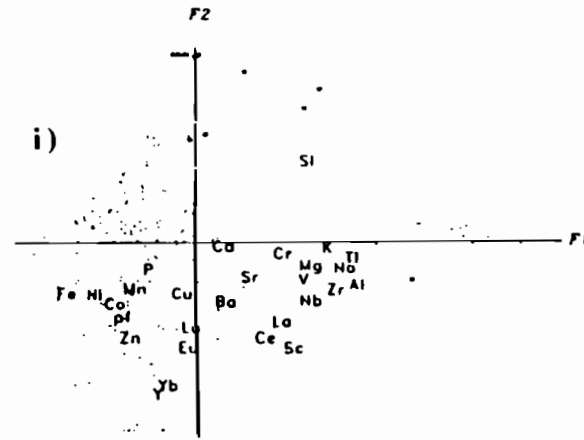


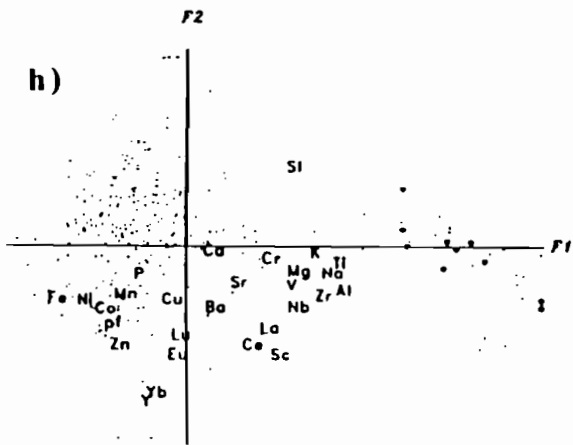
Figure 43 - Diagrammes de comparaison des faciès en termes de phases géochimiques.



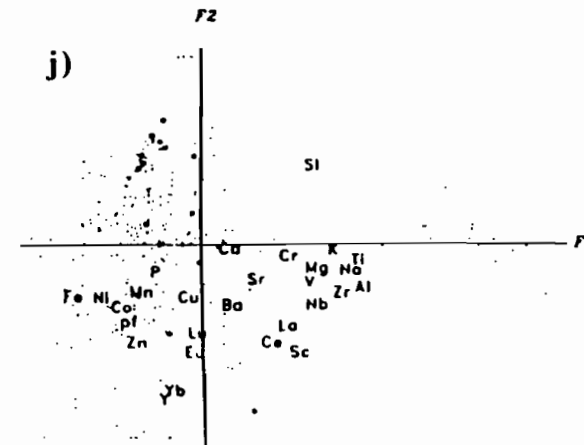
etoiles: SCHISTES points: autres facies



etoiles: QUARTZITES points: autres facies



etoiles: MICASCHISTES points: autres facies



etoiles: "CORTEGE LEGER" points: autres facies

Figure 43 - Suite.

On remarque que, comme le laisse prévoir la distribution des éléments, les faciès caractéristiques des chapeaux de fer se projettent dans la moitié ouest des diagrammes alors que les faciès typiques des encaissants le sont dans la moitié Est. En étudiant en détail chaque faciès, on constate que:

- les faciès ferrugineux massifs (fig. 43 a) sont en grande majorité situés dans la moitié W, avec une grande densité dans le quart NW;

- les faciès cendriers (fig. 43 b) se rencontrent par contre plus dans le quart SW où sont localisés les éléments anormaux des chapeaux de fer;

- les faciès schistes ferruginisés (fig. 43 c) sont distribués sur l'ensemble du diagramme, avec cependant un maximum dans la moitié Est;

- les faciès de brèches ferrugineuses (fig. 43 d) quant à eux, montrent une répartition identique à celle de la figure 43 a; il en est de même pour les faciès scoriacés (fig. 43 e);

- les sidérites (fig. 43 f) se rencontrent uniquement dans le quart SW, là où sont rassemblés les éléments caractéristiques de la phase ferrugineuse;

- les quartzites (fig. 43 i) sont naturellement localisés vers le pôle siliceux; les schistes et les micaschistes (fig. 43 g et h) se rencontrent naturellement uniquement dans la moitié E du diagramme avec une forte concentration aux valeurs élevées de F1.

- enfin, malgré la richesse en Si et Al des matériaux d'altérations argileuses blanches (fig. 43 j), les points qui le représentent ne se situent pas dans la zone E du diagramme, mais sont au contraire situés dans la partie W où se rassemblent les échantillons ferrugineux caractéristiques des chapeaux de fer. Cela est dû aux fortes concentrations présentées par les éléments des chapeaux de fer, hormis Fe, dans les minéraux d'altérations argileuses blanches et illustre très bien la parenté entre celui-ci et les faciès ferrugineux.

Dans le secteur SW se rassemblent les éléments de la phase géochimique ferrugineuse qui caractérise le mieux les chapeaux de fer. Dans le secteur SE se rencontrent les éléments de la phase silico-alumineuse. Entre les deux se distribuent les éléments de la phase phosphatée. Dans la moitié N du diagramme, le seul élément représenté est Si.

Il est par conséquent possible d'indiquer les tendances géochimiques d'un faciès d'après la situation des points représentant les échantillons de celui-ci. C'est ainsi qu'on peut dire sommairement que les échantillons représentés dans le secteur SW sont préférentiellement marqués par les caractères spécifiques des chapeaux de fer, dans le secteur SE par l'abondance des micas ou de la phase phosphatée, dans la moitié N par l'abondance du quartz.

Regardés de cette manière les divers faciès peuvent alors être classés par affinité décroissante pour la phase ferrugineuse typique des chapeaux de fer.

La sidérite, avec tous ses points dans le secteur SW, apparaît comme le faciès type des chapeaux de fer par excellence. Vient ensuite le faciès cendrier qui déborde un peu vers l'Est et le Nord. Puis se rangent les faciès scoriacés et ferrugineux massifs plus largement affectés par le micas et le quartz. Puis viennent les altérations argileuses blanches qui, malgré ses points nombreux vers le Nord, reste en partie dans le domaine des chapeaux de fer. Les faciès ferruginisés, schistes et brèches, sont encore très marqués par la phase ferrugineuse. Viennent enfin les encaissants, plus du tout en relation avec celle-ci, avec leurs points situés à l'extrême Est ou Nord du diagramme.

Chapitre X

DISCUSSION ET INTERPRETATIONS

Les principaux résultats acquis sur les chapeaux de fer de Pagala au long de ce travail permettent d'argumenter diverses hypothèses sur la nature de ces chapeaux de fer et les mécanismes de leur formation. Ces hypothèses sont de niveaux divers. Certaines sont factuelles et présentent une bonne probabilité de véracité. D'autres, moins assurées, seront quand même présentées, car elles contribuent à former le faisceau d'arguments et de présomptions permettant d'aboutir à un schéma général cohérent.

Un schéma global synthétique sera présenté en conclusion. Il ne prétend pas "être la vérité", mais il a le mérite de rendre compte des observations de toutes natures, terrain, pétrographie, géochimie globale et ponctuelle, accumulées pour ce travail.

I - Rappel des résultats acquis

A - Les roches de l'encaissant

Les chapeaux de fer sont intercalés dans des formations géologiques de la série de Pagala à caractère volcano-sédimentaire. Les principales roches de cette série, que nous avons convenu d'appeler "roches primaires", sont des schistes et micaschistes variés dans lesquels sont intercalés des quartzites divers, des dolomies cristallines, des calcschistes, des passées de phospharénites et d'hématite massive. Localement, des brèches soulignent l'activité tectonique.

Les roches silicatées et carbonatées qui constituent l'essentiel de la série, ont une constitution minéralogique banale avec:

- pour minéraux cardinaux quartz, muscovite, séricite, chlorite, albite, et accessoirement calcite, sidérite, pyrite, rutile, ilménite, grenat, pour les schistes et micaschistes;
- quartz dominant associé aux muscovites, feldspaths, hématite, magnétite, dolomite pour les quartzites;
- principalement dolomite, et de manière subordonnée quartz, muscovite, chlorite, calcite et minéraux opaques pour les roches carbonatées (dolomies et calcschistes).

Ces roches présentent également des compositions chimiques normales, marquées cependant par des anomalies en nombreux éléments traces, mais qui restent accidentelles. Les plus notables se rencontrent pour Zn, Ba et T.R. légères dans les schistes, Mn, Ni, Co, Cr, Cu dans les quartzites, P, Ba, Zn, Cu, Zr et T.R. lourdes dans les brèches. De même, les compositions chimiques des minéraux analysés sont normales, à l'exception toutefois de la muscovite qui est d'une part riche en fer et en magnésium et qui présente d'autre part un rapport Si/Al élevé caractérisant un degré de métamorphisme faible.

Les roches les plus rares forment trois cas particuliers présentant des constitutions minéralogiques et compositions chimiques très différentes de celles du contexte général. Les phospharénites, composées d'apatite, ne sont connues que par leurs faciès d'altérations alumineuses et ferrifères. La sidérite a une constitution minérale dominée par la sidérite avec quartz et muscovite subordonnés et pyrite accessoire. Enfin, l'hématite massive est

composée presque exclusivement d'hématite et accessoirement de plumbogummite et de gahnite. Leurs compositions chimiques tranchent nettement sur toute la série environnante. Elles présentent de très fortes anomalies variées. L'hématite présente de nombreuses caractéristiques permettant d'en faire un protore des chapeaux de fer avec une forte teneur en Fe et des minéraux spécifiques de Pb et de Zn. Cependant, son altération observée sur le terrain est très limitée et conduit tout au plus à une induration ou à un détritique repris par un cuirassement ambiant. Là où les paramètres minéralogiques et chimiques sont réunis, il n'y a pas de chapeau de fer, ce qui fait exclure l'hématite comme protore de ces derniers.

B - Les faciès d'altérations argileuses associées aux chapeaux de fer

Des faciès d'altérations argileuses de l'encaissant, associées aux chapeaux de fer, n'ont pour le moment été observés que sur un seul site (chapeau de fer n°3), intercalés entre les schistes micacés et les faciès ferrugineux. Ces matériaux sont constitués presque exclusivement de minéraux argileux, kaolinite-métahalloysite et / ou de gibbsite. La gorceixite est accessoirement associée au minéral 1/1. Les phyllosilicates sont bien cristallisés (par exemple la métahalloysite apparaît en beaux tubes) et sont interprétés comme d'origine hydrothermale. La gibbsite pourrait représenter un produit d'altération secondaire de ces minéraux argileux.

Ces roches sont composées essentiellement de silice et d'alumine hydratées et sont marquées par de fortes anomalies systématiques ou erratiques en Ba, Ni, Zn, Y, Ce, Yb. Les teneurs atteignent ou dépassent 2 % Ba dans l'échantillon le plus phosphaté, 2000 ppm Zn dans celui gibbsitique et 300 ppm Ni dans ceux riches en kaolinite-métahalloysite. D'autre part, ces matériaux présentent dans l'ensemble des rapports T.R. légères / T.R. lourdes faibles (La/Yb souvent inférieurs à 5), ce qui correspond aux caractères spécifiques des chapeaux de fer. La relation spatiale directe de ces altérations avec les chapeaux de fer, ainsi que la similitude des anomalies géochimiques de ces deux ensembles, montrent qu'il existe une relation étroite entre les genèses de ces deux faciès.

C - Les faciès ferrugineux

Les faciès ferrugineux sont de deux types, à caractères pétrographiques distincts, correspondant à des mécanismes de genèse très différents, bien que liés tous deux à l'élaboration des chapeaux de fer. Les premiers dits "roches ferruginisées", résultent de l'évolution du matériau de l'encaissant affecté par le voisinage d'un chapeau de fer. Les autres, sont ceux qui forment les chapeaux de fer proprement dit; on les a appelés "faciès typiques des chapeaux de fer"

1 - Les faciès de roches ferruginisées

Ce sont les schistes ferruginisés et les produits d'altération de quartzites ferrugineux et de phosphates. Les schistes ferruginisés sont caractérisés par la conservation de la structure schisteuse et l'absence des micro-réticulations typiques des chapeaux de fer. Chimiquement, ils montrent des niveaux moyens de teneurs très élevés en Si, Al, Mg, Ti, Na, K, Sc, Zr, Nb, éléments liés aux micas. Ils correspondent à une altération météorique de l'encaissant des chapeaux de fer, qui se traduit par une ferruginisation intense sous forme de goëthite et, subsidiairement, d'hématite.

Cependant, un cas particulièrement intéressant a été observé dans ce faciès. C'est un échantillon présentant à la fois les caractères d'un schiste ferruginisé et d'un faciès typique des chapeaux de fer, soulignés par une ébauche de développement de cendrier avec une texture réticulée comme dans le faciès cendrier. On pense que ce dernier correspond à un faciès de contact entre un schiste et le protore.

Toutefois, les schistes peuvent présenter des filonnets postérieurs qui évoluent de façon originale: altération et lessivage en boxwork permettant d'évoquer les figures classiques observées dans les chapeaux de fer. La forme de la pseudomorphose à grandes cavités millimétriques n'a pas permis de déterminer la nature du minéral correspondant.

Ces schistes ferruginisés se distinguent nettement des produits d'altération régionale des schistes. En effet, l'existence de termes intermédiaires (schistes ferruginisés en début de structuration en cendrier, ceux à filonnets oxydés) et les fortes anomalies notamment en Zn, montrent que ces derniers sont issus de l'oxydation de schistes qui ont sporadiquement été visités par le matériel d'épigénie qui, lorsque le phénomène a été plus massif, a conduit aux véritables chapeaux de fer.

L'altération de quartzites ferrugineux conduit à des matériaux riches en goëthite et hématite en abondances relatives variables. Les figures de répliques de la magnétite sont bien caractéristiques et ne peuvent pas être confondues avec les autres types de réseaux réticulés rencontrés ailleurs. Par contre, les réticulations dérivant du quartz sont de type macro-réticulation décrite dans les faciès typiques des chapeaux de fer.

Enfin, les faciès ferrugineux phosphatés présentent une constitution minéralogique dominée par des phosphates alumineux (wavellite, turquoise, gorcëixite, crandallite) enrobés dans une matrice ferrugineuse quartzo-micacée sans texture. Ils se distinguent par des anomalies très différentes de celles rencontrées dans les autres faciès ferrugineux, anomalies marquées par des teneurs extrêmement élevées en P, Ba, Cu, et fortes en Sr, Sc et Y. Ils sont par contre faiblement anormaux en Zn et T.R. lourdes et exempts d'anomalies en Mn, Ni, Co.

2 - Les faciès typiques des chapeaux de fer

Ils sont variés. Ont été en particulier distingués: des faciès ferrugineux massifs, des faciès cendriers, des faciès scoriacés, des brèches ferrugineuses. Ils sont essentiellement constitués de goëthite et d'hématite formant une matrice ferrugineuse renfermant du matériel quartzo-micacé.

Cette matrice présente une texture réticulée généralisée, avec deux tailles de mailles privilégiées, 20 et 100 μm , correspondant à ce qui a été appelé dans ce qui précède "micro et macro-réticulations". Les micro-réticulations sont de loin les plus fréquentes et sont la véritable signature texturale de ces matériaux. Les réticulations sont interprétées comme des pseudomorphoses par des oxy-hydroxydes de fer de matériaux préexistants. Les macro-réticulations sont dérivées de quartzites ou de filons de quartz, comme l'attestent leur taille, lesquelles correspondent statistiquement à celle des quartz les plus fréquents, et aussi les reliques de grains de quartz qu'on y rencontre parfois. Les micro-réticulations sont interprétées comme provenant de l'évolution d'une sidérite, hypothèse argumentée par des observations nombreuses qui seront reprises plus loin.

Dans le plasma ferrugineux s'observent des micas et des quartz dispersés ou rassemblés en éléments lithiques. Dans l'un et l'autre cas, les micas tendent à s'orienter dans une ou deux directions privilégiées, comme ils le font dans les roches primaires où ces directions traduisent des phases tectoniques bien repérées. Cette disposition très générale des micas apporte un argument fort à l'hypothèse d'une mise en place, par épigénie de roches quartzo-micacées primaires, par un matériel ferrugineux parental.

Enfin, ils présentent une organisation en cendriers, rencontrées à une échelle infra-millimétrique comme à une échelle pluri-décimétrique, marquée par une alternance de couches concentriques dont le développement est guidé par la présence de fissures conjuguées.

Ces divers matériaux sont caractérisés en géochimie, outre la très grande dominance de Fe, par des anomalies très élevées en éléments mineurs et traces notamment en Zn, Mn, Ni, Co, P, Cu, Ba et aussi en terres rares surtout lourdes (Y, Yb et Lu). Les fréquences de

ces anomalies, définies comme 10 fois le fond géochimique régional pris ici égal au niveau moyen de teneurs des schistes analysés, sont par ordre décroissant: plus de 200 anomalies pour Zn, 100 pour Mn, 50 pour Co, 20 pour P, Cu et Eu.

Le rapport T.R. légères / T.R. lourdes exprimé par La/Yb est très bas et voisin de 5 pour l'ensemble de ces faciès, ce qui est très bas comparé aux roches primaires où il est de 10 à 20. C'est un caractère géochimique très particulier de ces faciès.

La répartition de ces anomalies diffère d'un faciès à l'autre. C'est ainsi que les faciès cendriers apparaissent comme particulièrement propices aux anomalies en Zn, Mn et T.R. lourdes, alors que les brèches ferrugineuses privilégient plutôt les anomalies en P, Ba et Cu.

A la microsonde, les goethites et hématites, principaux minéraux constitutifs de ces matériaux se révèlent riches en divers éléments, en particulier en Zn (jusqu'à 3,7 %), P, Mn, Ba, Pb. Ces anomalies sont réparties de façon uniforme dans la goëthite et l'hématite. Seuls Mn et Ba apparaissent de façon exceptionnelle en plages de psilomélane.

Les analyses microsituées ont par ailleurs indirectement permis d'émettre des hypothèses sur l'histoire de la goëthite et l'hématite, et ceci de deux manières. D'une part les divers habitus de goëthite et d'hématite décrits plus haut sont interprétés comme étant de même génération car ils présentent tous les mêmes anomalies géochimiques. La diversité de ces faciès cristallins est donc plutôt due aux conditions locales de cristallisation qu'à des générations successives; la forme fibroradiée de la goëthite par exemple est en relation avec l'espace où elle a cristallisé.

D'autre part, le mode de distribution de Zn est dissymétrique dans l'hématite et gaussienne dans la goëthite. Pour expliquer cette distribution du Zn, un scénario parmi d'autres pourrait être envisagé. Si l'hématite s'était formée par oxydation in situ d'un minéral contenant du fer et du zinc, avec lessivage plus ou moins poussé de celui-ci, on obtiendrait en effet une distribution dissymétrique avec une majorité des échantillons montrant des teneurs faibles. Par contre, si la goëthite s'était cristallisée à partir d'une solution ferrugineuse dont la charge en Zn varie de façon aléatoire autour d'une concentration moyenne, on obtiendrait bien la distribution gaussienne qu'on observe pour Zn.

Sachant que l'hématite se forme dans des conditions de Eh relativement bas et de pH légèrement acide ou neutre, même basique, et la goëthite dans la gamme la plus large des valeurs de pH, on peut affirmer que ce scénario paraît vraisemblable. Cependant, on peut s'interroger sur le rôle de la pyrite dans la transformation de la sidérite en chapeau de fer. La sidérite et la pyrite étant deux minéraux ferrifères, leur altération dépendra de leurs degrés d'altérabilité respectifs. Se basant sur les valeurs des énergies du réseau cristallin (U), Liao et al. (1983) établissent la séquence d'altérabilité décroissante de huit minéraux comme suit: galène ----> sidérite ----> calcite ----> dolomite ----> magnétite ----> blende ----> pyrite ----> hématite. Dans cette séquence, la sidérite (U = 6,4 kcal/g) est le second minéral après la galène à s'altérer, alors que la pyrite (U = 9,9 kcal/g) est l'avant dernier à être oxydée. Dans le cas présent, la transformation de la pyrite serait postérieure à celle de la sidérite.

A ceci, vient s'ajouter un autre facteur de la vitesse d'altération: la concentration volumique du minéral dans le corps ferrugineux parental. Sornein (1980) à partir de l'exemple de Sain-Bel, montre que l'altérabilité de la pyrite est plus rapide dans les niveaux riches en pyrite, et est lente, et parfois même freinée dans ceux à teneur en pyrite plus faible. Dans le même sens, Kosakévitch (1983) souligne qu'au cours de l'oxydation de la pyrite disséminée en milieu carbonaté, les échanges avec le milieu ambiant assurent l'évacuation des ions sulfate et défavorisent l'instauration de milieu local très acide. Ceci permet de dire que le rôle de la pyrite n'est pas déterminant dans le mécanisme de transformation de la sidérite en pyrite.

D - La sidérite et son faciès d'altération

Une place importante a été consacrée dans cette étude au faciès très particulier qu'est la sidérite de la Cascade d'Opoblé, en raison de l'intérêt déterminant qu'elle présente comme protore possible des chapeaux de fer.

La sidérite est une micrite, à rognons sparitiques d'aspect filonien et d'ailleurs associés à des filonnets de quartz, incluant d'une part des micas et des quartz, soit dispersés, soit rassemblés en éléments lithiques, et d'autre part de la pyrite parfois abondante. Observés en lame mince, les micas forment, comme dans les faciès typiques des chapeaux de fer, des alignements en directions parfois sécantes et dessinent des reliques de microplis. Ceci conduit à l'hypothèse d'une épigénie quasi totale d'une roche silicatée préexistante par le carbonate ferrifère.

Cette hypothèse est par ailleurs appuyée par la présence d'un échantillon mixte interprété comme un faciès de bordure. C'est un micaschiste normal dans lequel a été observé un envahissement par la sidérite qui s'accompagne d'un démantèlement progressif des matériaux silicatés. D'autre part, des échantillons de micaschiste provenant de sondages implantés à 200 m du site de la Cascade renferment des mouches de sidérite. Ces divers faciès (faciès de bordure de la Cascade et ceux des sondages) représenteraient deux étapes successives dans le processus de sidéritisation des micaschistes par épigénie.

La composition chimique de la sidérite est marquée par des anomalies en Zn, Mn, Ba, Co, Y, Yb et Lu, et par un rapport T.R. légères / T.R. lourdes faible (La/Yb voisin de 3). Ces caractères particuliers sont ceux des faciès de chapeau de fer. La relation entre cette sidérite et les chapeaux de fer est donc étroite. Cette association est d'autre part confirmée par les ACP sur lesquelles on voit bien la sidérite tirée vers le pôle correspondant à la phase ferrugineuse.

Étudiés à la microsonde, les éléments en anomalie accessibles par ce procédé, Zn et Mn, se révèlent associés uniquement à la sidérite et jamais aux sulfures. Zn n'est pas distribué de façon homogène dans les grains de carbonate, mais tend à se concentrer, de manière d'ailleurs irrégulière, dans des auréoles intragrains d'une part et sur les bords des grains d'autre part. De même Mn ainsi que Mg ont des abondances dépendant souvent de ces auréoles sans jamais par contre être enrichis de manière notable en bordure des grains.

Le passage de la sidérite au faciès oxydé qui la surmonte a pu être étudié en détail. Les produits de l'altération sont des faciès oxydés massifs présentant les mêmes caractéristiques pétrographiques que les faciès typiques des chapeaux de fer: minéralogie dominée par goëthite et hématite, texture micro-réticulée généralisée, alignement des micas en une ou deux directions et reliques de microplis. De plus ils renferment les mêmes anomalies que celles qui ont été observées aussi bien dans la sidérite que dans les chapeaux de fer alentours; ces anomalies sont localisées dans les minéraux goëthite et hématite.

Ce passage observé en lame mince, se fait à l'échelle centimétrique. Les réticulations résultent d'un processus dont la première étape est une dissolution des grains sur leurs pourtours créant des fissures dans lesquelles précipitent des oxy-hydroxydes de fer. Ces derniers dessinent ainsi les contours des grains qui disparaissent ensuite, ménageant des cavités bordées de goëthite et d'hématite bien cristallisées, cavités qui se remplissent partiellement ou totalement de goëthite microcristalline. C'est ainsi que la goëthite et l'hématite forment une réticulation calquée sur les joints d'anciens grains de sidérite.

Les résultats de mesures de densités pratiquées sur des matériaux de sidérite et de son équivalent oxydé ont montré que la transformation de la sidérite en chapeau de fer ne se fait pas de manière rigoureusement isovolume, mais avec un certain tassement, observation confortée par la permanence des muscovites. Ces muscovites qui constituent avec le quartz, le vrai invariant de cette transformation, conservent une composition chimique spécifique: richesse en Fe et Mg constante. Certains de ces micas sont fortement

riches en Ba, caractéristique que l'on retrouve épisodiquement dans les schistes-micaschistes et dans les altérations phosphatées.

Par ailleurs, l'altération se fait avec un appauvrissement en de nombreux éléments: Mn, Zn, Co, Y, Ni, Sr, P, et toutes les terres rares: il s'agit d'un lessivage de ces éléments intervenant conjointement avec l'oxydation. Ce lessivage affecte plus les T.R. lourdes que les légères, ce qui se traduit par un rapport La / Yb voisin de 6 dans le faciès oxydé au lieu de 3 dans la sidérite.

Toutes ces observations conduisent donc à la double conclusion suivante: le faciès oxydé de la cascade est un faciès typique de chapeau de fer; sur ce site, c'est la sidérite qui est le protore.

E - Etude géochimique globale. L'apport des phases géochimiques

Sur l'ensemble de l'échantillonnage comme sur les faciès les plus ferrugineux (sidérite et chapeaux de fer) sont mises en évidence par analyses factorielles trois phases géochimiques, toujours les mêmes.

La première, où l'on trouve associés Si, Al, Mg, Na, K, Ti, Zr, Nb, correspond de toute évidence aux quartz et aux micas; ce sont les matériaux de l'encaissant et aussi des filons. Dans les faciès ferrugineux, elles correspondent à des matériaux relictuels.

A l'autre extrémité de l'échelle factorielle se rencontrent le fer et un ensemble d'éléments abondants dans les chapeaux de fer, Zn, Mn, Co, Ni, parfois Ba et aussi les T.R. lourdes, Yb, Lu ainsi que Y. C'est une phase géochimique très typée caractérisant les matériaux typiques des chapeaux de fer.

Entre ces deux phases apparaît un ensemble d'éléments comprenant P, Ca, Sr, Cu, Sc, parfois Ba, ainsi que les T.R. légères. Cette phase, par la position qu'occupe P vers le pôle Fe sur les diagrammes factoriels, apparaît également comme un constituant spécifique des chapeaux de fer.

On a été ainsi amené à conclure que, outre une phase silicatée relictuelle, un chapeau de fer est typiquement constitué de deux phases géochimiques liées semble-t-il spécifiquement à sa genèse. L'une, ferrugineuse, contient les éléments très généralement anomaux, Zn, Mn, Co, Ni et en partie Ba; cette phase est aussi caractérisée par les T.R. lourdes. L'autre, phosphatée, contient Cu, élément moins souvent abondant que les précédents en particulier Ba, et aussi une part importante des T.R. légères.

A ces phases, il convient d'en ajouter une autre qui correspond aux altérations argileuses hydrothermales et qui n'est pas individualisée comme phase géochimique par les ACP en raison probablement du fait que Al et Si qui en sont les principaux constituants sont aussi ceux de la phase relictuelle, beaucoup plus abondante. Cependant, malgré cela, les échantillons d'altérations argileuses blanches se situent, sur les diagrammes factoriels, dans le domaine des chapeaux de fer, ce qui confirme qu'il s'agit bien d'une phase associée à ceux-ci.

II - Les hypothèses générales proposées

A la Cascade, le faciès oxydé a pour protore la sidérite. Or ses caractères minéralogiques, structuraux, texturaux et géochimiques sont les mêmes que dans la quasi totalité des chapeaux de fer étudiés. Il est donc justifié d'estimer que le protore carbonaté peut être généralisé à toute la région. C'est cette hypothèse qui sera maintenant détaillée à la lumière du faisceau d'observations, de preuves et de présomptions accumulées au long de ce

travail. Ce développement se fera en deux parties: le protore carbonaté, les phénomènes d'oxydation.

A - Le protore carbonaté

1 - Mise en place de la sidérite par épigénie

La sidérite est typiquement un minéral secondaire dont la mise en place massive implique une histoire complexe dont quelques éléments d'observation permettent d'en tenter la reconstitution. En pétrographie, l'identification de l'épigénie sidéritique (ou carbonatée ferrifère) repose sur les faits suivants: la conservation de directions dans les alignements des micas qui sont des restes de schistosités S₁ et S₂; la présence de charnière de microplis dessinés par des micas; la corrosion généralisée des quartz et des micas; l'existence d'un faciès de bordure présentant le contact entre la sidérite et le micaschiste, contourné et recoupant les structures de celui-ci.

Le mécanisme responsable de la mise en place de cette roche est connu avec beaucoup moins de certitude. Cependant, les témoins d'une histoire hydrothermale sont nets tant en géochimie qu'en minéralogie par la paragenèse hydrothermale à sidérite, pyrite, muscovite barytique et quartz. En géochimie, outre les anomalies en Zn, Mn, Ba, Co, Y, la sidérite présente de fortes teneurs en T. R. lourdes par rapport aux T. R. légères. Cette différenciation des terres rares qui aboutit à un rapport La/Yb de l'ordre de 3, alors qu'il est de 10 à 20 dans l'encaissant, paraît trop importante pour être l'effet d'un phénomène sédimentaire. De plus, la présence de phospharénites (phosphates alumineux, muscovite barytique) et de faciès d'altérations argileuses (métahalloysite, gorcéixite), bien différenciés dans le paysage constituent des preuves de manifestations hydrothermales associées aux corps ferrugineux.

2 - Géométrie du corps sidéritique

Aucun affleurement naturel de sidérite n'est connu et la plupart des travaux réalisés ont été excentriques par rapport à la Cascade. De ce fait, seules quelques observations apportent indirectement des indications sur l'extension spatiale du corps étudié. Il s'agit des faciès de bordure, de micaschiste envahi de sidérite sur le site même de la Cascade, des mouches de sidérite dans un micaschiste provenant d'un sondage implanté au pieds d'un corps ferrugineux (CF3), donc à quelques décamètres au plus de celui-ci; enfin la présence d'un cendrier dans un faciès de schiste ferruginisé sur un site de chapeau de fer (CF-Z) en contact direct avec les faciès typiques de chapeau de fer. Dans les trois cas, les faciès de bordure sont très proches de l'affleurement principal du chapeaux de fer proprement dit, ce qui laisse penser que l'extension du corps minéralisé est limitée.

3 - Situation dans le contexte géologique

Aucune observation directe n'ayant été faite sur la sidérite, il faut prendre en compte les corps ferrugineux issus de celle-ci, avec des déformations réduites (phénomène de tassement). Deux types de constats ont été faits: l'aspect "stratiforme" suivant la forme allongée, leur association fréquente à des brèches tectoniques et la présence de quartz filoniens à fracturations hydrauliques. Ces aspects ne sont pas contradictoires et la meilleure façon d'en rendre compte est la mise en place de la sidérite dans des déformations tectoniques concordantes par des circulations hydrothermales. Selon qu'on est plus ou moins loin du drain, cette mise en place conduit à des faciès de sidérite plus ou moins isotropes. Loin du drain s'est développée, dans des zones distales d'épigénie tranquille, la sidérite isotrope, à géométrie stratiforme guidée par les couches de roches primaires épigénisées. Dans la zone de drain s'est développée une sidérite plus irrégulière, parcourue de filons, en épigénie de roches plus ou moins bréchifiées.

4 - Chronologie de l'anomalie en Zn dans la sidérite

Le zinc étant la principale anomalie de la plupart des chapeaux de fer étudiés et aussi celle de la sidérite, il est intéressant de noter les quelques indications qui ont pu être réunies sur son origine. Les observations faites sur la dispersion de Zn à l'intérieur des grains de sidérite, plus ou moins réglée par les zonations de ceux-ci, permettent de dire que le zinc est contemporain de la cristallisation de la sidérite. La présence de Zn dans le faciès oxydé dérivant directement de la sidérite, en abondance moindre que dans celle-ci, montre par ailleurs que le zinc du faciès oxydé provient bien de la sidérite sans qu'on ait besoin d'évoquer d'autres sources.

Le Zn est donc apporté au moment de la cristallisation de la sidérite dont l'origine est hydrothermale. Dans ces conditions, les circulations des fluides sont plus intenses à travers des formations schisteuses relativement riches en Zn et jouent donc un rôle dans la redistribution de ce métal. Il n'est nul besoin d'invoquer les rares blendes rencontrées dans les schistes noirs ou la gahnite de l'hématite de Lalamila pour constituer un stock précis de Zn primaire, celui-ci est encore inconnu.

L'évolution ultérieure du Zn est mieux connue à partir de sa répartition dans les grains de sidérite. Cette répartition de Zn dans les grains de sidérite ne s'est pas faite pas de façon homogène. Des calculs statistiques comparatifs à partir des résultats d'analyses microsituees ont montré que les bordures des grains de sidérite sont plus enrichies en Zn que les coeurs. De même, des cartes de répartition et des profils de Zn effectués sur des plages de sidérite ont confirmé cette tendance de l'enrichissement des grains sur leurs bordures.

Cet enrichissement est interprété comme une pollution des bords des grains en Zn à la suite d'une contamination par les fluides oxydants responsables de la transformation de la sidérite en chapeau de fer. Cette hypothèse est en bon accord avec le phénomène de lessivage du zinc noté par ailleurs au cours de cette transformation.

5 - Unicité des chapeaux de fer.

La diversité des faciès à l'affleurement et des associations géochimiques à l'analyse a été soulignée par Godonou (1984), Blot et Magat (1987) en notant l'aspect stratiforme que présentent les chapeaux de fer allongés suivant la direction générale des roches. Aussi ces premières recherches ont-elles été conduites d'après les minéralisations sulfurées rencontrées dans les schistes: Godonou décrit dans les forages une paragenèse pyrite-pyrrhotine-chalcopryrite-blende-galène-pentlandite représentant 5 à 10 % de la roche et pouvant témoigner d'une mise en place hydrothermale de haute température. Le passage à la ferruginisation est cependant hypothéqué par l'absence d'observation de profils. En même temps Blot et Magat, en effectuant une prospection systématique d'un secteur de 2 km² au Sud de la Cascade, soulignent l'individualisation de corps ferrugineux distincts du point de vue des associations géochimiques: Fe-Zn-Ni-Co, Fe-Zn-Ba-Ni-Co, Fe-Ba-Pb... Ultérieurement les prospections du BRGM-BNRM ont ainsi distingué quatre types de chapeaux de fer dans l'ensemble de la zone centrale du Togo: type Pagala à Zn, Pb, Cu, As, Ba; type Tchoun-Tchoun à P; Type Mazala à As, Ba, B, Cr, Cu; et enfin type Kpawa sur le socle.

Les observations faites au cours de ce travail viennent compléter les premières. En effet, en pétrographie, les chapeaux de fer étudiés présentent la même texture micro-réticulée attribuable à une pseudomorphose de sidérite. En effet, si l'on excepte les macro-réticulations, liées au quartz, les quelques figures de répliques de magnétite dans les quartzites ferrugineux et un seul cas de filon altéré non interprété, il n'y a pas dans les matériaux observés d'autres pseudomorphoses que celles qu'on peut attribuer aux carbonates. De plus, aucune association sulfurée n'a été observée dans les échantillons de roches primaires étudiées, sinon quelques rares pyrites disséminées, ni dans les faciès ferrugineux, sinon les pyrites de la sidérite qui n'ont pas d'anomalie géochimique. Par ailleurs, ces chapeaux de fer présentent dans l'ensemble des anomalies plus ou moins

identiques en plusieurs éléments, principalement en Zn et en T.R. lourdes avec des rapports T. R. légères / T. R. lourdes faibles.

Il est vrai qu'ont été mises en évidence deux paragenèses d'anomalies géochimiques différentes par comparaison des faciès et par analyses factorielles: paragenèse à Zn, Mn, T.R. lourdes dominante, paragenèse à P, Ba, Cu. Mais ces paragenèses sont étroitement associées l'une à l'autre et non pas séparées dans des chapeaux de fer différents. Aucune autre association d'anomalies que ces deux-là n'apparaît dans nos travaux.

En conclusion, compte tenu de l'identité de leur texture et de leurs anomalies, nous sommes amenés à conclure que les chapeaux de fer étudiés dans le secteur de Pagala ont tous la même origine. Les différentes associations d'anomalies observées nous paraissent par suite attribuables à des différences de situation dans un même chapeau de fer plutôt qu'à des différences fondamentales dans les protores.

B - Les phénomènes d'oxydation

1 - Genèse des textures

Tous les minéraux principaux et accessoires (sidérite, quartz, micas et pyrite) ne participent pas de la même manière à la formation des réticulations qui sont de deux types: macro et micro-réticulations.

- Les processus ayant engendré les micro-réticulations peuvent être décrits de la façon suivante: d'abord il se développe entre les grains de sidérite une mince fissure de dissolution; puis de part et d'autre de celle-ci se déposent des oxy-hydroxydes de fer formant ainsi des parois doubles; enfin l'oxydation du carbonate aboutit à des cavités délimitées par des parois en gœthite-hématite. C'est le mécanisme connu de la pseudomorphose. L'identité des formes et des tailles de ce réseau réticulé entre la Cascade et tous les autres chapeaux de fer étudiés montre que ce mécanisme a affecté tous les chapeaux de fer de la même manière et très vraisemblablement à partir des mêmes matériaux.

- Les macro-réticulations se développent à partir des grains de quartz suivant le même schéma, à la seule différence que le fer est complètement exogène.

- Les micas sont plus ou moins conservés et ne participent pas aux réticulations.

- Enfin, la pyrite dispersée donne des pseudomorphoses isolées dans la matrice micro-réticulée.

2 - Genèse des faciès

A l'exception des faciès dont l'identification de la roche-hôte est évidente (en particulier pour les faciès de schistes ferruginisés cloisonnés ou non), les autres relèvent de quatre catégories principales: faciès massifs sans structure (FMS), faciès scoriacés (FSC), faciès cendrier (FCE) et brèches ferrugineuses (BF).

Le faciès le plus caractéristique est le type cendrier qui correspond à une structure de taille variée et d'organisation centrée soit par couches concentriques, soit par cavité ovoïde. Les enveloppes successives traduisent une répartition minéralogique liée aux variations des proportions de gœthite et d'hématite, s'exprimant par des couleurs différentes. Cette structure est guidée par un réseau de diaclases hérité de la fracturation de la roche d'origine.

Là où le passage est direct de la sidérite isotrope, à la ferruginisation, le réseau est anisotrope et conduit à des blocs parallélépipédiques. La fracturation guide cette structure à toute échelle du micro-cendrier aux grandes tailles pluridécimétriques observées. Il est très probable que ces cendriers se rencontrent préférentiellement dans un système à diaclasage régulier, lequel est d'autant mieux développé que le matériau est plus isotrope.

Les mécanismes responsables du passage des fractures au cendrier à texture réticulé sont de deux natures conjuguées.

1°) - Par migration du fer vers l'extérieur par effet d'un gradient d'oxydo-réduction (Besnus, 1975). Après la fracturation, des migrations locales concentrent le fer aux parois des parallélépipèdes découpés dans la sidérite, pour donner le cendrier. Un mécanisme de migration ionique induite par un gradient de potentiel d'oxydo-réduction peut expliquer ce phénomène. Le gradient est dû à la circulation d'eau dans les diaclases créant des zones oxydantes. Le fer, à l'état ferreux sous forme de carbonate, est mis en solution dans le coeur des blocs pour se déposer à leur périphérie par oxydation sous forme de goëthite et d'hématite.

2) - Par oxydation in situ conduisant à une texture réticulée selon le mécanisme décrit plus haut. Il faut noter que ce mécanisme menant à l'accumulation d'oxydes de fer en bordure des grains peut être de même nature que celui qui aboutit à l'organisation en cendrier où les oxydes de fer tendent à migrer en bordure des blocs. Cela peut résulter dans les deux cas du même mécanisme de migration ionique induite par les eaux oxydantes circulant dans les fissures, jouant à deux échelles différentes.

La conjugaison des deux effets de façon plus ou moins prononcés aboutit à tous les types de cendriers de la simple cavité isolée jusqu'à l'aspect de "pelures d'oignon".

Il n'y a pas de guides particuliers pour l'expression des faciès massifs sans structure et des faciès scoriacés, d'autant que la goëthite peut envahir le matériau et effacer tout l'héritage structural. Ceci est particulièrement illustré dans les faciès de brèches ferrugineuses dont on ne sait plus s'il s'agit de vraies ou de fausses brèches.

CONCLUSION GENERALE

A travers les connaissances acquises tout au long de ce travail et en partant de l'hypothèse argumentée dans le chapitre X que le protore des chapeaux de fer de Pagala est une sidérite, les divers faciès ferrugineux peuvent être interprétés selon le schéma global suivant.

Dans un bassin péricratonique de type marge passive, se sont succédées des sédimentations variées de type détritique, chimique, biologique et volcanique. A la suite de la collision panafricaine, se produisent des déformations tectoniques à l'origine de plusieurs phases de plissements. C'est à l'une de ces phases, la première, qu'est associé un métamorphisme de degré schiste vert, responsable de la transformation des divers sédiments en roches épimétamorphiques connues aujourd'hui. De façon simultanée, se produisent des manifestations hydrothermales liées aux phases de plissement, et qui sont responsables de la mise en place, à la faveur des drains tectoniques, de corps hydrothermaux (sidérite), des minéraux indicateurs (sulfures dispersés, quartz filonien, muscovite barytique), des phénomènes d'altération hydrothermale des schistes et des phosphatites, etc.

Les faciès de sidérite (définis suivant le lieu de mise en place) sont caractérisés par des anomalies en plusieurs éléments traces dont la répartition serait un peu différente d'un faciès à l'autre: Zn, Mn, Co, Y, et T.R. lourdes dans la sidérite isotrope de la zone distale; P, Ba, Cu, dans la zone proximale à tendance bréchifiée. Le contact entre la sidérite et l'encaissant immédiat se fait par une surface contournée ce qui donne des faciès intermédiaires mixtes renfermant des mouches ou des plages de sidérite. Par ailleurs, dans l'encaissant schisteux se développent des filons de quartz et des filonnets transformés. Enfin, associé à la sidérite, avec des anomalies presque identiques à celle-ci en Zn, Ba, Ni, T.R., et le même rapport La/Yb très bas, les épontes schisteuses subissent parfois une altération hydrothermale argileuse massive (métaalloysite, kaolinite). Les occurrences de phosphates alumineux pourraient être des produits d'altérations hydrothermales.

Telle peut être schématisée l'histoire depuis le début de la sédimentation jusqu'à la mise en place des divers matériaux dont la fin coïncide probablement avec les dernières manifestations de l'orogénèse panafricaine. A partir de là, tous ces matériaux pourront être considérés comme primaires.

Les formes actuelles du relief permettent d'évoquer l'instauration d'une pénéplation après la mise en place des divers matériaux, et dont il subsiste encore aujourd'hui des témoins tel que le plateau de l'Adélé. Cette pénéplation est la résultante des phénomènes exogènes liés à l'altération climatique généralisée qui se traduit, d'une part, par une ferrallitisation de l'ensemble des roches, et d'autre part, par une oxydation-lessivage des corps ferrifères, ici la sidérite, aboutissant ainsi au développement des chapeaux de fer. La présence de blocs ou morceaux de chapeaux de fer dans les cuirasses latéritiques permet de

dire que l'oxydation-lessivage précède l'altération latérisante. La présence d'indices de bauxites dans la surface de l'Adélé inviterait à assimiler ces plateaux à une relique de la "surface bauxitique" classiquement décrite en Afrique de l'Ouest (King, 1948; Michel, 1970; Grandin, 1973; Boulangé et Bocquier., 1983; Kolbisek, 1990) le plus généralement considérée comme d'âge éocène.

Les reprises de l'érosion à partir du Tertiaire entraînent la dissection importante de la pénéplaine, en particulier du rebord et conduisent au modelé géomorphologique actuel avec le plateau de l'Adélé localement cuirassé représentant l'ancienne surface, le raccord brutal très disséqué et la plaine de l'Okou. C'est au niveau du raccord très disséqué correspondant à une zone de relief rajeuni, plus ou moins décapé d'une bonne partie des altérites qu'apparaissent les chapeaux de fer sous des faciès très variés.

Les divers faciès ferrugineux présentés au cours de ce travail sont les résultats de l'évolution supergène de chacune des parties de la sidérite.

- La sidérite isotrope de la zone distale donne des faciès ferrugineux en cendriers; la sidérite anisotrope conduit aux brèches ferrugineuses. La première est caractérisée par une certaine "propriété géochimique" et une anomalie particulièrement marquée en Zn, Mn et T.R. lourdes. Dans la deuxième apparaissent mieux exprimées les anomalies en P, Ba, Cu. Les différences géochimiques entre les deux zones, qui sont discrètes, sont peut-être à attribuer à une différenciation liée à des zonalités dans les drains.

- Les autres faciès, ferrugineux massifs, scoriacés, correspondent à des situations intermédiaires entre les deux précédentes.

- Les rares filonnets s'oxydent pour laisser un boxwork particulier; il en est de même des quartzites ferrugineux.

- Les roches encaissantes immédiates s'altèrent en s'imprégnant de fer contenu dans les solutions provenant de l'oxydation du corps sidéritique, pour donner les faciès de roches ferruginisées.

- Enfin, c'est probablement à l'altération météorique responsable du chapeau de fer qu'est due la gibbsite, par désilicification des argiles d'altération hydrothermale.

L'oxydation, qui se fait avec un léger tassement, s'accompagne du lessivage de nombreux éléments et en particulier des éléments en anomalies, Mn, Zn, Co, Y, Sr, P, et T.R. L'intensité du lessivage diffère d'un élément à l'autre. En particulier, il affecte plus les T.R. lourdes que les légères, tendant à faire croître le rapport La/Yb et à voiler ainsi ce caractère spécifique des chapeaux de fer qu'est un rapport La/Yb très bas.

Ce phénomène de lessivage différentiel est très important pour la compréhension de la grande variabilité des intensités des anomalies, telles qu'on peut les observer sur les faciès oxydés. Il est en effet probable que l'intensité du lessivage varie non seulement d'un élément à l'autre, mais aussi d'un lieu à l'autre, en intensité globale et aussi en intensités relatives sur les divers éléments. Cela apporte non seulement une explication directe à la grande variété des niveaux d'anomalies observées dans les matériaux oxydés, mais explique également les variations importantes du rapport T.R. légères / T.R. lourdes, la différenciation des T.R. se faisant de façon inégale d'un site à l'autre. Quoiqu'on ne puisse totalement exclure le rôle de l'oxydation de sulfures sur le chimisme local du milieu d'altération, la modulation de l'intensité du lessivage, par exemple en fonction des facteurs lithologiques et structuraux, pourrait peut-être expliquer aussi en partie la variété des paragenèses géochimiques d'anomalies qui ne traduiraient pas alors des natures différentes de chapeau de fer, mais, au contraire, à partir d'un même protore, des différenciations entre éléments plus ou moins poussées selon les conditions locales de l'oxydation.

Les ferruginisations secondaires étudiées correspondent, par la morphologie de leurs affleurements, leur minéralogie, leurs organisations structurale et texturale, leurs anomalies

géochimiques, à de vrais chapeaux de fer, développés in situ, sur un protore carbonaté qui est une sidérite micritique à rognons sparitiques, et à quartz-micas-pyrite dispersés. Son stock de métaux utiles n'autorise pas pour l'instant d'invoquer une minéralisation d'intérêt économique. Au stade actuel, pour ouvrir de nouvelles perspectives, il faudrait effectuer des forages pour vérifier l'enracinement et l'extension des carbonates ferrifères à partir du site de la Cascade.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- AFFATON P. (1975) - Etude géologique et structurale du Nord-Ouest Dahomey, du Nord-Togo et du Sud-Est de la Haute Volta. Thèse 3^e cycle: *Trav. Lab. Sci. Terre*, St-Jérôme, Marseille, ser. B, n° 10, 201 p., 96 fig., 9 tabl.
- AFFATON P. (1983) - Etude des grandes unités géologiques du Nord-Togo. *Trav. Lab. Sci. Terre*, St-Jérôme, Marseille, Fr., ser. X, n° 57, 31 p., 8 fig., 3 tabl.
- AFFATON P. (1987) - Le bassin des Volta (Afrique de l'Ouest): une marge passive, d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au panafricain 600 +/- 50 Ma. *Thèse Doct. Etat: Univ. d'Aix-Marseille*, St-Jérôme, 471 p., 210 fig., 60 tabl., 6 pl.
- AICARD P. (1953-1957) - Le précambrien du Togo et du Nord-Ouest du Dahomey. Thèse Doct. Etat; *Univ. Nancy et Bull. Dir. Fédér. Mines et Géol.*, Dakar, n° 23, 226 p., 30 pl., 6 pl.
- ANDREW R. L. (1980) - Supergene alteration and gossan textures of base metal ore in Southern Africa. in *Minerals Sci. Engng.*, Vol. 12, p. 193-215.
- ANDREW R. L. (1984) - The geochemistry of selected base metal gossans, Southern Africa. *J. Geochem. Explor.*, 22, p. 161-192.
- AREGBA P. A. (1984) - Pontentiel minier des régions de la Kara et des Savanes. 6 p., *Réunion de Sokodé*, Inéd.
- ARSANDAUX M. H. (1925a) - Les roches anciennes du Togo. *C. R. Congr. Soc. Sav.* Paris, p. 371-378.
- ARSANDAUX M. H. (1925b) - Sur la chromite du Mont Djéti. Cercle d'Atakpamé (Togo). *Bull. Soc. Franc. Min.*, T. 48, p. 70-76.
- ARSANDAUX M. H. (1926) - Sur l'origine des gneiss basiques du massif de Djabataouré (Togo). *C. R. Congr. Soc. Sav.*, Paris, p. 218-224.
- BESNUS Y. (1977) - Etude géochimique comparative de quelques gisements supergènes de fer. *Sci. Géol. Mem.*, 47, 145p.
- BESNUS Y. (1982) - Etude géochimique sur des faciès de marnes noires du Trias du Sud-Est du Massif Central (France). *Sciences de la Terre*, 15, 2, p. 219-239.
- BESNUS Y. et PION J. C. (1985) - Mission au Togo. *Compte rendu*, 5 p.
- BESSELES B. et TROMPETTE R. (1980) - Géologie de l'Afrique. La chaîne panafricaine. Zone mobile d'Afrique Centrale (partie Sud) et Zone mobile soudanaise. *Mém. Bur. géol. min.*, Paris, n° 92, 397 p., 118 fig., 29 tabl.
- BHASKARA RAO A. and JUDSON DA CUNHA E. S. (1964) - Differential Thermal Analysis of some Brarilian Phosphates. *Ana. da Acad. Brasileira de Ciências*. V. 36, n° 3, pp. 295-305.
- BLAIN C. F. and ANDREW R. L. (1977) - Sulfide weathering and the evaluation of gossans in mineral exploration. *Miner. Engng.*, Vol. 9, n° 3, p. 119-150.
- BLANCHARD R. (1944) - Chemical and mineralogical composition of twenty typical limonites. *Am. Mineral.*, Vol. 29, p. 111-114.
- BLANCHARD R. and BOSWELL P. F. (1925) - Notes on oxidation products derived from chalcopyrite. *Econ. Geol.*, Vol. 20, 7, p. 613-638.
- BLOT A. - Notes et rapports inédits dont:
(1982) - Le volcanisme post-atacorien de Sokodé, 3 p., annexes;
(1983) - Etude des chapeaux de fer de la région centrale du Togo. 5p. note ORSTOM Lomé.

- (1984) - Minéralogie du Togo: bilan de quelques déterminations nouvelles, 11 p.
- (1984) - L'extension Sud du district de Pagala. 3p.note ORSTOM Lomé (1984)
- (1984) - Au district de Pagala peut-il correspondre une province métallogénique? 8p. note ORSTOM Lomé.
- (1985) - Les chapeaux de fer du secteur de Tchatchaminadé (entre Bassar et Bafilo). 5p. *Note ORSTOM Lomé.*
- (1985) - La formation phosphatée de Pagala (TogoCentral). 5p. note ORSTOM Lomé.
- (1986) - Découverte des premiers fossiles de l'Atacorien. 4p. *Note ORSTOM Lomé.*
- (1985a) - Un nouvel indice de phosphate dans le centre du Togo: Bassar-Tchatchaminadé.5p. *Note ORSTOM Lomé., Togo.*
- (1985b) - Contribution aux recherches minières du Togo. *Note n° 29, Centre ORSTOM de Lomé, Togo.*
- (1986) - L'Atacorien du Togo: une province précambrienne à zinc, fer, phosphore... 44p.*Note ORSTOM Lomé.1ère RAIST - UNESCO.*
- BLOT A. et MAGAT Ph. (1986) - Les chapeaux de fer du Togo. *1ère RAIST - UNESCO*
- BLOT A. et MAGAT Ph. (1989) - Les chapeaux de fer polymétalliques à zinc du Togo (Afrique de l'Ouest). *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Sér. II, p. 371-376.*
- BLOT A. et MAGAT Ph. (1989) - Les chapeaux de fer du Togo, de l'affleurement à la région. *Séminaire Organisation et fonctionnement des altérites et des sols, Bondy 15p.*
- BLOT A., AFFATON P., SEDDOH K. F., AREGBA A. P., GODONOU K. S., LENOIR F., DROUET J. J., SIMPARA N. T. et MAGAT P. (1987) - Phosphates du Protérozoïque supérieur de la chaîne des Dahomeyides (Circa 600 Ma) de la région de Bassar (Nord-Togo, Afrique de l'Ouest). *Journ. Afric. Earth Sci., Vol. 7, n° 1, p. 159-166.*
- BOSWELL P. F. and BLANCHARD R. (1927) - Oxidation products derived from sphalerite and galena. *Econ. Geol., Vol. 22, p. 419-453.*
- BOSWELL P. F. and BLANCHARD R. (1929) - Cellular structure in limonite. *Econ. Geol., Vol. 24, 8, p. 791-796.*
- BOULANGE B. et BOCQUIER G. - (1983) - Le rôle du fer dans la formation des pisolites alumineux au sein des cuirasses bauxitiques latéritiques. *Sci. Géol. Mém., 72 p. 29-36.*
- BUELHÈR H. A. and GOTTSCHALK V. H. (1910) - Oxidation of sulphides. *Econ. Geol., Vol. 5, p. 28-35.*
- CAEN-VACHETTE M., PINTO K. J. M. et ROQUES M. (1979) - Plutons éburnéens et métamorphisme dans le socle cristallin de la chaîne pan-africaine au Togo et au Bénin. *Rev. Géol. dyn. et Géogr. phys., Vol. 21, fasc. 5, p. 351-357.*
- CASTING C., AREGBA A., ASSIH-EDEOUH P., CHEVREMONT Ph., GODONOU K. S. et SYLVAIN J. P. (1987) - Les unités gneissiques et la zone de cisaillement crustal du Sud-Togo. *Journ. Afric. Earth Sci., Vol. 7, n° 5/6, pp. 821-828.*
- CHERMETTE A. (1949) - L'or au Togo. *Bull. Dir. Mines AOF, Dakar, t. II, p. 33-45.*
- CHELAT (de) E. (1928) - Notes d'un voyage géologique au Dahomey et en Haute Volta. *Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn., Vol. 1, fasc. 2, p. 71-87.*
- de WALQUE L. and MARTIN H. (1983) - Geochemical dispersion of lead and zinc around a gossan in carbonate environment at Heure (Belgium). *Mineral. Deposita, 18, p. 27-38.*
- DEER W. A., HOWIE R. A. and ZUSSMAN J. (1966) - An Introduction to the Rock Forming Minerals. *Longmans and Co, London, 528 p.*
- DEMPSTER A. N. (1966) - The itabiritic iron formation of Togo. *Fonds Spécial ONU-DGM, Lomé.*
- DEMPSTER A. N. (1967) - La dolomie au Togo. *Fonds Spécial ONU-DGM, Lomé.*
- DEMPSTER A. N. (1967) - Graphite in Togo. *Fonds Spécial ONU-DGM, Lomé.*
- DEMPSTER A. N. (1967) - Le talc au Togo. 9 p., 8 pl *Fonds Spécial ONU-DGM, Lomé.*

- DEMPSTER A. N. (1967) - La recherche des schistes aurifères au Togo. *Fonds Spécial ONU-DGM*, Lomé.
- DROUET J. J. (1986) - Le cycle sédimentaire et les milieux de dépôts du Précambrien supérieur infratillitique, dans le bassin des Volta au nord-Togo. *Journ. Afric. Earth Sci.*, Vol. 5, n° 5, pp. 455-464.
- DROUET J. J. (1989) - Une marge passive au flanc oriental du craton éburnéen durant le Précambrien terminal. Répartition des sédiments post-glaciaires à stromatolites et phosphates au Nord-Togo (Afrique de l'Ouest). *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 309, sér. II, p. 1055-1060.
- DROUET J. J., AFFATON P., SEDDOH K. F., GODONOU K. S. et LAWSON L. T. (1984) - Synthèse lithostratigraphique du Précambrien supérieur infratillitique du bassin des Volta au nord-Togo. In *Géologie Africaine-African Geology*. J. et Michot J. Edit., Tervuren, Belgique, p. 217-225, 5 fig., 3 tabl.
- FENELON J. P. (1981) - Qu'est ce que l'analyse des données? Lefonen, Paris, 311 p.
- FOUCAULT A. et RAOULT J.-F. (1988) - Dictionnaire de géologie *Masson*, 1988, 352 p.
- GAIR J. E. and SLACK J. F. (1982) - Deformation, geochemistry, and origin of massive sulfide deposits, gossan lead district, Virginia. *Econ. Geol.*, 79, p. 1483-1520.
- GARRELS R. M. (1954) - Mineral species as function of pH and oxidation-reduction potentials, with special reference to the zone of oxidation and secondary enrichment of sulfide ore deposits. *Geochem. Cosmoch. Acta.*, 5, p. 153-168.
- GODONOU K. S. (1980) - Le point sur les recherches géologiques et minières dans l'extrême Nord Togo. Rapport de fin de mission. *Rapp. Bur. Nat. Rech. Min.*, Lomé, Togo, inéd.
- GODONOU K. S. (1983) - Quelques données sur la géologie du Togo. *Rapp. Bur. Nat. Rech. Min.*, Lomé, Togo, 35 p., 17 fig., inéd.
- GODONOU K. S., AREGBA A. et ASSIH-EDEOUH P. (1986) - Notice explicative de la carte géologique au 200 000è, Feuille Sokodé, Ire édition. Dir. Génér. Min. Géol. / Bur. Nat. Rech. Min., Lomé, Togo, Edit. *Bur. Rech. Géol. Min.*, Orléans, Fr.
- GODONOU K. S., PEDANOU A.B., AMENYAH K. S. et AHIAGBAH K. G. (1984) - Note sur l'état d'avancement des travaux (chapeaux de fer). *Rapport de mission. Bur. Nat. Rech. Min.*, Lomé, Togo, 17 p., inéd.
- GODONOU K. S. (1984) - Etudes en lames minces, sections polies et analyses à la microsonde des carottes de sondage et de matériel ferrugineux de quelques chapeaux de fer de la région de Pagala. *Rap. de stage. Ecole des Mines de Paris-BNRM*, Lomé.
- GODONOU K. S. (1986) - Rapport de stage au BRGM. Novembre-décembre 1985. *BNRM* Lomé.
- GOTTSCHALK V. H. and BUELHER H. A. (1912) - Oxidation of sulphides. *Econ. Geol.*, Vol. 6, p. 14-34.
- GRANDIN G. (1973) - Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. *Th. Doct. Sc. Strasbourg* et Mém. ORSTOM, 82, 275p.
- GRAPPE J. (1974) - Les gîtes sulfurés de remaniement supergène (oxydation-cémentation). *C. G. M. EMP. CG. EMSE*.
- GRODDECK A. V. (1879) - Traités des gîtes métallifères. Paris, Dunod, 479 p.
- GSELL A., SABOT J., CHARRIER J. et BIAIS R. (1958) - Observations sur la chromite du Mont Ahito. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, 3, pp. 207-213.
- GUIDOTTI Ch. V. (1984) - Micas in Metamorphic Rocks. in *Mineralogical Soc. of America. Reviews in Mineralogy*. Vol. 13. S. W. Bailey Ed. 1984, pp. 357-456.
- HABASHI F. (1966) - The mechanics of oxidation of sulfide ores in nature. *Econ. Geol.*, Vol. 61, p. 587-591.
- ILAVSKY J. (1972) - Un paléoplacer métamorphisé d'hématite-rutile uranifère et thorifère dans l'Atacorien (Précambrien supérieur) du Togo, Afrique de l'Ouest. *Mineralium Deposita*, Berlin, 7, p. 73-88, 11 fig.

- LASSERE J. L et GENDRY M. (1979) - Mission Togo 1979. Principaux résultats. Géologie et prospection. *Rap. BRGM 79 RDM 001 AF.*
- LASSERE J. L (1979) - Mission Togo 1979. Principaux résultats. Géologie et prospection. *Rap. BRGM.*
- LASSERE J. L et MATHEUS Ph. (1979) - Mission Togo 1979. Principaux résultats. Géologie et prospection. *Rap. BRGM 79 RDM 059 AF.*
- LASSERE J. L, AREGBA A. et MATHEUS Ph. (1980) - Prospection minière commune au Bénin et au Togo entre les 9e et 10e degrés de latitude Nord. Secteur Togo. Géologie et prospection. Etudes détaillées. *Rap. BNRM/BRGM 80 RDM 027 AF.*
- KING L. C. (1948) - On the ages of african landsurfaces. *Quat. J. Geol. Soc. London 104 p. 439-459.*
- KOLBISEK B. (1990) - Géochimie et Pétrologie des bauxites latéritiques d'Amazonie brésilienne. Comparaison avec l'Afrique, l'Inde et l'Australie. *Th. Univ. Louis Pasteur Strasbourg.* 210p.
- KOSAKEVITCH A. (1979) - "Chapeau de fer": problèmes de définition et de nomenclature pratique. *Bull. BRGM, (2), II, 2/3, p. 141-149.*
- KOSAKEVITCH A., LELEU M. et LETANALET J. (1980) - Etude des chapeaux de fer. Rapport de synthèse. *Rapp. BRGM, inéd.*
- KOSAKEVITCH A. (1983) - Etude morphogénétique des textures de remplacement et de remplissage dans les chapeaux de fer. Rapport de fin de contrat DGRST. *Rapp. BRGM, inéd.*
- KOURIATCHY N. (1931) - Les gisements de chromite et de serpentinite au Togo. *C. R. Ac. Sci., Paris, 192, 25, p. 1669-1672.*
- KOURIATCHY N. (1932) - Sur quelques roches cristallophylliennes du Togo. *C. R. Congr. Soc. Sav., Paris, p. 172-177.*
- KPALIME S. (1979) - Les dolomies de Pagala. Rapport de mission. *Bur. Nat. Rech. Min., Lomé, Togo, 20 p., inéd.*
- KPALMA A. S. et SEDDOH K. F. (1983) - Les minéralisations de type itabirite dans l'Atacorien du Togo. *Journ. Afric. Earth Sci., Vol. 1, n° 3/4, p. 199-212.*
- LARQUE Ph. (1972) - Compilations d'analyses chimiques. VI la muscovite. *Rap. tech. C.S.G.S. Stasbourg, Multigraphié, 78 p.*
- LARQUE Ph. et WEBER F. (1978) - Technique de préparation de minéraux argileux en vue de l'analyse par diffraction des rayons X. *Notes techniques de l'Institut de Géologie, Strasbourg, 33 p.*
- LASSERE J. L., AREGBA. A. et MATHEUS P. (1980) - Prospection minière commune au Bénin et au Togo entre les 9è et 10è degrés de latitude nord. Secteur Togo: Géologie et prospection. Etudes détaillées. *Rapp. Bur. Rech. Géol. Min..., n° 80, RDM 027 AF., 31 p., 3 fig., 20 pl., 4 ann., inéd.*
- LAWSON D. T. (1972) - Géologie et perspectives économiques de la formation ferrifère de la cuvette du Buem au Togo (Cir. administrative de Bassari). *Rapp. Bur. Nat. Rech. Min., Lomé, Togo, 110 p., inéd.*
- LE COCQ A. (1975) - Quelques nouvelles données de terrain à propos du Buem du Togo et des formations avoisinantes (schistes de l'Oti et micaschistes de Boukombé). *Note tech. S.S.C. de l'ORSTOM, Bondy, Fr., 9 p., 1 pl., 1 ann., 1 tabl., inéd.*
- LEBART L., MORINEAU A. et FENELON J. P. (1982) - Traitement des données statistiques, méthodes et programmes. *Dunod, 2^e éd., Paris, 510 p.*
- LEBEAUX M. O. (1984) - Manuel de référence ADDAD. Centre de Calcul de Strasbourg, éd., 167 p.
- LIAO S., LIANG T. and ZEN M. (1983) - Geochemical characteristics of gossans related to siderite deposits in carbonate strata, Western-Guizhou. in *Geochemistry, 2, 4, p. 279-293.*
- LOUGHLIN, G. F. (1914) - The oxidized zinc ores of the tinctic district, Utah. *Econ. Geol., Vol. 14, 1, p. 19.*
- MACKENZIE R. C. (1970) - Differential Thermal Analysis. *Academic Press London - New York; 1970; 2 volumes.*
- MAGAT Ph. et BLOT A. (1984) - Les chapeaux de fer de la région de Pagala. Togo activités 83-84. 19p. *Note ORSTOM Lomé.*

- MAGAT Ph. et BLOT A. (1984) - Les chapeaux de fer du Togo. Etudes géologiques et géochimiques. Secteur Opoblé-Pagala. 26p. *Note ORSTOM* Lomé.
- PION J. C. et BLOT A. (1984) - Quelques observations sur la minéralogie qualitative des chapeaux de fer du Centre Togo. 7p. *Note ORSTOM* Lomé.
- MATHEUS PH. (1982) - Comportement des éléments métalliques lors de l'altération supergène d'une minéralisation sulfurée (étude bibliographique). *Rapp. EMP.* 10 p.
- MENOT R. P. et SEDDOH K. F. (1977) - Données nouvelles sur la pétrographie de l'Atacorien au Togo (Région des Plateaux, Atakpamé). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XIX, 2, p. 331-334.
- MENOT R. P. (1980) - Les massifs basiques et ultrabasiques de la zone mobile panafricaine au Ghana, Togo et Bénin. Etat de la question. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XXII, 3, p. 297-303
- MENOT R. P. et SEDDOH K. F. (1981) - Le massif basique stratifié précambrien de Djabatouré-Soutouboua (région centrale du Togo, Afrique de l'Ouest). Pétrographie et évolution métamorphique. *Bull. Bur. Rech. Géol. Min.*, section IV, Orléans, Fr.
- MENOT R. P. (1982) - Les éclogites des Monts Lato: un témoin de l'évolution tectonométamorphique de la chaîne panafricaine du Sud-Togo (Afrique de l'Ouest). *Ist Intern. Eclogite Conf.*, *Terra Cognita*, 2, (3), p. 320.
- MENOT R. P. et SEDDOH K. F. (1985) - The Eclogites of the Lato Hills, South Togo, West Africa. : Relics from the early tectonometamorphic evolution of the Pan-African orogeny. *Chem. Geol.*, 50, p. 313-330.
- MICHEL P. (1970) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Th. Doct. Sc. Strasbourg, et Mém. ORSTOM, Paris, 1973, 3 vol.: 752p.
- MILLOT G. (1964) - La géologie des argiles. *Masson et Cie éd.*, Paris, 499 p.
- NAGASAWA K. and MIYAZAKI S. (1975) - Mineralogical properties of halloysite as related to its genesis. *Proceedings of the International Clay Conference.* 1975; pp 257-265.
- NICKEL E. H. and DANIELS J. L. (1985) - Gossans. in *Handbook of Strata bound and stratiform ores deposits.* Part IV, 13, p. 261-340.
- PANIRIZADEH-ECHRAGHI J., SAGON J. P., et MISERY A. (1982) - Minéralogie et géochimie des chapeaux de fer situés sur le paléozoïque de Bretagne Centrale. Comparaison avec les formations ferrugineuses du tertiaire. *107è Congr. Nat. Soc. Sav., Brest, Sciences*, fasc. III, p. 107-118.
- PASCAL M. et AREGBA A (1989) - Les phosphatites précambriennes de la région de Bassar (Togo). Etat des connaissances géologiques, caractérisation du minerai et perspectives de valorisation. *Chron. rech. min.* n° 494, pp. 43-58.
- PERE N. B. et COLIN F. (1972) - Le gîte de chromite de Farendé (Circ. de Lama-Kara, Togo). *Univ. Bénin, Ann. Ecole Sci.*, Lomé, Togo, t. I, p. 1-23.
- POUGNET R. (1955-1957) - Le Précambrien du Dahomey. Thèse *Univ. Clermont-Ferrand et Bull. Dir. Fédér. Min. Afric. Oc. Fr.*, Dakar, 22, 186 p., 26 pl., 14 tabl., 6 cartes au 500 000è.
- RAHAMAN O., AFFATON P., LAWSON L. T., AJIBADE B., GODONOU K. S. and SIMPARA N. (1984) - Summary of discussion at the completion of field-work in Togo (2-14-12-83). *Trav. Lab. Sci. Terre, St-Jérôme*, sér. X, n° 63, Marseille, 13 p.
- ROBERT M. (1977) - Quelques exemples d'utilisation de l'Analyse Thermique en Minéralogie. *Conf. 1977*, 14 p.
- ROBERTSON T. (1921) - Report on the Geology of Western Togoland (West Africa). *Crown Agents for the colonies. Edit.*, London, 51 p., 2 cartes, 4 pl.
- ROUTHIER P. (1963) - Les gisements métallifères. Tome 1, *Masson et Cie, éd.*, Paris, p. 1282 p.
- RUHLAND M. (1987) - Recherche sur le contrôle tectonique des chapeaux de fer de Pagala et autres secteurs anormaux du Nord-Togo. *Rap. préliminaire*, 14 p.:

- RYALL W. R. and TAYLOR G. F. (1981) - Gossan evaluation manual for use in the Kingdom of Saudi Arabia. *Ministry of Petroleum and Mineral Resources, Jiddah, Saudi Arabia, Tech. Rec. RF-TR-O1-3*, 146 p.
- SANZOLONE R. F. and DOMENICO J. A. (1985) - Trace Elements Content of Gossan at four mines in the West Shata massive sulfide district. *Econ. Geol.*, 80, p. 2206-2212.
- SATO M. (1960) - Oxidation of sulfide ore bodies. I. Geochemical environments in terms of Eh and pH. *Econ. Geol.*, Vol. 55, p. 1202-1231.
- SIMPARA N. (1978) - Etude géologique et structurale des unités externes de la chaîne panafricaine (600 Ma) des Dahomeyides dans la région de Bassar (Togo). *Trav. Lab. Sci. Terre, St-Jérôme, Marseille, (B) n° 13*, 167 p., 5 fig., 9 tabl., 1 pl. photo., 3 pl.
- SIMPARA N., SOUGY J., et TROMPETTE R. (1985) - Lithostratigraphie et structure du Buem, unité externe de la chaîne panafricaine des dahomeyides dans la région de Bassar (Togo). *Journ. Afric. Earth Sci.*, Vol. 3/4, p. 479-486, 5 fig.
- SMIRNOV S. S. (1955) - Zone d'oxydation des gisements sulfurés. BRGM. trad. n° 3004 (355p).
- SORNEIN J. F. (1980) - Altération supergène de minéralisations ferrifères: les chapeaux de fer du gisement de sidérite de Batère (Pyrennées Orientales) et du gisement de pyrite de St-Bel (Rhône). *Thèse Doct. Ing. E.N.S.M.P.*, 150 p.
- SYLVAIN J. P., AREGBA A., ASSIH-EDEOUEH P., CASTAING C., CHEVREMONT Ph., COLLART J. et OUASSANE I. (1986) - Notice explicative de la carte géologique au 200 000è, Feuille Atakpamé, 1re édition, DGMG / BNRM. Lomé, Togo. *Edit. Bur. Rech. Géol. Min. Orléans, Fr.*
- SYLVAIN J. P., AREGBA A., COLLART J. et GODONOU K. S. (1986) - Notice explicative de la carte géologique du Togo à 1 / 500 000, 1re édition, N° 6, DGMG / BNRM. Lomé, Togo.
- TAKAHASHI T. (1960) - Supergene alteration of oxidation zinc and lead deposits in limestone. *Econ. Geol.*, Vol. 55, p. 1083-1115.
- TAYLOR G. F. (1973) - The geochemistry of siderite in relation into ironstone in the Paradise Creek Formation, North-West Queensland. *J. Geochem. Explor.*, Vol. 2, n° 4, p. 367-383.
- TAYLOR G. F. and SCOTT K. M. (1982) - Evaluation of gossans in relation to lead-zinc mineralisation in the Mount Isa inlier. Queensland. *B.M.R.J. Australia. Geol. Geophys.*, 7, p. 159-180.
- TAYLOR G. F. and SYLVESTER G. G. (1982) - Analysis of a weathered profile at Mugga-Mugga, Western-Australia. *J. Geoch. Explor.*, 16, p. 105-134.
- TAYLOR G. F. and APPLEYARD E. G. (1983) - Weathering of the zinc-lead lode, Dugald River, North west Queensland. I. The gossan profile. *J. Geochem. Explor.*, 18, p. 87-110.
- TAYLOR G. F. and SCOTT K. M. (1983) - Weathering of the zinc-lead lode, Dugald River, North west Queensland. II. Surface mineralogy and geochemistry. *J. Geochem. Explor.*, 18, p. 111-130.
- THORNBUR M. R. (1975a) - Supergene Alteration of Sulfide. I. A chemical model based on massive nickel sulfide deposits at kambalda, West-Australia. *Chem. Geol.*, Vol. 15, p. 1-14.
- THORNBUR M. R. (1975b) - Supergene Alteration of Sulfide. A chemical study of the Kambalda nickel deposits. *Chem. Geol.*, Vol. 15, p. 117-144.
- THORNBUR M. R. (1985) - Supergene Alteration of Sulfide. VII. Distribution of element during the gossan forming process. *Chem. Geol.*, 53, p. 279-301.
- THORNBUR M. R., ALLCHURCH P. D. and NICKEL E. H. (1981) - Variation in gossan geochemistry at the Perseverance nickel sulfide deposits, Western-Australia. A descriptive and experimental study. *Econ. Geol.*, 76, p. 1764-1774.
- THYRY M. et SORNEIN J. F. (1983) - Pétrologie d'une séquence d'altération de carbonate de fer. Le chapeau de fer du gisement de sidérite de Batère (Pyrennées Orientales). *Sci. Géol. Mém.*, 73, p. 195-205, Strasbourg.

- TOGBE K. A. (1987) - Contribution à l'étude des chapeaux de fer du Togo. Pétrographie, Minéralogie, Géochimie. *DEA* Strasbourg. 29p.
- TOGBE 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 9p.
- TOGBE K. A., BESNUS Y., PION J. C. (1990) - Géochimie multiélémentaire des chapeaux de fer du Togo. Phases géochimiques et Terres Rares. *Séminaire Organisation et fonctionnement des altérites et des sols*, Bondy 14p.
- TRISCHKA C., ROVE O. N., MOREAU D., and BARRINGER J. R. (1929) - Boxwork siderite. *Econ Geol.*, Vol. 24, p. 677-686.
- TROMPETTE R. (1979) - Les Dahomeyides au Bénin, Togo et Ghana: une chaîne de collision d'âge pan-africain. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, Vol. 21, fasc. 5, p. 339-349.
- WILHELM E. et KOSAKEVITCH A. (1979) - Utilisation des chapeaux de fer comme guides de prospection. *Bull. BRGM*, (2), II, 2/3, p. 109-140.
- WRIGHT J. B., HASTINGS D. A., JONES W. B. and WILLIAMS H. R. (1985) - Geology and Minerals Resources of West Africa. *Edit. Wright*, 187 p.

LISTE DES FIGURES

	Pages
1 - Schéma idéal des zones de circulation de l'eau en terrain homogène.....	5
2 - Pseudomorphoses laissées par quelques sulfures communs.....	16
3 - Principales unités structurales et géomorphologiques des Dahomeyides et zone d'étude.....	20
4 - Carte géologique au 200.000° du secteur de Pagala.....	27
5 - Carte du Togo et zones d'études.....	32
6 - Bloc diagramme montrant les principales unités géomorphologiques du secteur de Pagala.....	33
7 - Courbes pluviométriques deux stations du secteur de Pagala.....	33
8 - Coupe schématique de la frontière du Ghana à Pagala-Gare.....	35
9 - Stéréogrammes des données structurales mesurées le long de la coupe.....	40
10 - Zone cartographiée d'Opoblé.....	44
11 - Position des affleurements de chapeaux de fer d'après le relevé du layon 6	45
12 - Localisation des sites de chapeaux de fer étudiés au cours de ce travail et zone d'étude	47
13 - Diffractogrammes RX obtenus sur trois échantillons de chapeaux de fer riches en goëthite et en hématite.....	52
14 - Diagrammes triangulaire Al-Mg-Fe obtenu à partir des résultats d'analyses de microsonde sur les muscovites et les chlorites des roches primaires de Pagala	67
15 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les différentes roches primaires.....	72
16 - Coupe schématique W-E de la colline d'Opoblé.....	84
17 - Diffractogrammes RX obtenus sur deux échantillons à kaolinite pure et à gibbsite ...	87
18 - Courbes d'analyses thermodifférentielles et thermopondérales sur quatre échantillons du faciès argileux massif et un de gorcéixite.....	90
19 - Spectres IR obtenus sur cinq échantillons du faciès argileux massif.....	93
20 - Schéma montrant le développement d'un cendrier dans un schiste ferruginisé.....	100
21 - Schéma montrant des filonnets oxydés dans un schiste ferruginisé.....	101
22 - Boxwork dérivé de magnétite.....	102
23 - Quartz résiduels corrodés dans la matrice ferrugineuse.....	107
24 - Schéma montrant deux types de réticulations.....	108
25 - Diffractogrammes RX d'un échantillon de chapeau de fer montrant des pics étroits traduisant le degré de cristallinité de la goëthite et de l'hématite.....	111
26 - Courbes d'analyses thermiques sur quelques échantillons de chapeaux de fer de Pagala.....	114
27 - Distribution des teneurs de goëthite et d'hématite dans les matériaux de chapeau de fer.....	115
28 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les différents faciès ferrugineux.....	120
29 - Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les différents faciès ferrugineux.....	131
30 - Schéma de la situation de la Cascade.....	138
31 - Schéma de l'affleurement et localisation des échantillons sériés.....	138
32 - Schéma montrant le début d'oxydation de la sidérite à partir d'une fissure.....	142

33 -	Cascade d'Opoblé : Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans la sidérite et dans le faciès oxydé massif.....	145
34 -	Diagramme montrant les relations entre la sidérite, la goëthite et Fe ⁺⁺	150
35 -	Cascade d'Opoblé : Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques coeur entre le et le bord des grains de sidérite.....	154
36 -	Cascade d'Opoblé : Profils des teneurs de Fe, Zn, Mn et Mg à travers trois plages de sidérite.....	158
37 -	Diagrammes de distribution des teneurs des éléments chimiques dans les matériaux de chapeaux de fer et d'encaissants.....	163
38 -	Diagrammes de distribution des teneurs des rapports La/Yb dans les matériaux de chapeaux de fer et d'encaissants.....	167
39 -	Diagrammes de corrélation inter-éléments dans les échantillons de chapeaux de fer...	169
40 -	Distribution des teneurs en Fe ₂ O ₃ dans l'ensemble des échantillons de chapeaux de fer et d'encaissants	172
41 -	Représentation des éléments chimiques dans l'espace des trois premiers facteurs d'une ACP.(410 éch.).....	173
42 -	Représentation des éléments chimiques dans l'espace des trois premiers facteurs d'une ACP.(chapeau de fer).....	174
43 -	Diagrammes de comparaison des faciès en termes de phases géochimiques.....	178

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
I - Etude comparée des résultats de deux ensembles d'analyses multi-élémentaires du chapeau de fer de Jabal Sayid (Arabie Saoudite).....	7
II - Constitution minéralogique de quelques chapeaux de fer développés sur sulfures	14
III - Composition géochimique de quelques types de chapeaux de fer sur sulfures	15
IV - Quelques traits caractéristiques des chapeaux de fer dérivés de la sidérite...	17
V - Description lithologique de la coupe de la frontière du Ghana à Pagala-Gare.....	36
VI - Description des différents affleurements de chapeaux de fer du Togo.....	43
VII - Inventaire des des travaux de subsurface et de sondage	46
VIII - Répartition des échantillons entre les différents types de matériaux et nombre d'analyses effectuées.....	48
IX - Répartition des 318 échantillons entre les différents faciès ferrugineux.	48
X - Localisation des échantillonnages pour les études pétrographiques et chimiques	48
XI - Résultats d'estimation quantitative par ATP et comparaison avec ceux obtenus par RX sur 17 échantillons.....	54
XII - Eléments majeurs et mineurs dosés avec des gammes de teneurs et méthodes correspondantes.....	56
XIII - Eléments tracés dosés par spectrométrie d'émission à plasma.....	56
XIV - Constitution minéralogique des roches primaires régionales établie à la diffraction des rayons X.....	63
XV - Composition chimique de quelques minéraux de roches primaires (résultats d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique).....	64
XVI - Composition moyenne et anomalies métalliques des principaux groupes de minéraux des roches silicatées	69
XVII - Composition chimique des diverse roches silicatées	65
XVIII - Constitution minéralogique des échantillons de dolomies cristallines, de calc-schistes et de l'hématite massive aux rayons X.....	77
XIX - Composition chimique des principaux minéraux des roches à dominante non silicatée (résultats d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique).....	79
XX - Composition chimique des roches particulières données statistiques univariées)..	80
XXI - Descriptions des échantillons d'altérations argileuses blanches et différentes analyses réalisées sur chacun d'eux.	85
XXII - Déterminations minéralogiques par diffraction des rayons X..	86
XXIII - Diffraction RX, raies mesurées dans les échantillons à mélange d'argiles et de gorcéixite.....	88
XXIV - Interprétation des mesures d'analyses thermodifférentielles et thermo-pondérales	89
XXV - Mesures des bandes de vibration dans les échantillons des faciès argileux blancs (spectroscopie IR).....	92
XXVI - Composition chimique des échantillons des faciès argileux blancs.....	95
XXVII - Constitution minéralogique des faciès de chapeaux de fer établie par diffraction des rayons X.....	112
XXVIII - Mesures obtenues par l'analyse thermique sur goethite-hématite des chapeaux de fer.....	113

XXIX - Estimation semi-quantitative des teneurs en goethite et en hématite dans les matériaux de chapeaux de fer par couplage de la diffraction des rayons X à l'analyse thermique.....	116
XXX - Composition chimique moyenne des faciès ferrugineux (données statistiques univariées).....	118
XXXI - Médianes par les schistes régionaux et les faciès ferrugineux oxydés.....	123
XXXII- Comptage des anomalies par faciès définies comme 10 fois supérieures à la médiane dans les schistes régionaux.....	124
XXXIII- Composition chimique des oxy-hydroxydes de fer (goethites-hématites et de quelques minéraux accessoires des chapeaux de fer (résultats d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique).....	126
XXXIV- Composition statistique et test de différences des moyennes des goethites et hématites.....	130
XXXV - Coefficients de corrélation à partir des résultats d'analyses ponctuelles sur les goethites et hématites.....	132
XXXVI - Constitutions minéralogiques des sidérites et de faciès massifs oxydés de la Cascade par diffraction des rayons X.....	141
XXXVII - Compositions chimiques de la sidérite massive et des faciès oxydés de la Cascade (données statistiques univariées).....	144
XXXVIII - Evolution des teneurs lors de l'oxydation de la sidérite	148
XXXIX - Composition chimique de quelques minéraux de la sidérite et le faciès oxydé massif de la Cascade (résultats d'analyses à la microsonde électronique).....	152
XL - Composition statistique et test de différences des moyennes entre le bord et le coeur des grains de sidérite.....	155
XLI -Composition comparée des chapeaux de fer et les encaissants (données statistiques univariées).....	162
XLII - Fréquence des anomalies en T.R. en pourcentages du nombre d'échantillons en référence aux abondances moyennes dans la croûte supérieure.....	166
XLIII - Coefficients de corrélation inter-éléments calculés pour les échantillons des chapeaux de fer.....	168
XLIV - Quelques corrélations inter-éléments.....	171
XLV - ACP. Pourcentages de variances expliqués par les trois premiers facteurs dans les ACP pratiquées sur quatre lots d'échantillons.....	172

TABLE DES MATIERES

Introduction

I - Naissance du concept de chapeau de fer dans la région de Pagala.....	1
II - Les travaux et résultats acquis.....	1
III - Présentation du mémoire.....	2

Première partie - CONTEXTE ET METHODES

Chapitre I - LES CHAPEAUX DE FER - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I - EVOLUTION DES CONNAISSANCES SUR LES CHAPEAUX DE FER.....	3
A - Les précurseurs.....	4
B - La période d'approche minéralogique et chimique.....	4
C - La période d'approche géochimique multiélémentaire.....	6
II - Les chapeaux de fer. Définition. Genèse.....	8
A - Définition.....	8
B - Genèse des chapeaux de fer.....	9
III - Principales caractéristiques des chapeaux de fer.....	11
A - La composition minéralogique des chapeaux de fer.....	11
B - La géochime des chapeaux de fer.....	13
C - Les figures de répliques.....	13
D - Description de deux types de chapeaux de fer.....	13
IV - Conclusion.....	18

Chapitre II - LE CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

I- Le bassin des Volta.....	19
A - Les supergroupes du bassin des Volta.....	19
B - Les ressources minérales dans le bassin des Volta.....	21
II - Les Dahomeyides.....	21
A - L'unité structurale du Buem.....	21
B - L'unité structurale de l'Atacora.....	22
D - L'unité structurale de la Plaine du Bénin.....	23
III - Les ressources minérales au sein des unités des Dahomeyides.....	24
A - Les ressources minérales dans le Buem.....	24
B - Les ressources minérales de l'Atacora.....	24
C - Les ressources minérales dans l'unité de la plaine du Bénin.....	25
IV - Cadre géologique du secteur à chapeaux de fer de Pagala.....	25
A - La série de Kandé.....	26
B - La série de Pagala.....	26
C - La série de l'Okou.....	26
D - Les extensions de l'Atacora au Sud de Pagala.....	26

Chapitre III - LE SECTEUR DE PAGALA. LITHOLOGIE - STRUCTURE ET ECHANTILLONNAGE.

I - Cadre géographique.....	31
-----------------------------	----

A - Situation géographique.....	31
B - Géomorphologie.....	31
C - Hydrographie.....	32
D - Climat.....	32
E - Géographie humaine.....	34
F - Voies de communication.....	34
II - Cadre géologique du secteur de Pagala.....	34
A - Situation géographique.....	34
B - Données structurales.....	39
III - Observations de terrain et présentation de l'échantillonnage.....	41
A - Description des divers sites (observations de terrain) (tableau VII).....	41
B - Echantillonnage.....	46

Chapitre IV - METHODES ANALYTIQUES

I - Les méthodes d'analyses pétrographiques, minéralogiques et morphologiques.....	51
A - La loupe binoculaire.....	51
B - Le microscope métallographique.....	51
C - La diffraction des rayons X.....	53
D - L'analyse thermique (ATD et ATP).....	53
E - L'analyse infra-rouge (IR).....	54
F - Le microscope électronique à balayage (MEB ou SEM).....	55
II - Les méthodes d'approches géochimiques.....	55
A - La macro-analyse.....	55
B - La microanalyse élémentaire.....	56
III - Les traitements statistiques.....	57

Seconde partie - LES OBJETS

Chapitre V - LES ROCHES PRIMAIRES

I - Les roches primaires d'extension régionale.....	59
A - Description pétrographique et minéralogique.....	59
B - Composition chimique des roches silicatées.....	70
II - Les roches à dominante non silicatée.....	76
A - Description pétrographique et minéralogique.....	76
B - Résultats de l'analyse chimique globale.....	79
III - Conclusion.....	80

Chapitre VI - LES ALTERATIONS ARGILEUSES BLANCHES

I - Géométrie des altérations blanches.....	83
II - Les échantillons les altérations argileuses blanches.....	83
A - Description macroscopique.....	83
B - Description minéralogique.....	85
III - Composition chimique.....	94
A - Les faciès SIAL ou le cortège argileux.....	94
B - L'échantillon gibbsitique.....	96
IV - Conclusion.....	96

Chapitre VII - LES FACIES FERRUGINISES

I - Description pétrographique.....	99
-------------------------------------	----

A - Les faciès de roches ferruginisées.....	99
B - Les faciès typiques des chapeaux de fer.....	104
C - Discussion.....	110
II - Caractérisation minéralogique des faciès ferrugineux par diffraction des rayons X et par les analyses thermiques.....	111
A - Par diffraction des rayons X.....	111
B - Par analyses thermiques.....	112
C - Dosage semi-quantitatif des goethites et hématites.....	115
III - Géochimie des faciès oxy-hydroxydés.....	117
A - Composition chimique des différents faciès ferruginisés.....	117
B - Analyses ponctuelles.....	125
IV - Conclusions tirées de l'étude des faciès oxy-hydroxydés.....	133
A - Du point de vue pétrographique et minéralogique.....	133
B - Du point de vue de la géochimie globale et microsituée.....	134

Chapitre VIII - LA CASCADE D'OPOBLE

I - Description du site	137
II - Description des faciès	137
A - Le faciès carbonaté	137
B - Les faciès oxy-hydroxydés massifs.....	141
C - Les faciès de transition entre sidérite et faciès oxy-hydroxydés	142
D - Principaux enseignements pétrographiques.....	143
III - Caractérisations géochimiques des matériaux de la Cascade.....	143
A - Analyses chimiques roche totale	144
B - Analyses microsituées.....	151
IV - Interprétation et conclusion.....	157

***Troisième partie* - TRAITEMENT DES DONNEES, DISCUSSION ET INTERPRETATION**

Chapitre IX - ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES CHIMIQUES

I - Comparaison statistique de l'ensemble des chapeaux de fer et de l'ensemble des encaissants.....	161
A - Comparaison des niveaux moyens de teneurs.....	161
B - Comparaison des distributions des teneurs (Fig. 24).....	162
C - Les anomalies.....	165
II - Caractères particuliers des Terres Rares	166
III - Etude des corrélations.....	167
IV- Les phases géochimiques.....	171
A - Notion de phases géochimiques.....	171
B - Résultats des traitements	172
C - Comparaisons et synthèse des ACP en termes de phases géochimiques.....	176
D - Hypothèse sur la signification des phases géochimiques	176
V - Présentation et comparaison des faciès en termes de phases géochimiques	177

Chapitre X - DISCUSSION ET INTERPRETATIONS

I - Rappel des résultats acquis.....	181
A - Les roches de l'encaissant.....	181

B - Les faciès d'altérations argileuses blanches associés aux chapeaux de fer.....	182
C - Les faciès ferrugineux.....	182
D - La sidérite et son faciès d'altération.....	185
E - Etude géochimique globale. L'apport des phases géochimiques.....	186
II - Les hypothèses générales proposées.....	186
A - Le protore carbonaté.....	187
B - Les phénomènes d'oxydation	189

CONCLUSIONS GENERALES

III - Conclusion générale.....	185
Bibliographie	195
Liste des figures.....	203
Liste des tableaux	205
Table des matières.....	207
Planches photographiques	I à IX
Annexes.....	A1 à A24

Planches photographiques

PLANCHE I

ROCHES PRIMAIRES

- Photo 1 : Chloritoschiste. Plage micacée avec micas montrant deux directions correspondant aux schistosité S_1 et S_2 .
(éch. 9 ; LTP).
- Photo 2 : Micaschiste. Plage montrant des grains de sidérite (Sid) dans un niveau quartzeux et quelques opaques automorphes (Pyrite : Pyr, Ilménite : Ilm)
(éch.16 ; LTP)

FACIES TYPIQUES DES CHAPEAUX DE FER

- Photo 3: Photo macroscopique d'un cendrier vide. Le haut de la cavité présente de la goéthite fibroradiée. Le bas de la cavité est scoriacé.
- Photo 4: Photo macroscopique d'une brèche ferrugineuse. Filons de quartz boudinés dans une matrice goéthito-hématitique.
(éch. PTOG-68-2)
- Photo 5: Faciès cendrier. Plage ferrugineuse montrant des paillettes de micas orientées dans deux directions.
(éch. TOG-13-1 ; LTN)

Le schéma souligne la disposition des micas.

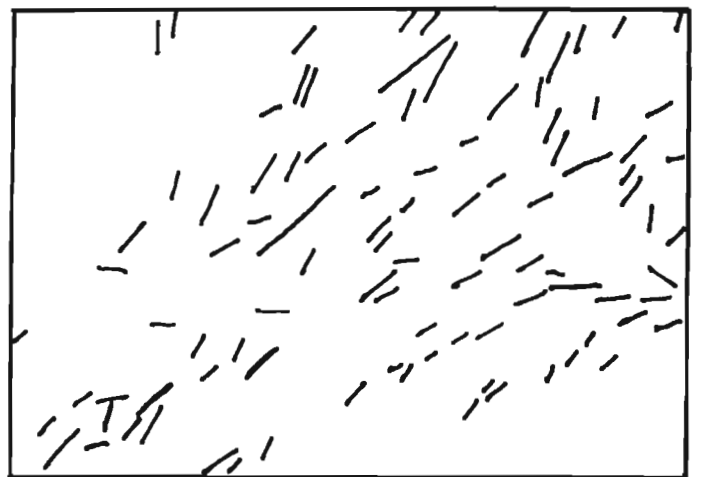
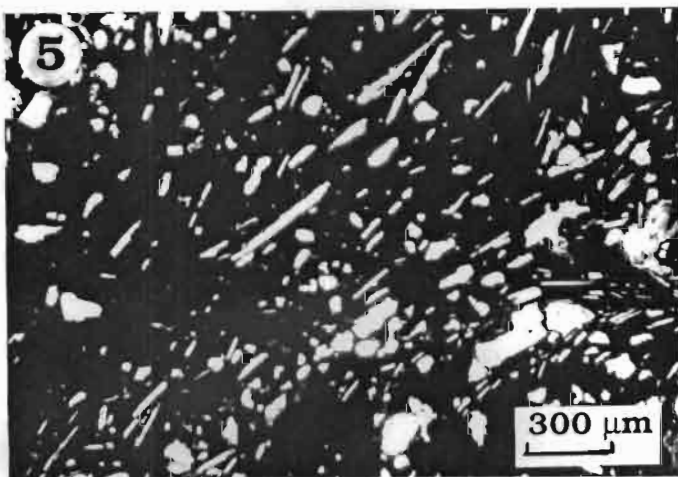
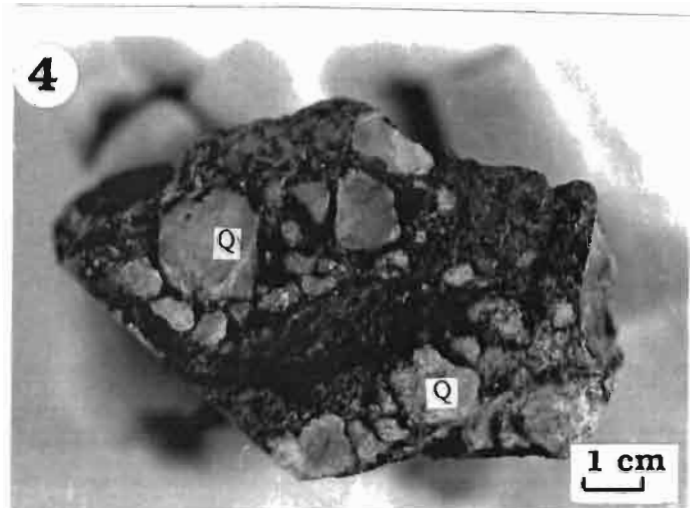
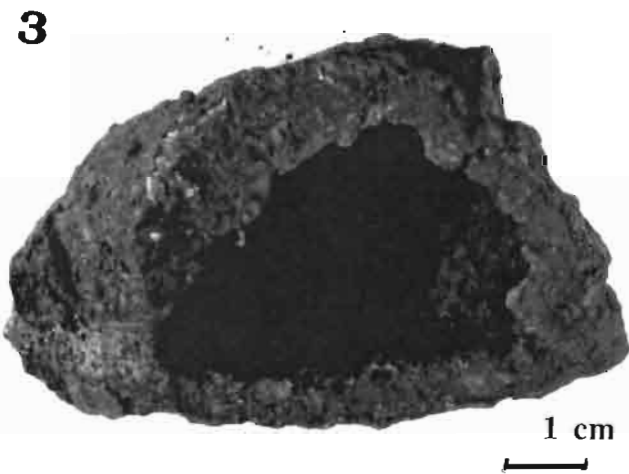
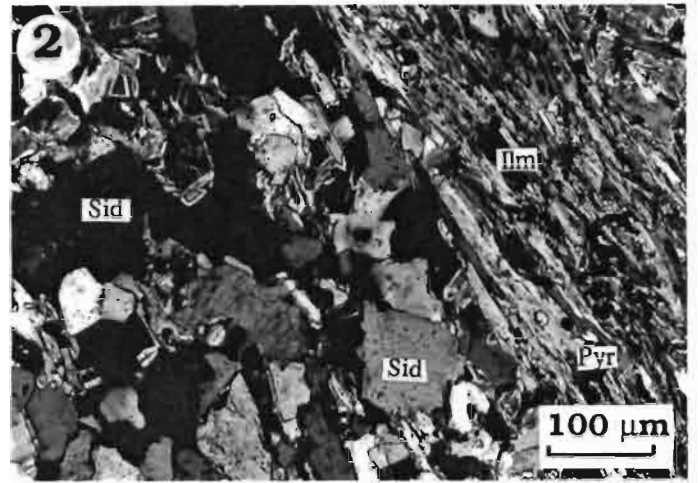
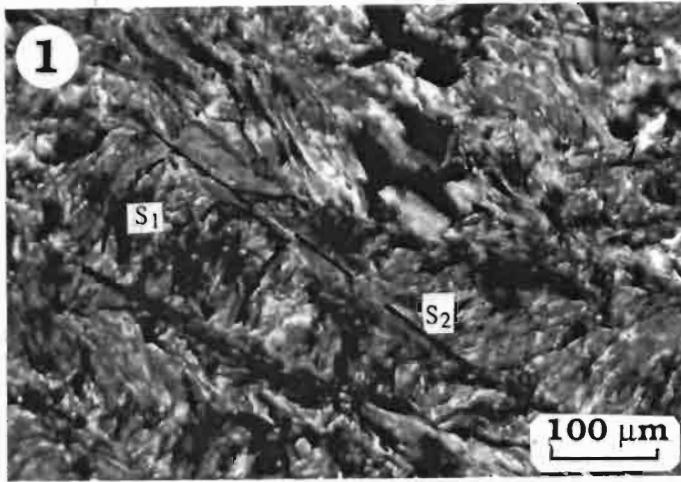


PLANCHE II

FACIES TYPIQUES DES CHAPEAUX DE FER.

- Photo 1: Faciès cendrier. Plage ferrugineuse avec des micas alignés dessinant la charnière d'un micropli.
(éch. TOG-2 ; LRN)
- Le schéma souligne la disposition des micas.
- Photo 2: Faciès ferrugineux massif. Plage de pyrolusite (P) associée à de la goethite micro-fibroradiée (G).
(éch. S-5 ; LTN)
- Photo 3: Faciès cendrier. Texture réticulée de la matrice ferrugineuse. Ici les deux types de réticulations sont bien visibles:
- macro-réticulations à gauche;
- micro-réticulations sur le reste de la photo.
(éch. TOG-13-1 ; LRN)
- Photo 4: Faciès cendrier. Cliché MEB en électrons retrodiffusés montrant des parois doubles de macro-réticulations.
(éch. TOG-13-1)
- Photo 5: Faciès cendrier. Micro-cendrier composé d'un coeur vide entouré d'une couche de goethite, puis d'un liseré d'hématite, les deux ayant une texture réticulée. Il est bordé d'une fissure bien visible à gauche et d'une autre qu'on devine à la limite inférieure de la photo.

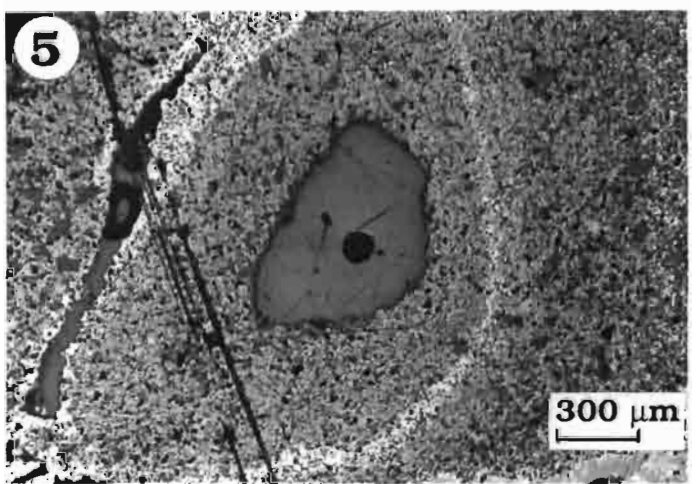
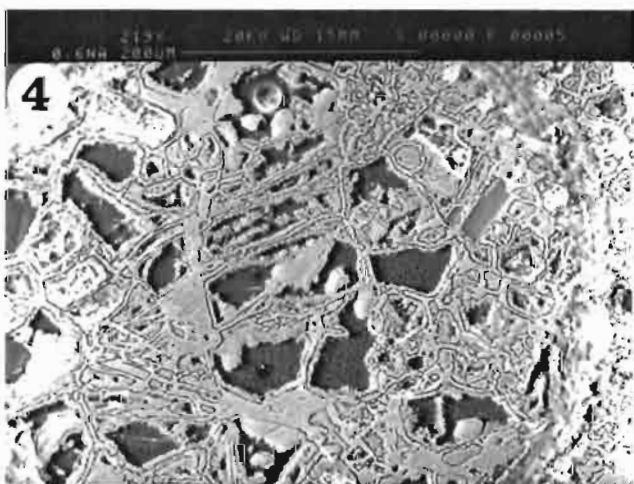
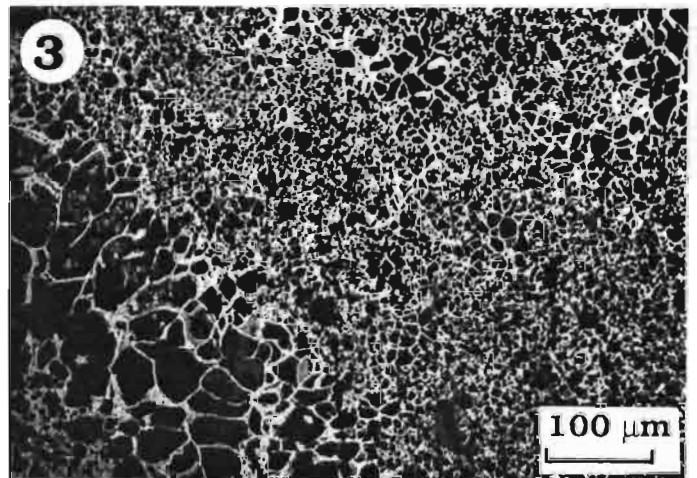
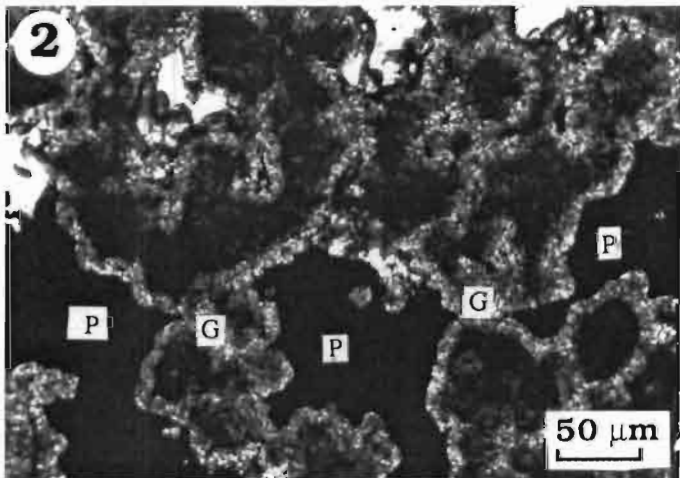
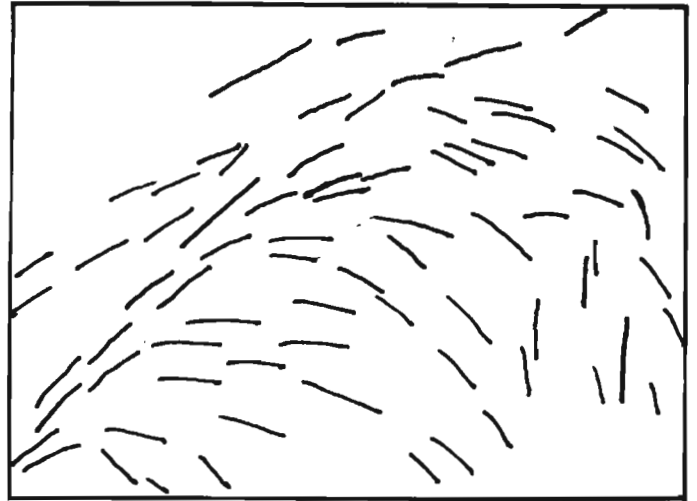
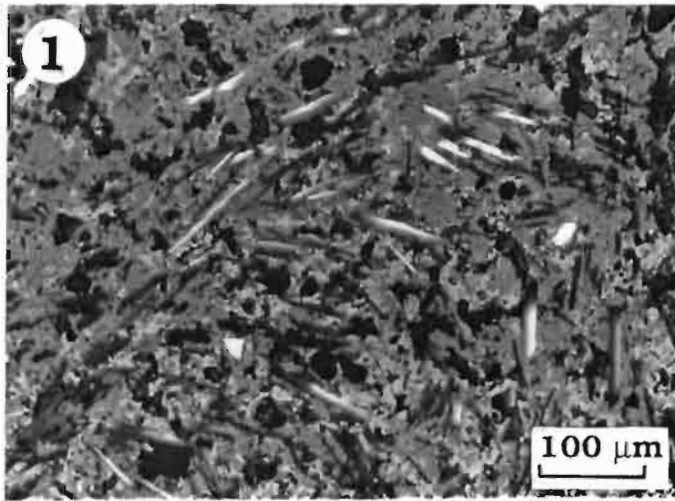


PLANCHE III

FACIES TYPIQUES DES CHAPEAUX DE FER.

Schéma de la coupe d'un "cendrier" de la périphérie vers la cavité centrale.

Faciès cendrier. Vue d'ensemble de la coupe d'un cendrier détaillée dans les quatre photos suivantes. (éch. TOG-30)

Zone 1 : Hématite massive.

Zone 2 : Hématite microcristalline micro-réticulée

Zone 3 : Goethite microcristalline micro-réticulée

Zone 4 : Hématite peu texturée

Zone 5 : Goethite cryptocristalline massive

Zone 6 : Identique à la zone 3

Zone 7 : Goethite fibroradiée en ogive.

Photo 1: Plage montrant une zone à hématite massive (a) et une zone à hématite microcristalline (b).

Photo 2: Plage constituée d'une zone riche en goethites microcristalline et cryptocristalline microréticulées (a); d'une passée mince d'hématite peu texturée (b); d'une passée de goethite cryptocristalline massive (c).

Photo 3 Plage de goethite microcristalline microréticulée caractéristique (a), évoluant vers la goethite fibroradiée (b).

Photo 4: Plage de goethite fibroradiée en ogive bordant la cavité centrale non visible ici (le cercle est un repère gravé pour les analyses microsituées).

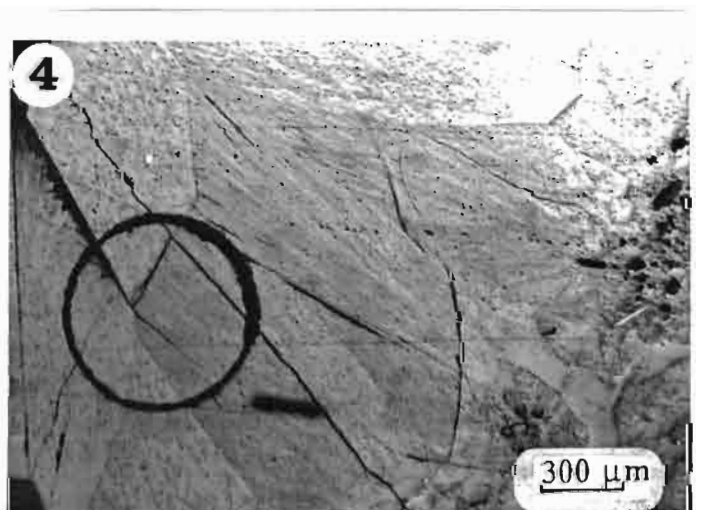
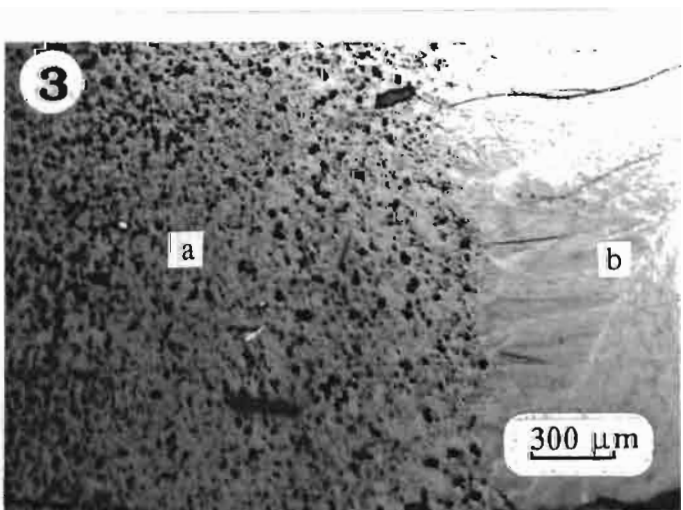
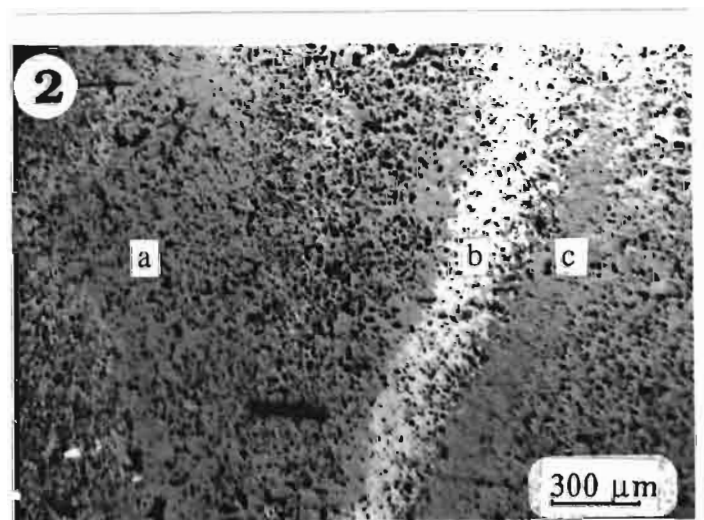
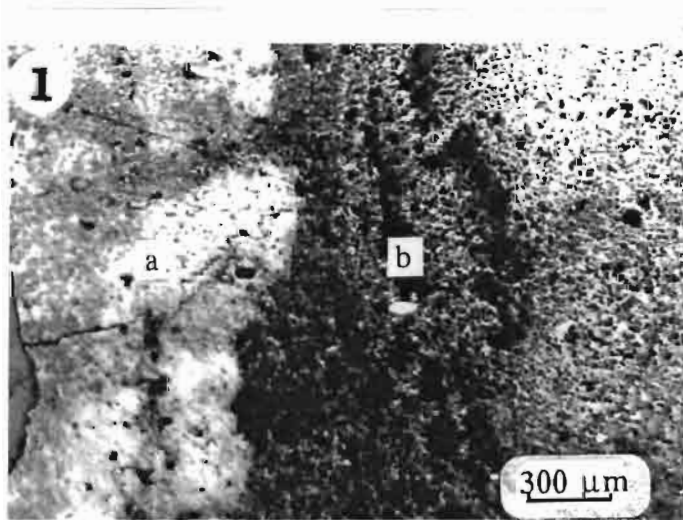
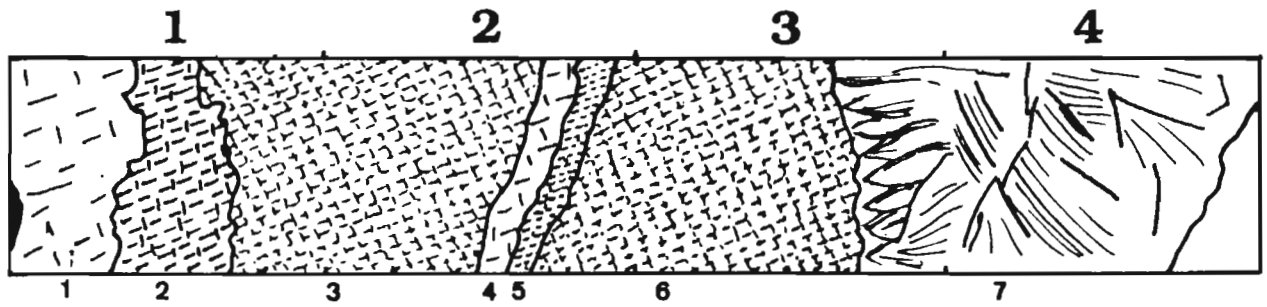


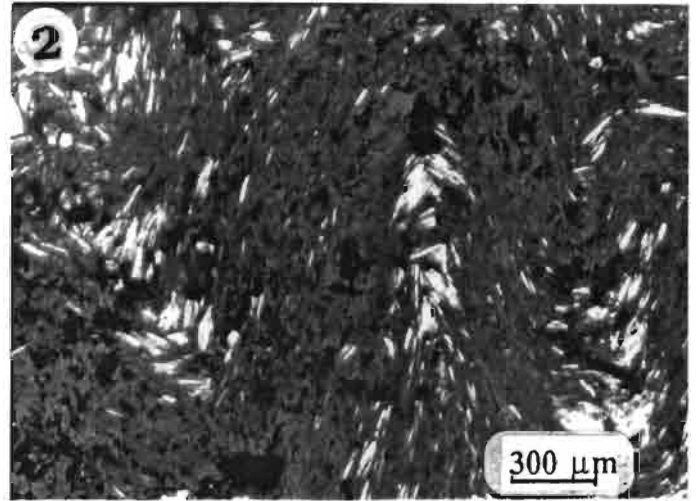
PLANCHE IV

- Photo 1: Schiste ferruginisé. Photo macroscopique d'amorce d'un cendrier. Cas particulier dans un schiste ferruginisé. (éch. Z-8)
- Photo 2: Schiste ferruginisé. Plage montrant des micas orientés dessinant des microplis dans une masse goethito-hématitique très vacuolaire. (éch. TOG-8 ; LRN)
- Photo 3: Schiste ferruginisé. Plage de pyrolusite (P) associée à de l'hématite fibroradiée (H). (éch. PTOG-70A ; LRN)
- Photo 4: Quartzite ferrugineux altéré. Plage constituée de goethite massive englobant un fragment d'hématite lamellaire en voie de démantèlement. (éch. TOG-48 ; LRN)
- Photo 5: Quartzite ferrugineux altéré. Cristaux de magnétite martitisés (Magn) et goethitisés (G). (éch. TOG-47 ; LRN)
- Photo 6: Quartzite ferrugineux altéré. Plage de magnétite altérée en goethite formant un réseau vermiculé. (éch. TOG-47 ; LRN)

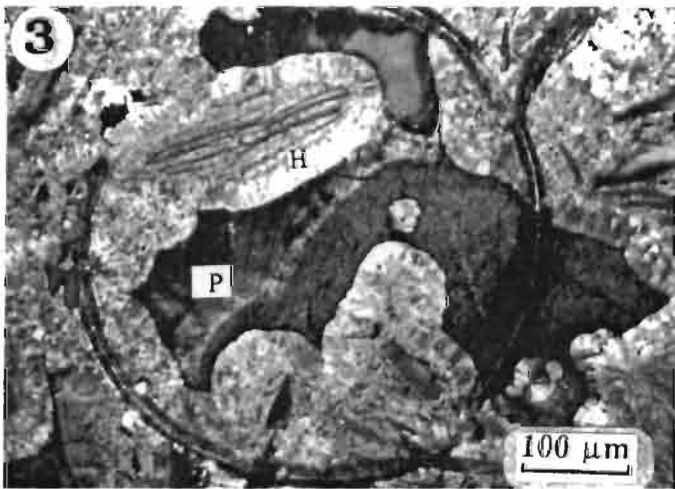
1



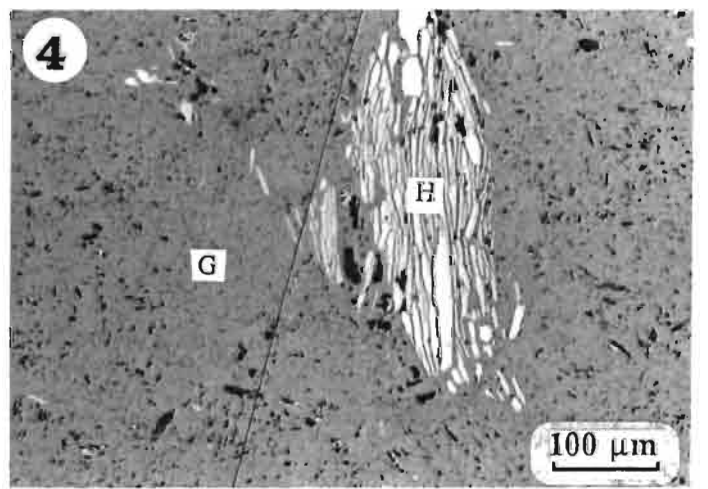
2



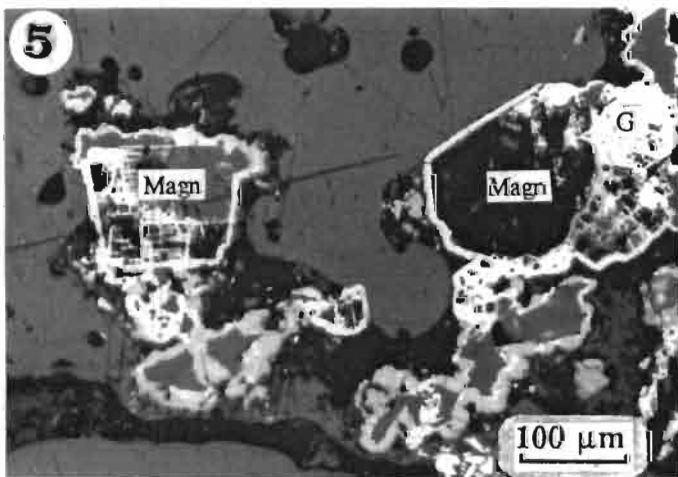
3



4



5



6

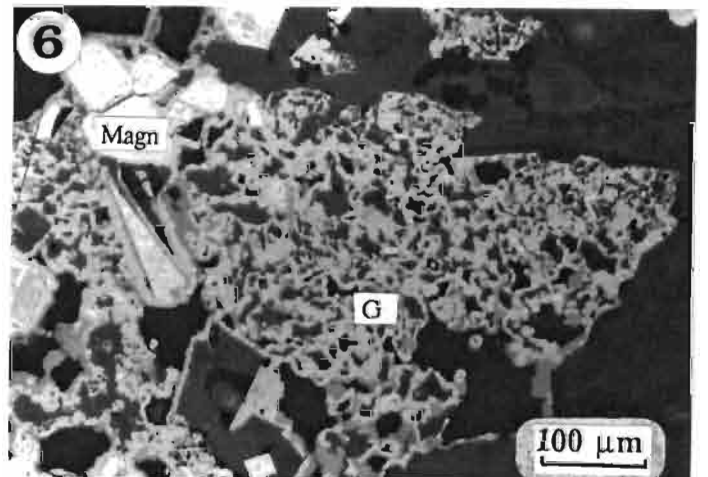


PLANCHE V

ROCHES FERRUGINISEES

- Photo 1: Phosphatite altérée. Sphérules phosphatés fibroradiés (Ph) dans une matrice ferrugineuse.
(éch. AB-695 ; LTN)
- Photo 2: Plage montrant des minéraux phosphatés prismatiques à sections triangulaires et des liserés d'oxydes de fer. Il s'agit de gorcéixite et de crandallite.
(éch. TOG-23A ; LTN)
- Photo 4: Carte de répartition des éléments Si, Mn, Fe et Zn sur la plage de la photo 3.

CASCADE D'OPOBLE

- Photo 5: Sidérite de la cascade. Micropli dessiné par des micas dans une plage de sidérite à grains fins.
(éch.-71 ; LRN)

Le schéma souligne cette disposition des micas.

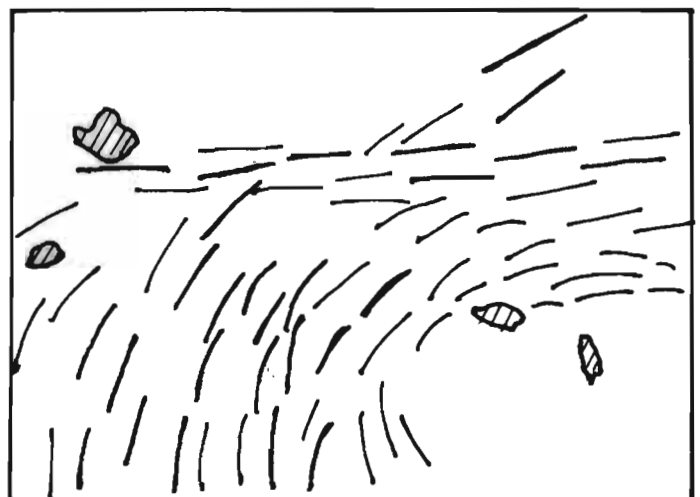
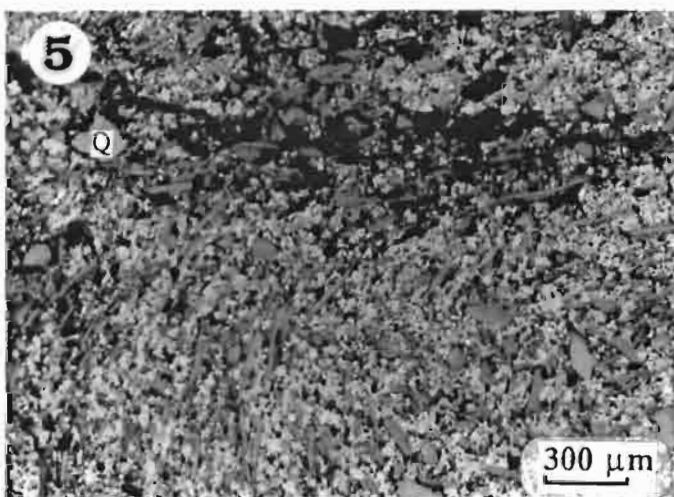
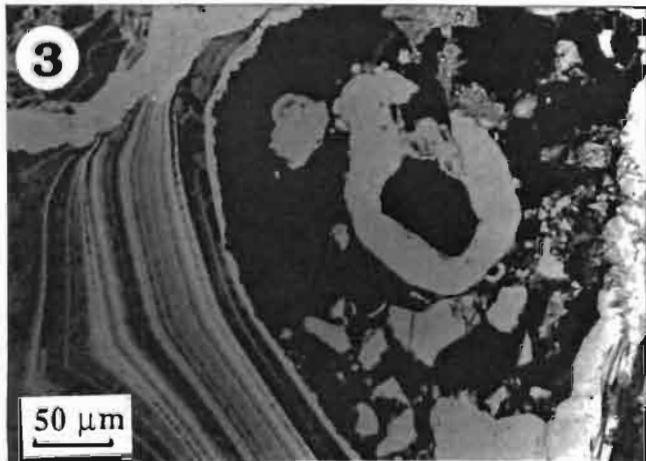
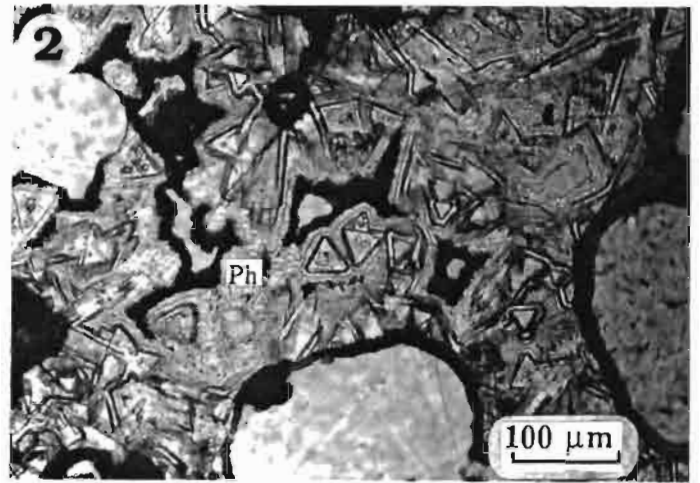
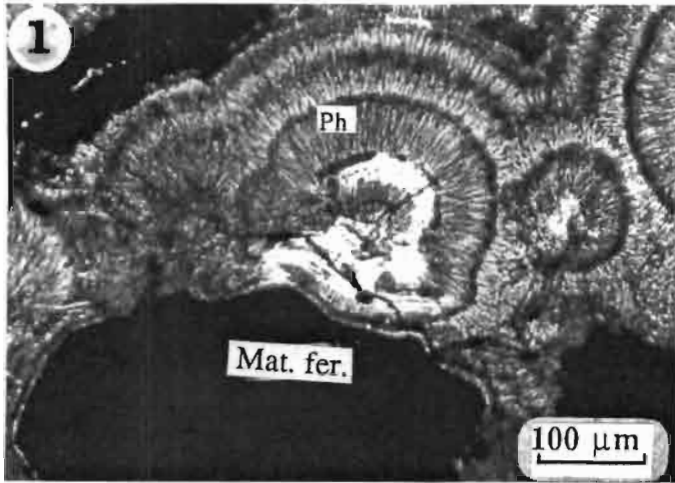


PLANCHE VI

CASCADE D'OPOBLE

- Photo 1: Sidérite de la cascade. Plage de sidérite à grains fins (sid) montrant un envahissement d'un élément lithique avec démantèlement de ce dernier par la sidérite plus grossière.
(éch. 71 ; LTN)
- Photo 2: Sidérite de la cascade. Démantèlement d'un élément de micaschiste (Ms) à la suite de l'envahissement par de la sidérite (Sid)
(éch. 71 ; L{T+R}P)
- Photo 3: Sidérite de la cascade. Plage de sidérite à grains fins englobant des grains de quartz et des micas et une pyrite automorphe.
(éch. 71 ; LTN)
- Photo 4: Sidérite de la cascade. Micaschiste avec micas orientés et montrant un début d'envahissement par la sidérite (sid) .
(éch. 77 ; L{T+R}P)
- Photo 5: Faciès oxydé de la cascade. Plage ferrugineuse montrant deux alignements de micas et la concordance entre les micas dispersés dans le plasma ferrugineux et ceux de l'élément lithique.
(éch. TOG-18 ; L{T+R}N)

Le schéma souligne la disposition des micas dans la matrice ferrugineuse.

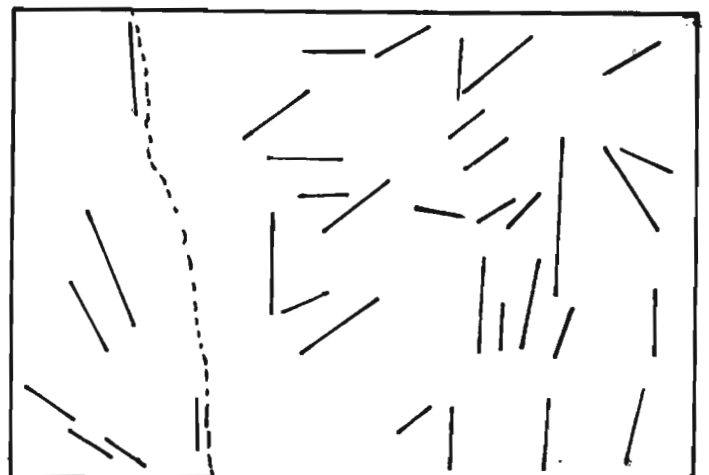
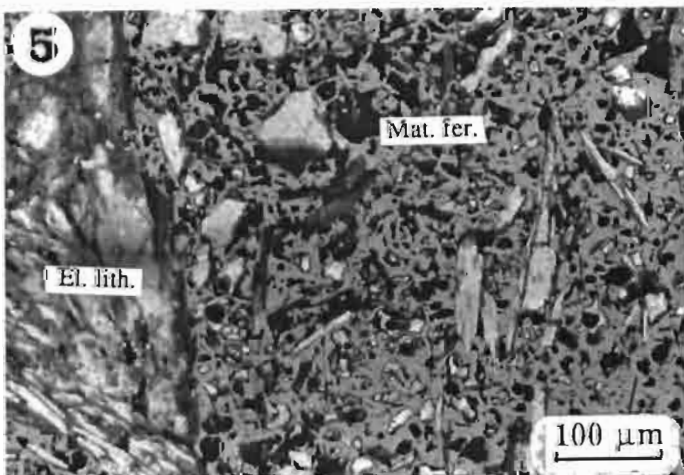
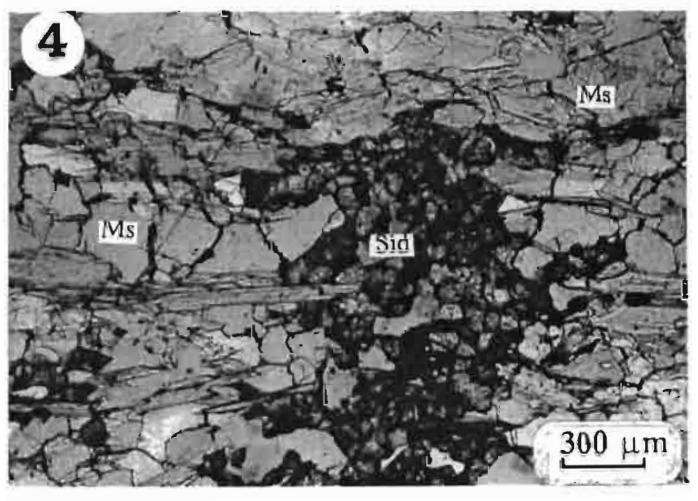
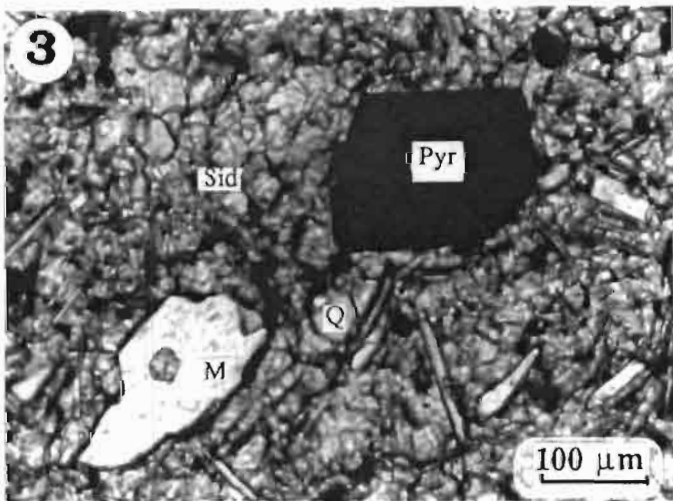
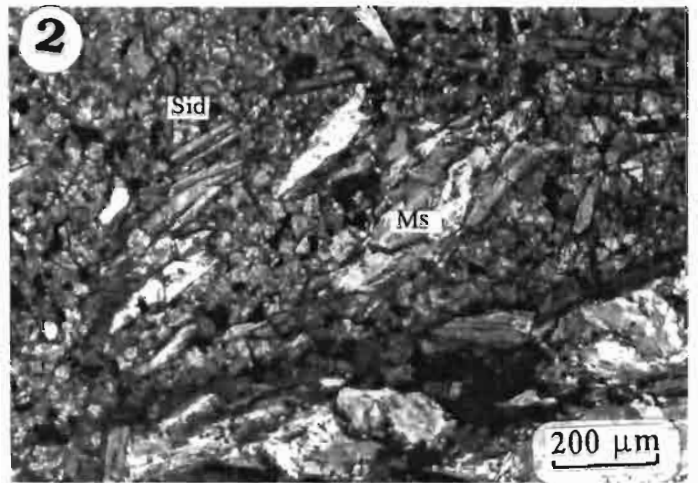
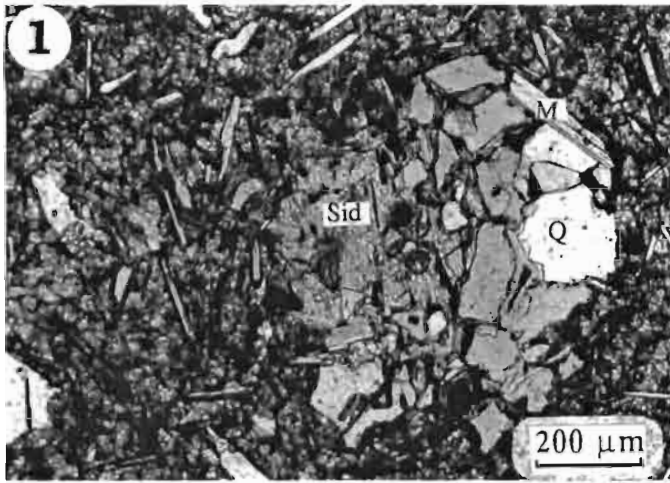


PLANCHE VII

CASCADE D'OPOBLE

- Photo 1: Faciès oxydé de la cascade. Fantôme de pyrite en couches goethito-hématitiques concentriques.
(éch. TOG-17B ; L{T+R}N)
- Photo 2: Faciès oxydé de la cascade proche de la zone de transition. Pyrite résiduelle dans une matrice ferrugineuse microréticulée riche en micas. La pyrite est entourée d'une couche de goethite passant vers l'extérieur à un liséré d'hématite.
(éch. 75 ; LTN)
- Photo 3: Vue d'ensemble de la localisation des photos 4, 5 et 6; noter la fissure traversant la ferruginisation.
(éch. 74; loupe binoculaire, Gr = 32).
- Photo 4: Plage de sidérite à grains fins parfois séparés par des fissures de dissolution non encore envahies par des oxydes de fer.
(LRN)
- Photo 5: Oxydation de la sidérite avec formation de parois doubles de goethite aux limites des grains. Il subsiste encore dans certaines cavités des grains résiduels de sidérite.
(éch. 74 ; L{T+R}N)
- Photo 6: Matrice microréticulée correspondant au stade d'évolution finale d'oxydation de la sidérite.
(éch. 74 ; LRN)

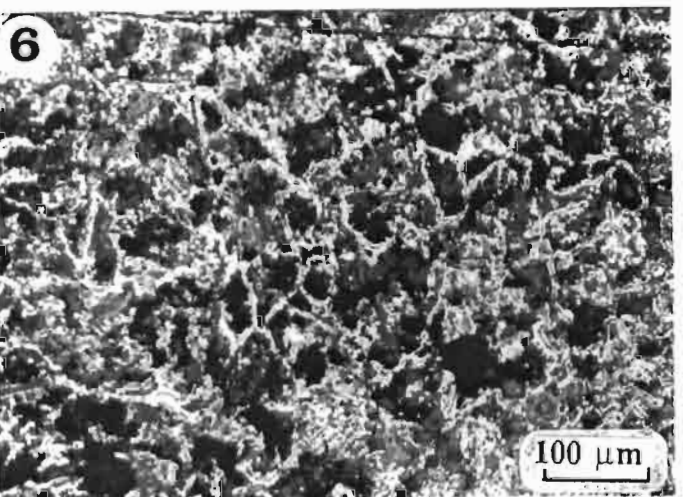
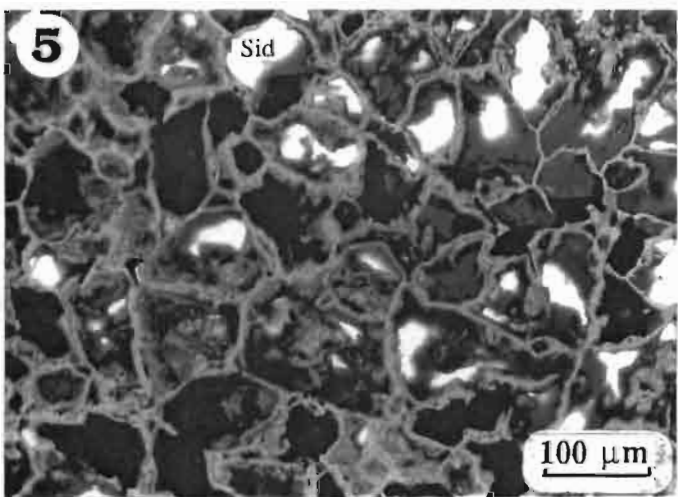
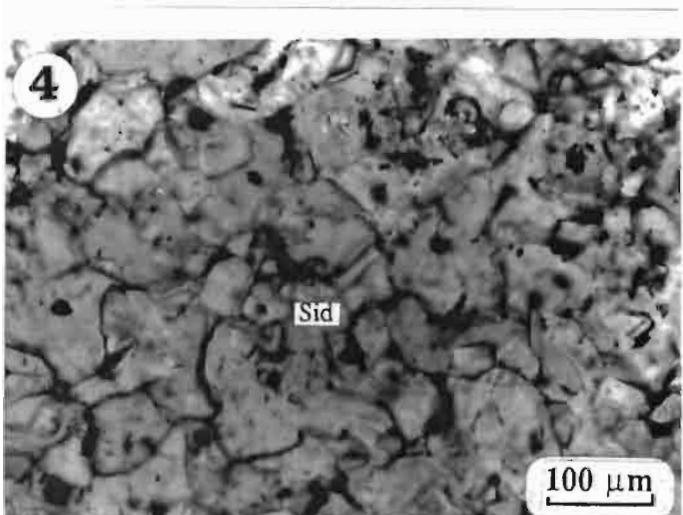
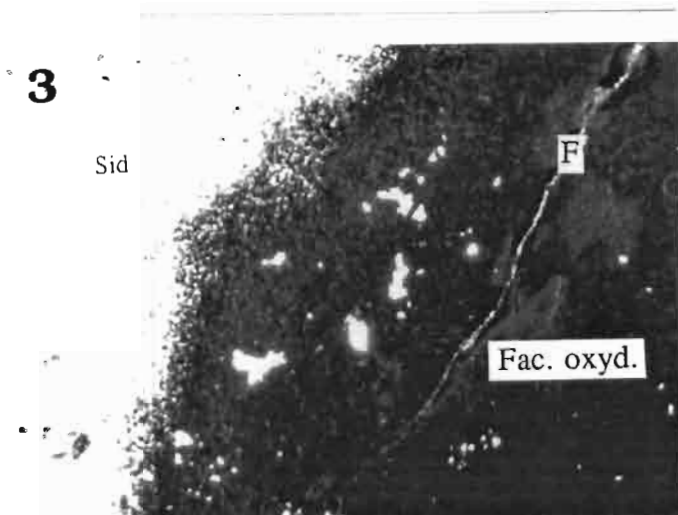
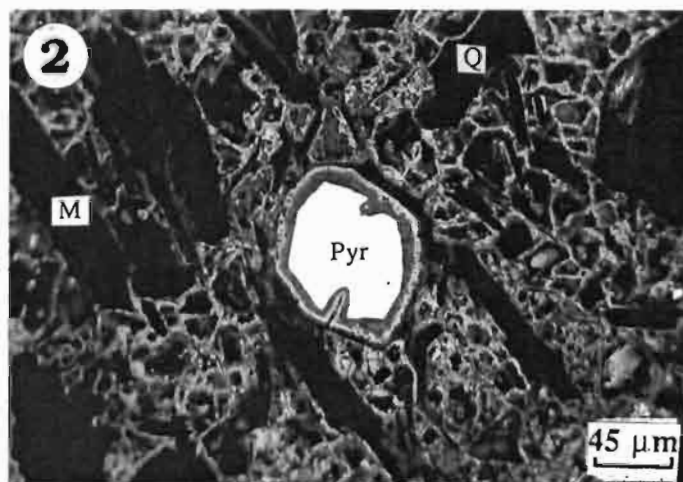
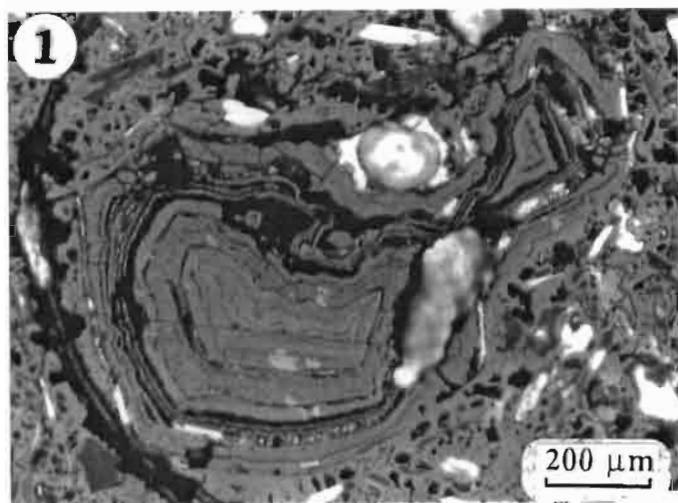


PLANCHE VIII

SITE DE LA CASCADE D'OPOBLE

Analyses microsituées

Photo 1: Plage de sidérite sur laquelle un profil de teneurs a été effectué (figure 23a). L'emplacement du profil est indiqué par un trait A-B. Noter la présence d'auréoles sombres dans les grains.

Photo 2: Idem sur une autre plage (profil présenté sur la figure 23b)

Cartes de répartitions chimiques dans la sidérite (éch. 836)

Photo 3: Sidérite de la cascade. Carte de répartition de Zn sur une plage de sidérite. L'auréole riche en Zn correspond à un pourtour de grain. Un profil de teneur, réperé par le trait A-B, a été effectué à travers ce grain (fig.23c). (éch. AB 836 ; Image X sur CAMECA SX-50)

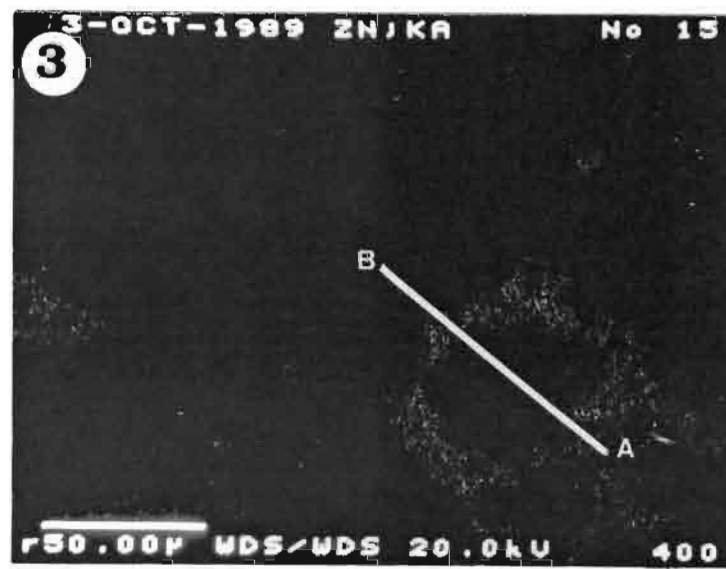
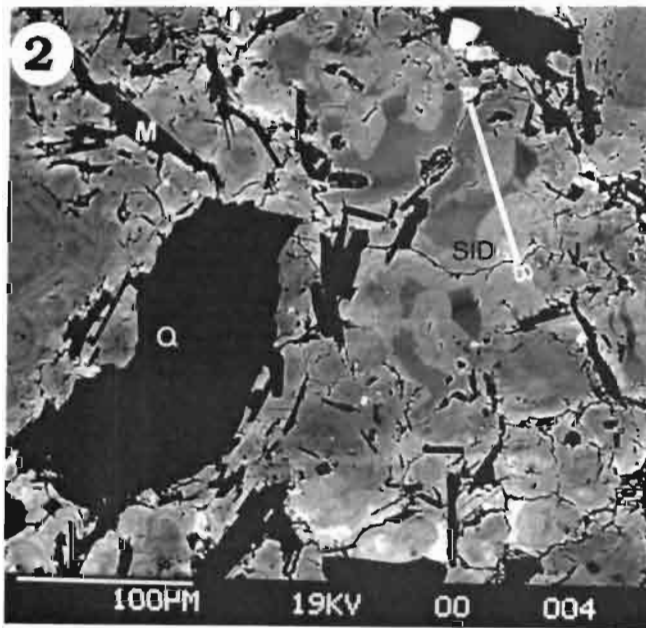
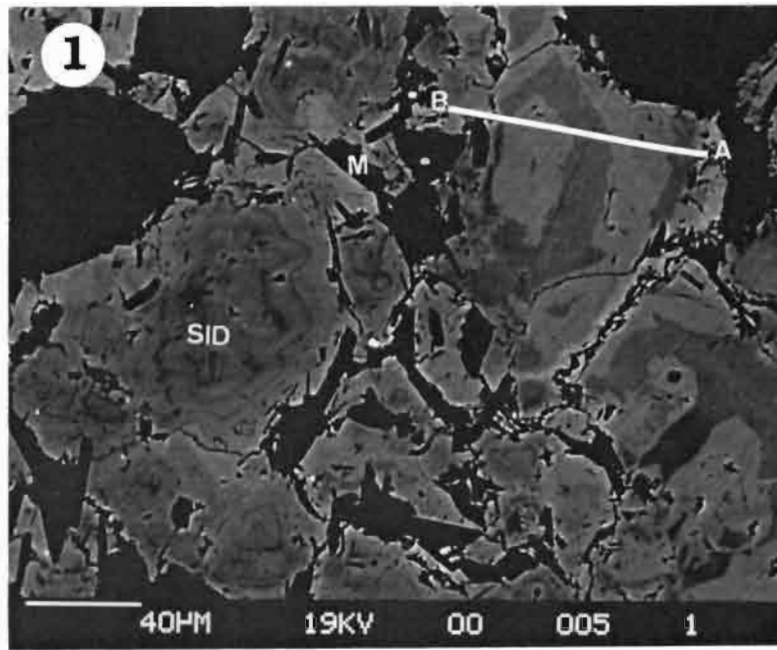


PLANCHE IX

CASCADE D'OPOBLE

Cartes de répartitions chimiques dans la sidérite (éch. 836-2)

Photo 1: Image en électron secondaire d'une plage comprenant des grains de sidérite (sid) dont les joints sont peu visibles du quartz (Q) et des muscovites (M). (éch. CAMECA SX-50)

Les photos 2, 3 et 4 sont des cartes de répartitions de Zn, Mn et Mg correspondant à la photo 1

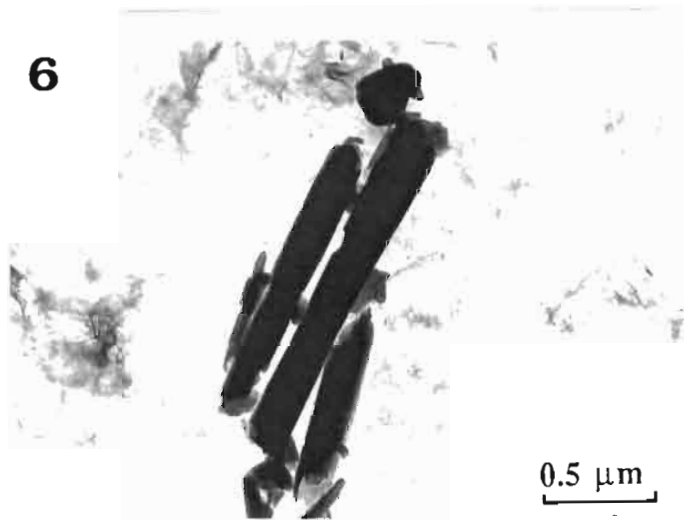
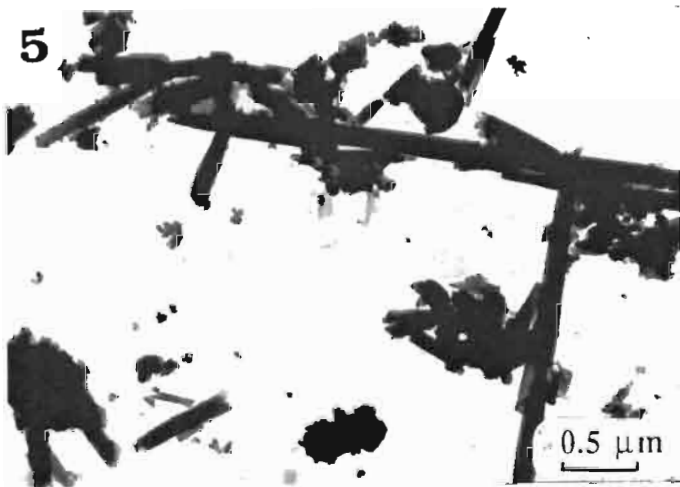
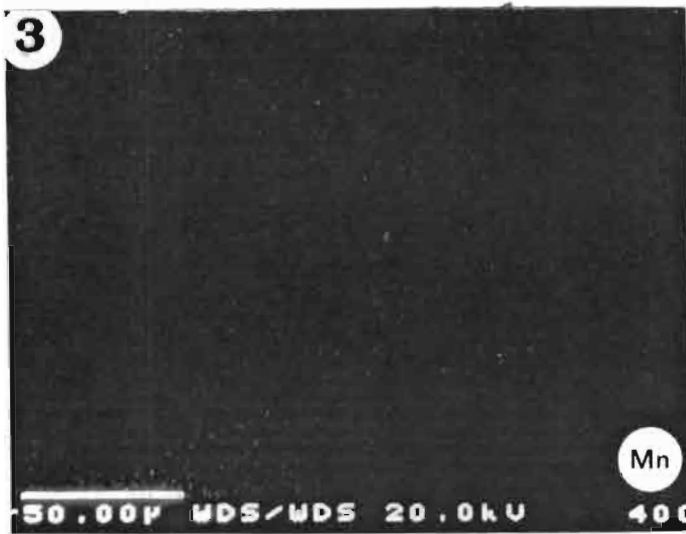
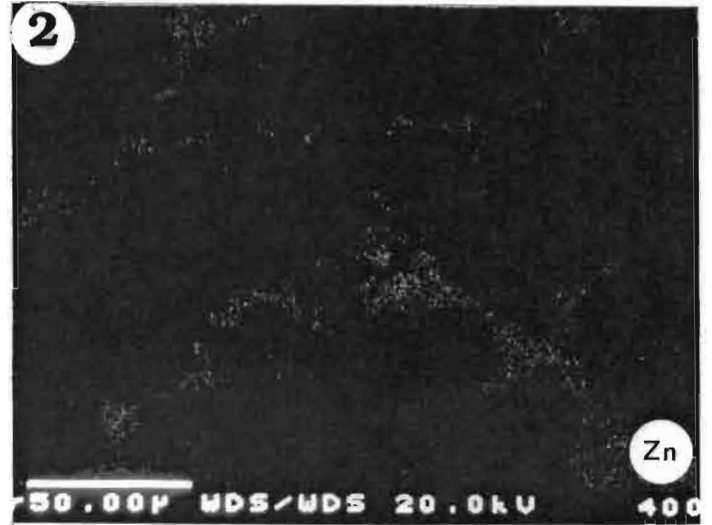
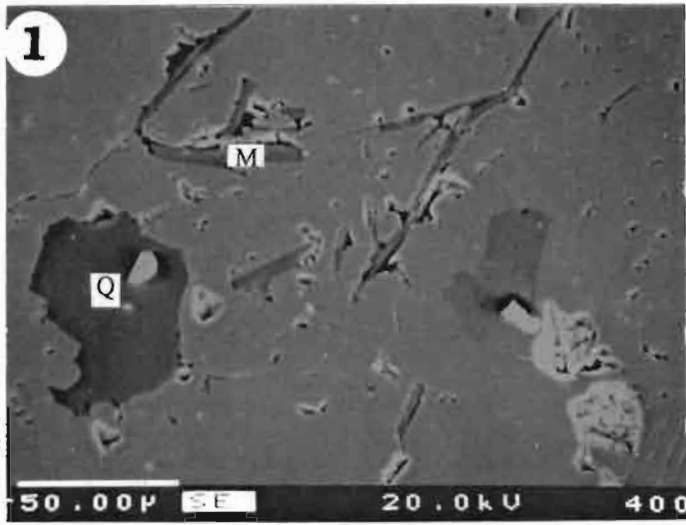
Photo 2 Mêmes plage. Carte de répartition de Zn. Noter l'abondance de Zn dans diverses zones de bordure des grains de sidérite.

Photo 3: Mêmes plage. Carte de répartition de Mn. Noter l'uniformité de la répartition

Photo 4: Mêmes plage. Carte de répartition de Mg. Noter l'abondance de Mg dans les muscovites.

FACIES D'ALTERATIONS ARGILEUSES BLANCHES

Photos 5 et 6 Morphologie en tubes et en feuillets de minéraux argileux; tubes: métahalloysite, feuillets: kaolinite. (éch. BLO-1 ; MET)



ANNEXE - 1

Analyses chimiques multi-élémentaires

Analyses chimiques multi-élémentaires sur échantillons classés par sites.

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
35135	E91	MD	ANAMANIE	51.1	7.6	7.45	9.9	2.4	0.02	0.37	0.10	3.80	0.1	.	.	16.5
35136	E92	MD	ANAMANIE	55.4	11.4	5.93	6.8	2.5	0.02	0.51	0.05	5.42	0.1	.	.	11.9
30560	PTOG. 1	CUI	BANDJELI	13.6	6.1	0.13	<0.2	70.0	0.06	0.23	<0.05	0.23	0.8	.	.	9.6
30561	PTOG. 2	CUI	BANDJELI	4.3	3.9	0.13	<0.2	77.6	0.30	0.13	<0.05	0.26	2.2	.	.	11.7
30562	PTOG. 3	CUI	BANDJELI	17.0	6.0	0.24	<0.2	63.7	0.21	0.17	<0.05	0.49	0.5	.	.	11.3
30563	PTOG. 4	CUI	BANDJELI	25.8	7.4	0.33	<0.2	55.3	0.15	0.40	<0.05	0.93	0.3	.	.	9.2
30564	PTOG. 5	CUI	BANDJELI	23.3	11.4	0.21	<0.2	56.6	0.04	0.49	<0.05	0.58	0.2	.	.	6.9
30565	PTOG. 6	CUI	BANDJELI	24.4	4.7	0.10	<0.2	63.3	0.07	0.30	<0.05	0.30	0.4	.	.	7.0
30566	PTOG. 7	CUI	BANDJELI	30.5	8.9	0.29	<0.2	47.4	1.05	0.55	<0.05	0.73	0.4	.	.	8.9
30567	PTOG7BIS	CUI	BANDJELI	63.6	8.2	0.38	0.6	15.1	0.24	1.04	<0.05	0.87	2.8	.	.	5.9
30112	T0G57	SH	BANDJELI	45.0	0.3	0.04	<0.2	53.7	0.03	0.08	0.08	<0.05	0.2	.	.	0.8
30111	T0G56	H	BIDJABE	32.2	2.7	0.13	<0.2	63.9	0.01	0.17	0.08	0.40	0.3	.	.	0.9
35563	BL-23	CALC	CARRIERE	2.9	0.7	2.09	50.0	0.7	0.05	0.05	<0.05	<0.05	0.1	11.63	<.02	42.7
35134	E77	B	CASCADE	44.8	26.4	2.95	<0.2	6.3	0.10	1.18	0.25	8.53	0.2	.	.	7.0
30193	PTOG85	BF	CASCADE	17.2	3.7	0.35	<0.2	66.3	0.38	0.17	0.06	1.20	0.1	.	.	8.8
30194	PTOG86	BF	CASCADE	26.0	4.9	0.58	<0.2	59.5	0.64	0.23	0.07	1.69	0.2	.	.	6.1
31366	T0G. 18	BF	CASCADE	41.1	7.4	0.76	<0.2	42.0	0.45	0.35	0.07	2.54	0.1	.	.	4.1
33958	CASC-1	BF	CASCADE	44.4	10.3	0.98	<0.2	32.1	0.14	0.63	0.13	3.44	0.1	0.12	<.02	5.9
33959	CASC-2	BF	CASCADE	52.6	12.9	1.17	<0.2	21.2	0.02	0.71	0.15	4.19	0.2	0.13	<.02	5.2
35141	E119	BF	CASCADE	36.3	7.4	0.84	<0.2	46.0	0.18	0.39	0.11	2.57	0.2	.	.	6.8
31364	T0G. 17. A	FCE	CASCADE	18.1	3.3	0.35	<0.2	68.2	0.43	0.15	<0.05	1.08	0.1	.	.	8.7
31365	T0G. 17B	FCE	CASCADE	18.8	4.0	0.42	<0.2	84.8	0.38	0.20	<0.05	1.36	0.1	.	.	9.5
31367	T0G. 19	FCE	CASCADE	24.0	4.4	0.58	<0.2	60.3	0.85	0.25	<0.05	1.65	0.2	.	.	6.5
33960	CASC-7	FMS	CASCADE	24.3	4.9	0.57	<0.2	57.8	1.01	0.23	0.06	1.67	0.1	1.49	<.02	8.2
33965	CASC-13	FMS	CASCADE	19.0	4.9	0.56	<0.2	66.7	0.29	0.19	0.07	1.72	0.1	0.17	<.02	5.6

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
35135	46	451	37	22	13	41	20	6	5.8	183	5	8	18	39	<1.0	0.9	0.5
35136	28	855	51	27	12	80	32	12	6.5	197	9	7	22	53	1.7	0.8	0.4
30560	6	76	155	171	31	164	369	64	11.9	88	8	18	6	45	<1.0	1.3	0.5
30561	6	311	63	229	52	47	509	24	9.0	55	7	12	9	56	<1.0	0.5	0.6
30562	7	100	136	196	72	87	333	30	19.2	82	9	26	25	80	<1.0	2.5	0.8
30563	5	408	132	70	41	119	230	51	8.4	123	11	19	23	53	<1.0	1.7	0.6
30564	37	66	140	27	15	110	60	27	8.8	150	11	12	21	49	<1.0	1.8	0.7
30565	23	97	96	22	20	71	167	24	4.4	168	10	9	15	49	<1.0	1.3	0.8
30566	11	876	196	73	170	321	273	32	10.4	151	13	21	19	98	<1.0	2.6	0.9
30567	99	583	114	12	36	70	50	18	10.3	334	19	39	41	104	<1.0	4.3	0.4
30112	86	268	62	69	15	29	18	12	3.5	22	7	25	18	42	1.1	1.8	<.1
30111	105	195	75	118	17	203	34	18	5.2	61	8	28	22	56	1.4	2.2	<.1
35563	1036	2122	8	15	9	8	10	2	1.0	10	21	4	10	41	<1.0	0.7	0.6
35134	7	25200	111	51	31	149	633	8	7.2	488	16	29	81	130	1.4	3.3	0.3
30193	6	1373	38	104	67	31	2802	17	6.8	88	5	54	41	73	1.2	3.3	<.1
30194	17	1799	46	85	56	35	1197	20	6.0	155	10	49	30	46	1.6	3.4	<.1
31366	11	2084	50	91	49	48	1274	17	6.9	121	10	31	14	49	<1.0	2.6	0.6
33958	39	4506	74	86	43	60	2870	24	9.7	196	15	25	26	76	1.9	1.8	0.7
33959	41	5376	99	42	8	79	1096	30	8.9	285	17	28	28	61	<1.0	1.6	0.2
35141	32	1761	51	115	86	47	5623	11	6.4	169	8	67	22	55	2.3	6.8	<.1
31364	6	1119	39	114	58	27	1629	14	4.3	91	10	66	8	43	<1.0	5.5	0.5
31365	8	1324	39	90	45	31	1233	7	4.0	102	7	42	9	39	1.0	3.2	0.7
31367	9	501	44	95	72	34	1720	17	4.8	135	10	33	10	41	1.2	2.7	0.4
33960	22	2453	35	120	91	36	6750	12	5.7	125	13	41	23	67	2.8	2.0	<.1
33965	7	932	49	91	64	36	4259	5	8.5	118	11	46	16	56	2.8	2.5	<.1

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
35133	E75	FMS	CASCADE	30.6	4.7	0.50	<0.2	52.0	1.21	0.24	0.09	1.71	0.2	.	.	6.9
33976	CASC14	S	CASCADE	65.2	17.6	1.45	<0.2	3.1	0.03	0.52	0.14	6.12	<0.1	1.95	<.02	5.0
31228	AB 836	SI	CASCADE	10.9	3.0	0.74	0.3	52.3	1.63	0.19	<0.05	1.09	0.1	.	.	26.6
33961	CASC-9	SI	CASCADE	13.9	2.7	0.56	0.3	46.5	1.20	0.14	<0.05	0.82	<0.1	8.00	0.70	32.5
33962	CASC-10	SI	CASCADE	15.4	2.8	0.47	0.2	52.0	1.40	0.12	<0.05	0.85	0.1	7.17	0.42	23.3
33963	CASC-11	SI	CASCADE	10.1	2.7	0.71	0.5	56.0	1.60	0.14	<0.05	0.85	0.1	8.60	0.98	27.0
33964	CASC-12	SI	CASCADE	15.1	2.9	0.69	0.4	54.0	1.38	0.15	<0.05	0.95	0.1	7.19	0.43	22.5
35129	E71	SI	CASCADE	19.2	3.1	0.64	0.2	47.9	1.26	0.18	<0.05	1.06	0.1	.	.	24.3
35130	E72	SI	CASCADE	17.9	3.6	0.64	<0.2	49.3	1.20	0.20	<0.05	1.29	0.1	.	.	24.1
35131	E73	SI	CASCADE	20.0	4.5	0.73	<0.2	48.3	1.18	0.23	<0.05	1.53	0.1	.	.	23.3
35132	E74	SI	CASCADE	13.1	2.4	0.61	0.3	58.3	1.56	0.15	0.08	0.82	0.2	.	.	22.1
35142	E120	SI	CASCADE	22.0	4.3	0.74	<0.2	46.5	1.06	0.30	0.08	1.42	0.2	.	.	21.8
34587	A1	FMS	CFA	32.4	3.0	0.28	<0.2	53.3	0.04	0.14	0.17	0.63	0.5	.	.	7.9
34588	A5	FMS	CFA	19.9	4.5	0.55	<0.2	63.1	0.03	0.24	0.11	1.13	1.2	.	.	9.3
34209	A1.1	FMS	CFA1	25.3	4.8	0.82	<0.2	59.7	0.45	0.30	<0.05	1.69	0.3	0.16	<.02	7.0
34210	A1.3A	FMS	CFA1	75.3	8.6	0.96	<0.2	8.6	0.12	0.44	0.06	2.76	<0.1	0.05	0.03	2.1
34211	A1.3B	FMS	CFA1	43.3	3.9	0.44	<0.2	44.5	0.51	0.27	<0.05	1.24	0.2	0.07	0.11	4.3
34212	A1.5	FSC	CFA1	17.7	1.5	0.26	<0.2	65.4	6.93	0.13	<0.05	0.36	0.7	0.14	<.02	5.4
34213	A1.6	MS	CFA1	50.8	11.2	4.63	6.1	8.7	0.14	0.66	0.07	4.08	0.3	2.76	0.08	11.9
34597	B1	FMS	CFB	2.7	2.3	0.15	0.2	85.3	2.76	0.04	<0.05	0.14	0.8	.	.	5.6
34628	B2	FMS	CFB	8.4	3.6	0.24	<0.2	76.7	0.51	0.34	0.09	0.56	0.7	.	.	7.4
34572	B1.1	FMS	CFB1	4.2	1.7	0.16	<0.2	78.5	1.10	0.09	0.06	0.39	1.5	.	.	11.0
34573	B1.4	FMS	CFB1	5.8	1.4	0.17	0.5	77.1	0.77	0.13	0.05	0.31	2.0	.	.	10.5
34589	C1	FMS	CFC	7.2	2.3	0.13	0.3	81.3	0.10	0.11	0.06	0.16	0.7	.	.	7.6
34590	C2	FMS	CFC	12.7	2.8	0.37	0.3	75.0	1.58	0.15	0.09	0.67	0.4	.	.	6.6

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
35133	29	1863	36	177	118	37	6438	13	4.7	112	7	60	17	36	1.8	4.8	<.1
33976	12	809	96	18	5	89	134	22	14.8	76	16	22	41	110	1.9	2.4	0.8
31228	26	2565	89	141	133	30	11901	16	4.9	83	7	85	21	50	1.2	4.8	0.4
33961	13	1787	36	82	72	24	5051	27	7.3	74	10	137	17	62	2.5	9.9	0.8
33962	18	1031	31	177	141	24	17111	11	16.3	60	3	102	32	124	6.8	8.3	0.7
33963	22	1853															

N*Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
34576	C1.2	FMS	CFJ	14.1	3.8	0.69	<0.2	69.3	0.60	0.18	0.09	1.35	0.4	.	.	7.8
34577	D2	FCE	CFD	24.6	5.2	0.42	0.5	56.7	0.30	0.32	0.14	1.10	0.5	.	.	8.7
34199	D1.1	BF	CFD1	60.4	0.4	0.04	<0.2	33.8	0.10	0.04	<0.05	0.07	1.0	0.10	<0.02	4.9
34200	D1.2	BF	CFD1	11.5	2.6	0.14	<0.2	71.4	0.20	0.17	<0.05	0.21	3.0	0.23	<0.02	11.1
34201	D1.4	FMS	CFD1	8.1	3.3	0.41	<0.2	72.6	0.06	0.17	<0.05	0.84	1.8	1.00	<0.02	11.1
34311	E.3	FCE	CFE	14.1	5.2	0.57	<0.2	68.1	0.74	0.15	0.06	1.60	0.1	0.11	0.02	9.5
34310	E.2	FMS	CFE	8.7	5.1	0.34	<0.2	72.5	4.19	0.15	0.07	1.10	0.2	0.23	0.11	6.8
34309	E.1	FSC	CFE	12.9	9.2	0.56	<0.2	65.3	1.03	0.26	0.09	1.75	0.2	0.25	0.05	8.9
34221	F.1	BF	CFE	29.4	3.9	0.44	<0.2	53.0	1.78	0.16	0.06	1.12	0.2	0.12	<0.02	8.3
34222	F.2	BF	CFE	15.5	3.7	0.48	<0.2	67.4	0.78	0.14	0.07	0.92	0.2	0.15	<0.02	9.6
34223	F.3	BF	CFE	12.1	3.6	0.37	<0.2	68.0	3.75	0.08	0.07	0.63	0.3	0.23	<0.02	9.3
34224	F.6	S	CFE	66.6	15.1	1.76	<0.2	5.9	0.06	0.72	0.45	5.00	0.1	0.13	<0.02	2.9
34595	G1	CUI	CFG	36.1	11.6	0.25	0.6	39.3	0.17	0.80	0.07	0.73	0.3	.	.	8.9
34596	G2	CUI	CFG	39.9	10.1	0.18	<0.2	38.5	0.33	0.76	<0.05	0.46	0.2	.	.	8.1
34270	G1.7	BF	CFG1	56.6	1.7	0.22	<0.2	31.7	1.66	<0.02	<0.05	0.55	0.6	0.08	0.03	5.2
34268	G1.3	FMS	CFG1	4.8	2.0	0.17	<0.2	72.8	4.67	<0.02	<0.05	0.34	0.9	0.17	0.02	11.6
34267	G1.1	FSC	CFG1	4.0	1.4	0.14	<0.2	78.7	1.49	<0.02	<0.05	0.20	1.7	0.08	0.02	11.2
34269	G1.5	FMS	CFG1	3.8	0.4	0.08	<0.2	78.3	4.91	<0.02	<0.05	0.09	1.5	0.08	<0.02	10.8
34584	H2	FSC	CFH	24.9	3.7	0.54	<0.2	61.8	1.65	0.17	0.09	0.97	0.6	.	.	5.4
34585	H4	FSC	CFH	12.4	2.8	0.40	0.3	69.8	1.38	0.13	0.07	0.63	1.2	.	.	10.5
34312	I.2	FMS	CFI	14.5	1.8	0.15	<0.2	71.8	0.07	0.07	<0.05	0.28	1.7	0.14	<0.02	10.2
34313	I.3	FMS	CFI	16.3	3.5	0.32	<0.2	66.4	0.07	0.16	<0.05	0.78	1.4	0.29	<0.02	9.8
34314	I.4	SFC	CFI	10.2	3.9	0.22	<0.2	73.2	0.08	0.13	<0.05	0.59	0.5	0.27	<0.02	11.3
34250	J.10	S	CFJ	55.1	21.5	2.47	<0.2	7.4	0.04	1.03	0.41	5.58	0.1	0.16	<0.02	4.6
34225	J.1	SF	CFJ	14.5	3.6	0.47	<0.2	70.7	0.72	0.14	0.10	1.01	0.4	0.33	0.03	8.5

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34576	13	347	62	253	168	36	303	19	9.5	84	8	30	14	31	<1.0	3.4	<.1
34577	10	2694	78	254	129	52	3386	32	4.3	87	8	23	17	43	<1.0	2.2	0.2
34199	15	934	25	419	55	48	1872	19	0.9	11	<2	11	12	<1.0	<0.1	0.3	
34200	16	1551	60	282	51	106	2513	66	5.7	43	6	27	19	36	<1.0	0.3	<.1
34201	9	2660	84	658	69	57	1400	79	5.1	50	10	14	12	31	<1.0	<0.1	<.1
34311	6	632	114	197	171	36	3078	16	15.2	89	9	41	12	37	2.6	1.8	<.1
34310	15	1265	45	261	319	33	10407	20	10.1	79	11	69	17	131	<1.0	3.2	<.1
34309	13	2012	74	190	156	54	2109	49	36.2	119	15	123	57	520	<1.0	6.4	1.1
34221	10	1365	29	479	431	17	12160	15	3.1	73	8	58	10	15	<1.0	2.5	0.2
34222	<1	1299	48	369	254	24	6689	19	6.0	81	6	84	13	23	<1.0	3.5	<.1
34223	12	3275	52	431	511	23	13985	20	9.5	75	8	71	40	128	<1.0	3.3	<.1
34224	24	583	71	20	9	71	212	25	11.9	232	7	24	31	46	<1.0	2.7	0.5
34595	13	249	495	33	31	324	57	39	12.7	161	13	14	12	24	<1.0	2.2	0.7
34596	12	374	338	29	52	240	49	62	13.5	149	14	11	9	132	<1.0	1.8	0.2
34270	13	3034	28	109	190	10	421	8	1.2	27	7	11	12	26	<1.0	0.4	0.4
34268	28	5454	61	532	575	27	3436	666	7.5	33	10	348	184	1038	17.0	18.8	2.8
34267	23	2432	56	532	186	17	2125	14	1.7	22	9	12	12	31	<1.0	<0.1	<.1
34269	10	9239	38	537	319	13	766	30	1.3	14	10	42	9	29	<1.0	0.5	<.1
34584	100	705	89	78	58	32	144	17	5.5	75	7	17	17	36	<1.0	2.6	<.1
34585	867	984	69	95	88	26	446	22	4.2	46	5	78	101	61	<1.0	4.2	<.1
34312	9	143	44	187	28	30	930	19	3.0	32	3	42	14	23	1.9	0.7	<.1
34313	21	268	73	217	43	38	913	27	3.8	57	5	107	22	22	2.5	5.5	0.6
34314	8	148	123	230	52	32	996	16	4.6	30	5	59	31	47	1.0	1.0	<.1
34250	69	1236	139	25	<5	105	127	28	25.9	194	14	40	26	26	<1.0	4.0	0.7
34225	16	348	66	203	177	22	1401	14	4.4	64	9	12	7	19	<1.0	<0.1	<.1

N*Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
34226	J.2	SFC	CFJ	16.5	3.8	0.35	<0.2	66.1	0.25	0.19	0.09	0.71	0.6	0.34	<0.02	10.9
34249	J.3	SFC	CFJ	14.3	2.2	0.29	<0.2	75.0	1.14	0.10	0.10	0.48	0.3	0.26	<0.02	4.2
34578	J1.1.1	FMS	CFJ1-1	25.1	2.7	0.10	<0.2	63.0	<0.01	0.08	<0.05	0.16	0.4	.	.	8.3
34579	J1.1.6	FMS	CFJ1-1	55.1	0.8	0.06	<0.2	35.2	0.02	0.06	<0.05	0.14	1.2	.	.	5.5
34315	K.1	BF	CFK	13.4	3.5	0.68	<0.2	72.9	0.66	0.12	0.09	0.87	0.4	0.42	0.03	7.9
34317	K.5	BF	CFK	18.3	5.2	0.42	<0.2	60.3	2.84	0.17	0.08	0.99	0.4	0.37	0.05	10.3
34316	K.2	FMS	CFK	28.1	6.5	0.49	<0.2	57.7	0.31	0.26	0.15	1.21	0.2	0.27	0.08	4.9
34593	K1.3	BF	CFK1	18.6	4.1	0.50	<0.2	63.0	0.09	0.16	0.14	1.21	0.8	.	.	9.6
34594	K1.8	FMS	CFK1	32.4	3.1	0.28	<0.2	52.6	0.31	0.13	<0.05	0.70	0.4	.	.	8.3
34574	L2	FMS	CFL	13.1	4.3	0.17	<0.2	72.0	0.16	0.06	<0.05	0.32	0.6	.	.	10.5
34575	L5	FMS	CFL	36.3	4.2	0.20	<0.2	50.7	0.04	0.21	0.42	0.38	0.6	.	.	7.8
35174	E140	FCE	CFL1	2.7	0.9	0.15	<0.2	82.5	0.47	0.04	0.07	0.16	0.3	.	.	12.0
35175	E141	FMS	CFL1	4.0	1.1	0.19	<0.2	81.4	0.63	0.02	0.07	0.34	0.3	.	.	11.5
35176	E142	FMS	CFL1	10.3	3.7	0.35	<0.2	71.3	0.42	0.14	0.09	1.11	0.2	.	.	10.8
34568	M4	FMS	CFM	10.7	2.0	0.21	<0.2	79.1	1.19	0.14	0.12	0.51	0.3	.	.	6.8
34569	M5	FMS	CFM	5.2	2.7	0.07	<0.2	77.7	0.16	0.07	0.05	0.17	0.6	.	.	11.4
34271	N.3	BF	CFN	13.9	3.1	0.24	0.3	72.0	0.69	0.13	0.06	0.70	0.8	0.13	0.15	8.0
34272	N.4	BF	CFN	13.6	4.9	0.28	<0.2	66.3	0.17	0.16	0.08	1.10	0.4	0.20	<0.02	10.9
34273	N.5	CS	CFN	69.6	11.9	1.80	0.8	8.6	0.14	0.57	2.46	2.25	0.2	0.14	<0.02	2.4
34274	N.9	G	CFN	95.5	1.5	0.13	<0.2	2.3	0.01	<0.02	0.06	0.54	<0.1	0.05	<0.02	0.3
34275	N.10	MS	CFN	65.5	15.6	2.21	<0.2	6.6	0.12	0.82	1.57	3.94	0.2	0.08	<0.02	2.9
34277	O.6	BF	CFO	31.2	3.7	0.29	<0.2	51.1	0.69	0.14	0.18	0.83	1.9	0.34	0.02	8.2
34294	O.13	BF	CFO	22.2	2.7	0.23	<0.2	66.3	0.55	0.09	<0.05	0.54	0.5	0.24	0.06	7.3
34276	D.2	FSC	CFO	9.3	1.7	0.08	<0.2	73.6	1.12	<0.02	0.09	0.23	1.5	0.21	<0.02	10.9
34278	O.12	S	CFO	59.6	16.5	4.08	<0.2	8.8	0.37	0.83	1.10	3.19	0.2	0.03	<0.02	3.8

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34226	17	367	110	80	98	26	771	16	9.4	71	8	26	13	60	<1.0	0.5	<.1
34249	32	418	72	128	191	13	1552	34	6.3	55	5	14	5	14	<1.0	<0.1	<.1
34578	7	614	58	32	23	40	38	89	5.9	27	5	6	10	27	<1.0	1.5	<.1
34579	5	435	39	83	24	16	601	4									

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
34320	P.3	BF	CFP	36.7	5.8	0.34	0.4	43.7	0.02	0.15	0.06	0.91	2.0	0.25	0.04	8.2
34318	P.1	FSC	CFP	7.8	4.2	0.17	0.3	74.3	0.03	0.10	0.05	0.39	2.0	0.15	0.04	11.0
34319	P.2	FSC	CFP	10.1	3.6	0.23	0.3	67.0	0.02	0.14	0.05	0.66	2.7	0.39	0.08	11.7
34629	O2	FMS	CFO	6.4	3.5	0.13	<0.2	79.3	0.34	0.07	0.07	0.42	0.8	.	.	7.6
34630	Q5	FMS	CFO	24.9	3.5	0.25	<0.2	63.8	0.43	0.12	0.08	0.74	0.6	.	.	5.5
34591	R4	FMS	CFR	20.3	2.5	0.12	<0.2	68.5	0.03	0.19	<0.05	0.32	0.3	.	.	7.0
34592	R6	FMS	CFR	14.7	3.9	0.22	<0.2	71.1	0.08	0.15	<0.05	0.46	0.3	.	.	8.6
34295	S.1	FMS	CFS	8.5	2.5	0.12	<0.2	71.5	0.63	0.08	<0.05	0.26	0.4	0.20	0.10	4.2
34296	S.4	FMS	CFS	19.5	3.5	0.27	<0.2	67.8	0.70	0.10	0.09	0.44	0.4	0.62	0.08	8.3
34297	S.5	FMS	CFS	20.7	3.6	0.26	<0.2	63.0	0.23	0.15	<0.05	0.70	0.2	0.67	0.18	9.3
34298	S.6	S	CFS	59.4	18.7	1.90	<0.2	8.2	0.06	0.93	0.51	4.27	<0.1	0.17	<0.02	4.2
34216	T.6	FCE	CFT	19.5	4.7	0.37	<0.2	65.4	0.53	0.28	0.11	0.68	0.4	0.38	0.05	8.9
34214	T.1	FMS	CFT	31.1	4.0	0.41	<0.2	54.7	0.03	0.23	0.09	0.91	0.3	0.66	<0.02	8.8
34215	T.3	FMS	CFT	11.3	1.5	0.16	<0.2	73.5	0.03	0.10	0.07	0.25	1.0	0.37	<0.02	11.0
34217	T.7	SF	CFT	59.7	20.2	1.52	<0.2	6.1	0.51	0.92	0.63	4.34	0.1	0.09	<0.02	4.9
34260	U.3	FCE	CFU	14.3	3.6	0.29	<0.2	70.4	0.53	0.19	0.05	0.68	0.3	0.09	<0.02	10.0
34261	U.5	FMS	CFU	12.3	2.7	0.17	<0.2	71.2	0.08	0.18	0.05	0.43	1.2	0.24	<0.02	10.8
34259	U.1	K	CFU	46.8	21.5	0.04	<0.2	17.1	0.03	1.31	0.38	5.69	0.1	0.20	<0.02	5.5
34262	U.8	S	CFU	49.7	25.8	2.37	<0.2	9.7	0.05	4.45	<0.05	<0.05	0.2	0.44	<0.02	8.5
34305	V.5	FCE	CFV	20.7	3.7	0.26	<0.2	65.2	0.45	0.11	0.10	0.70	0.3	0.23	<0.02	7.2
34303	V3.A	FMS	CFV	8.3	1.6	0.20	<0.3	81.6	0.60	0.06	<0.05	0.27	0.7	0.35	<0.02	7.6
34304	V3.B	FMS	CFV	15.5	1.9	0.38	0.4	72.8	0.48	0.04	0.06	0.43	0.8	0.29	0.03	3.8
34306	V.7	S	CFV	64.8	17.3	1.60	<0.2	8.5	0.04	0.82	0.77	3.19	<0.1	0.29	0.03	3.8
34307	V.8	TER	CFV	51.8	20.8	0.73	0.4	10.6	0.08	1.16	0.20	2.65	0.2	3.01	0.03	11.7
34251	W.3	BF	CFW	19.8	3.0	0.28	<0.2	63.9	0.26	0.12	0.10	0.60	0.4	0.73	<0.02	10.9

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34320	286	1430	29	75	27	32	104	234	39.9	64	5	55	164	412	9.8	3.0	0.4
34318	98	460	45	61	29	21	151	216	20.8	67	6	21	125	317	4.3	<0.1	<.1
34319	451	2680	66	69	25	38	157	312	43.5	83	7	75	825	1815	31.5	4.1	<.1
34629	67	223	40	151	154	35	649	94	5.6	46	10	49	19	45	<1.0	8.0	0.8
34630	135	277	35	85	57	29	507	71	3.8	69	9	43	34	63	<1.0	4.2	0.7
34591	2	1354	44	65	33	31	2453	312	6.9	60	6	60	5	<10	<1.0	7.0	0.5
34592	2	2618	52	147	68	32	2893	557	6.2	55	7	59	8	30	<1.0	8.6	0.5
34295	16	105	96	266	121	43	1231	13	13.9	59	6	21	15	27	<1.0	<0.1	<.1
34296	52	278	83	93	90	39	365	14	10.8	66	8	23	22	46	<1.0	<0.1	<.1
34297	9	174	84	299	229	34	3470	12	3.9	54	9	40	16	33	<1.0	1.9	<.1
34298	93	418	120	35	23	106	169	45	22.9	172	13	30	41	41	<1.0	2.9	0.5
34216	14	206	133	131	94	44	1036	31	5.7	55	9	17	9	35	<1.0	0.2	<.1
34214	13	689	112	93	29	47	944	35	9.0	55	7	37	12	16	<1.0	1.1	<.1
34215	30	123	62	127	35	25	985	13	8.1	24	5	51	24	32	<1.0	1.6	<.1
34217	148	1243	144	23	42	108	174	38	18.3	124	20	29	80	324	<1.0	2.4	<.1
34260	7	560	53	107	53	26	518	32	3.5	64	4	17	4	<10	<1.0	0.4	<.1
34261	59	190	53	66	38	25	622	35	8.1	71	6	43	16	<10	<1.0	2.0	0.4
34259	93	92	495	54	18	100	61	7	33.8	365	66	30	50	47	<1.0	2.7	0.1
34262	103	855	161	83	18	153	79	7	27.4	229	13	18	<3	<10	<1.0	<0.1	0.4
34305	33	260	61	231	135	36	752	11	4.0	50	10	14	19	38	<1.0	<0.1	0.4
34303	23	139	56	229	123	24	1382	10	3.6	33	9	10	<3	23	<1.0	<0.1	<.1
34304	30	220	65	232	78	29	839	9	3.9	31	10	10	4	19	<1.0	<0.1	0.3
34306	74	384	114	35	13	106	149	64	20.4	143	19	56	84	116	<1.0	4.1	0.2
34307	71	552	148	31	17	95	111	40	20.2	193	24	34	36	79	<1.0	2.9	0.4
34251	17	210	57	59	40	25	1110	7	4.3	42	3	13	9	<10	<1.0	<0.1	<.1

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
34254	W.8	CUI	CFW	19.4	7.9	0.30	<0.2	59.9	0.29	0.46	0.09	0.64	0.8	0.57	<0.02	9.3
34252	W.6	FMS	CFW	32.5	8.5	0.94	<0.5	45.7	0.03	0.53	0.19	2.08	0.2	0.60	<0.04	8.9
34253	W.7	FMS	CFW	18.3	5.1	0.52	<0.2	63.9	0.59	0.25	0.13	1.20	0.4	0.37	<0.02	8.8
34256	X.4	FMS	CFX	31.6	5.6	0.47	<0.2	58.4	0.04	0.19	0.09	1.04	0.7	0.65	<0.04	2.3
34255	X.1	FSC	CFX	15.4	3.4	0.27	<0.2	69.1	0.04	0.14	<0.05	0.52	0.5	0.33	<0.02	10.5
34257	X.5	MS	CFX	66.6	13.3	3.27	<0.2	8.2	0.06	0.60	0.62	2.52	0.1	0.20	<0.02	3.2
34258	X.6	S	CFX	44.9	11.6	1.02	<0.2	30.1	0.15	0.58	0.22	3.04	0.5	0.55	0.04	7.0
34322	Y.3	BF	CFY	20.9	3.3	0.24	<0.2	63.9	0.11	0.11	0.05	0.64	0.2	0.45	0.03	9.8
34321	Y.1	FSC	CFY	14.6	4.3	0.32	<0.2	67.4	0.27	0.15	0.06	0.91	0.2	0.78	0.02	11.2
34323	Y.4	G	CFY	68.9	9.3	0.41	<0.2	12.8	0.07	0.33	0.62	1.22	0.3	0.46	0.03	4.3
34324	Y.6	S	CFY	26.3	10.9	0.47	<0.2	50.8	0.16	0.47	1.61	0.47	0.2	0.42	0.08	8.8
33877	CFZ-5	FMS	CFZ	24.9	2.2	0.00	0.5	64.0	0.68	0.11	<0.05	0.68	0.2	0.55	0.04	6.8
33878	CFZ-6	S	CFZ	66.3	15.3	1.40	<0.2	6.7	0.04	0.69	0.37	3.61	<0.1	0.13	<0.02	3.8
33875	CFZ-3	SF	CFZ	35.3	6.6	0.62	<0.2	47.4	0.42	0.27	0.13	1.78	0.2	0.29	0.10	7.4
33876	CFZ-4	SF	CFZ	28.3	3.6	0.34	<0.2	57.6	0.95	0.14	0.07	1.01	0.2	0.19	0.09	6.5
33879	CFZ-8	SF	CFZ	19.6	5.4	0.35	<0.2	63.8	1.23	0.25	0.13	1.31	0.3	0.25	0.04	7.4
33974	CFZ-10	TER	CFZ	52.8	20.4	0.74	0.2	9.8	0.07	0.89	0.29	3.09	0.1	0.34	<0.02	10.3
30093	T0G1A	FCE	CF1	30.4	9.8	0.33	<0.2	48.1	0.28	0.27	0.11	0.98	0.2	.	.	9.5
30094	T0G1B	FCE	CF1	16.5	3.6	0.26	<0.2	67.3	0.57	0.15	0.07	0.78	0.2	.	.	9.3
30095	T0G2	FCE	CF1	5.6	5.3	0.31	0.2	80.4	0.47	0.09	0.08	0.93	0.3	.	.	5.8
27179	PAG23	FSC	CF1	18.6	19.8	0.02	<0.2	51.1	0.03	1.15	<0.05	<0.05	0.4	.	.	10.0
34264	11.2	BF	CF11	17.9	4.8	0.55	<0.2	64.6	0.59	0.12	<0.05	1.27	0.6	0.16	<0.02	9.6
34263	11.1	FMS	CF11	22.2	1.3	0.20	<0.2	66.1	0.30	0.08	<0.05	0.27	0.5	0.14	<0.02	9.0
34265	11.3	S	CF11	65.1	17.8	1.92	<0.2	2.6	0.05	0.57	0.21	6.15	0.2	0.36	<0.02	3.6
34266	11.4	S	CF11	58.1	23.5	1.68	<0.2	4.2	0.02	0.68	0.20	7.67	0.1	0.32	<0.02	4.1

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34254	30	199	234	120	85	180	1021	45	8.5	91	8	15	17	<10	1.6	0.2	<.1
34252	37	416	65	47	11	41	342	35	7.1	103	8	10	<3	<10	<1.0	0.3	<.1
34253	12	275	109	254	123	43	697	17	14.5	85	6	28	10	24	<1.		

N*Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
34207	124.5	FSC	CF124	12.8	1.1	0.24	<0.2	74.8	0.09	0.03	<.05	0.22	0.2	0.12	0.07	10.0
34208	124.6	FSC	CF124	7.2	6.2	0.60	<0.2	69.2	0.09	0.14	0.05	1.04	0.7	0.44	0.08	13.2
34205	124.1	S	CF124	53.6	21.4	1.88	<0.2	9.9	0.03	0.77	0.24	6.88	0.2	0.63	<.02	5.1
34206	124.3	S	CF124	61.6	16.9	1.57	<0.2	9.2	0.06	0.65	0.19	5.46	0.1	0.33	0.02	4.2
31776	PTOG68.2	BF	CF15	54.9	8.8	0.56	<0.2	27.3	0.08	0.29	0.16	2.51	0.2	.	.	4.9
31375	TOG.40	FCE	CF14	16.8	2.3	0.22	<0.2	69.7	0.88	0.11	<.05	0.50	0.3	.	.	8.4
27887	CF15F4.1	BF	CF15	69.3	2.6	0.15	<0.2	24.0	<0.01	0.08	<.05	0.56	<0.1	.	.	3.5
27889	CF15F5.1	BF	CF15	57.6	8.5	0.55	<0.2	26.8	0.01	0.32	0.10	1.87	0.5	.	.	3.3
27886	CF15F3.2	FMS	CF15	10.6	3.6	0.21	<0.2	71.7	0.06	0.14	<.05	0.80	0.4	.	.	10.9
27890	CF15F5.3	FMS	CF15	8.3	5.4	0.20	<0.2	73.2	0.24	0.07	<.05	0.70	0.6	.	.	10.6
27888	CF15F4.2	FSC	CF15	16.7	2.7	0.15	<0.2	68.6	0.03	0.09	<.05	0.51	0.4	.	.	9.4
27891	CF15F6.1	S	CF15	56.0	26.7	1.38	<0.2	5.2	0.02	1.20	0.41	6.76	<0.1	.	.	1.7
27884	CF15F2.1	SF	CF15	34.6	7.8	0.40	<0.2	47.8	0.02	0.32	0.11	2.00	0.3	.	.	6.6
27885	CF15F3.1	SF	CF15	19.7	7.6	0.51	<0.2	60.3	0.02	0.35	0.11	1.91	0.1	.	.	8.1
31374	TOG.39	SFC	CF15	8.3	4.6	0.19	<0.2	74.2	0.10	0.12	0.06	0.66	0.4	.	.	12.1
34631	16.2	FMS	CF16	33.1	4.1	0.50	<0.2	52.0	0.49	0.23	0.06	1.35	0.2	.	.	7.2
34632	16.10	FMS	CF16	10.6	6.0	0.54	<0.2	70.3	0.02	0.16	0.11	1.89	<0.1	.	.	9.8
28960	CF17F4.5	BF	CF17	68.6	4.1	0.33	<0.2	22.4	0.02	0.38	<.05	1.16	0.4	.	.	3.3
28961	CF17F4.7	FSC	CF17	22.1	10.7	1.26	<0.2	52.7	0.40	0.17	<.05	1.20	0.4	.	.	8.1
28962	CF17F2.5	SF	CF17	44.5	9.0	0.80	<0.2	37.3	0.01	0.29	0.12	2.52	0.5	.	.	4.3
28963	CF17F2.2	SF	CF17	19.7	8.8	0.54	<0.2	58.0	0.04	0.29	0.15	2.21	1.1	.	.	9.2
28964	CF2F2.1	BF	CF2	21.0	3.3	0.24	<0.2	67.8	0.36	0.16	0.07	0.67	0.3	.	.	6.4
28968	CF2F8.2	BF	CF2	8.5	3.1	0.46	<0.2	75.0	2.50	0.18	0.07	0.79	0.6	.	.	8.4
31363	TOG.7	FCE	CF2	20.5	8.1	0.73	0.4	56.7	0.35	0.36	0.12	2.12	0.6	.	.	9.7
27892	CF25.2	FMS	CF2	47.6	2.6	0.29	0.8	43.4	0.10	0.10	<.05	0.59	0.9	.	.	2.0

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu	
34207	1	324	26	27	10	24	141	39	1.8	16	2	8	5	<10	<1.0	<0.1	<.1	
34208	10	1329	114	106	38	62	350	403	13.5	66	9	20	26	37	<1.0	1.2	<.1	
34205	14	5074	109	24	10	126	38	58	18.9	250	13	11	56	93	<1.0	1.2	<.1	
34206	14	4194	88	46	13	101	25	75	15.2	218	11	12	45	87	<1.0	1.2	<.1	
31776	11	970	71	205	122	59	1767	20	11.5	146	7	39	16	47	<1.0	3.5	0.8	
31375	6	1088	38	394	377	26	1321	15	4.9	50	8	26	5	28	<1.0	1.4	0.7	
27887	12	259	19	22	17	16	276	20	9.1	29	.	33	17	26	<2.0	2.2	<.1	
27889	58	1301	42	7	11	50	48	222	10.9	120	.	19	87	80	<2.0	0.8	<.1	
27886	68	396	54	50	24	30	678	27	31.9	72	.	129	33	55	2.2	1.2	<.1	
27890	11	440	41	54	32	20	551	63	24.9	40	.	108	12	32	2.2	9.2	<.1	
27888	13	367	64	38	22	27	413	56	17.4	67	.	98	16	32	<2.0	5.0	<.1	
27891	36	1894	135	5	<5	99	37	19	18.9	428	.	60	177	295	2.3	4.7	<.1	
27884	17	428	38	81	23	47	473	25	9.0	91	.	24	19	35	<2.0	0.9	<.1	
27885	9	813	42	53	22	57	309	29	10.2	121	.	28	55	108	<2.0	1.7	<.1	
31374	35	262	95	61	29	47	701	61	48.6	81	.	8	122	17	33	<1.0	13.1	1.3
34631	6	1590	46	222	166	50	1533	40	13.0	71	8	29	12	24	<1.0	4.4	0.8	
34632	4	1584	33	152	65	38	1992	33	4.2	43	10	8	9	14	<1.0	1.4	<.1	
28960	10	733	58	16	8	28	144	22	7.7	44	<5	9	82	49	3.9	1.2	0.3	
28961	3	7729	41	55	26	76	459	53	11.9	99	11	28	21	37	4.5	2.5	<.1	
28962	6	2879	119	13	<5	57	94	38	7.0	83	10	9	19	17	3.8	1.1	<.1	
28963	18	374	71	31	15	41	124	61	8.1	70	11	53	62	77	3.3	5.0	0.2	
28964	4	365	46	71	77	31	580	28	14.4	90	8	60	18	49	2.2	7.1	0.5	
28968	9	253	41	54	81	27	161	5	6.3	96	8	29	17	21	<2.0	1.1	0.5	
31363	19	755	68	158	157	55	370	123	9.9	127	11	95	66	96	1.8	6.5	0.6	
27892	27	1856	29	78	22	25	83	20	2.8	37	.	7	11	20	<2.0	<0.1	<.1	

N*Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
27893	CF25.5	FMS	CF2	4.3	3.4	0.16	<0.2	74.9	2.81	0.05	<.05	0.18	1.1	.	.	10.8
28965	CF2F3.2	FMS	CF2	25.4	7.5	0.84	<0.2	54.8	0.02	0.32	0.10	1.91	0.2	.	.	8.3
28969	CF2F9.1	FMS	CF2	10.7	4.0	0.24	<0.2	76.4	1.00	0.14	0.07	0.53	0.4	.	.	6.4
31821	TOG.6	FMS	CF2	30.5	2.0	0.18	<0.2	54.6	1.30	0.10	<.05	0.45	1.0	.	.	8.2
28967	CF2F7.3	FSC	CF2	12.4	4.4	0.37	<0.2	72.2	0.98	0.16	0.09	0.92	0.3	.	.	8.1
33816	TOG15A	MD	CF2	87.7	6.5	0.38	<0.2	0.5	<0.01	0.04	<.05	3.25	<0.1	0.05	<.02	0.7
33817	TOG15B	MD	CF2	79.2	11.2	0.89	<0.2	0.8	<0.01	0.34	<.05	5.72	0.1	0.32	<.02	1.8
28966	CF2F6.1	S	CF2	65.2	20.3	2.00	<0.2	1.1	<0.01	0.98	0.24	6.50	0.1	.	.	4.3
33869	CF21-8	BF	CF21	31.3	1.3	0.07	<0.2	56.3	0.05	<.02	0.09	0.17	1.6	0.09	<.02	7.8
33866	CF21-2	FMS	CF21	5.4	2.0	0.20	<0.2	77.7	0.02	<.02	0.11	0.49	2.1	0.03	<.02	10.2
27881	AB695	PH	CF21	3.2	17.9	0.02	0.3	48.9	0.02	<.02	<.05	0.08	13.0	.	.	13.9
27896	UN.1	PH	CF21	26.2	15.8	0.69	<0.2	32.6	<0.01	0.56	<.05	1.11	11.6	.	.	7.0
27897	US.6	PH	CF21	61.0	23.2	1.71	<0.2	3.1	<0.01	0.64	0.07	6.88	0.1	.	.	1.6
27898	US.7	PH	CF21	49.5	7.0	0.42	<0.2	35.3	<0.01	0.28	<.05	1.14	1.2	.	.	3.5
27899	US.8	PH	CF21	64.4	0.8	0.06	<0.2	32.0	<0.01	0.05	<.05	0.12	<0.1	.	.	3.1
33818	TOG20	PH	CF21	68.1	7.5	0.22	<0.2	14.3	<0.01	0.08	<.05	0.54	5.3	0.08	0.08	4.2
33819	TOG22A	PH	CF21	66.1	10.1	0.66	0.2	11.4	<0.01	0.15	<.05	2.17	2.6	0.18	0.02	4.1
33820	TOG22B	PH	CF21	59.4	4.6	0.30	<0.2	22.4	<0.01	0.22	<.05	1.08	2.1	0.10	0.09	6.6
33821	TOG23A	PH	CF21	10.8	19.7	0.06	1.6	38.5	<0.01	<.02	<.05	0.14	13.6	0.21	0.46	14.6
33822	TOG23B	PH	CF21	41.2	19.4	0.20	<0.2	9.8	<0.01	0.05	<.05	0.50	11.5	0.23	0.36	10.6
33868	CF21-4	PH	CF21	40.0	19.3	0.26	<0.2	8.8	<0.01	0.04	0.11	0.71	15.5	0.31	<.02	11.2
35561	BL-20	PH	CF21	5.0	30.3	0.15	0.6	1.1	<0.01	0.24	<.05	0.61	17.5	0.10	1.68	16.4
33867	CF21-3	SF	CF21	5.6	4.7	0.28	0.3	73.8	0.02	0.10	0.11	0.82	2.9	0.32	<.02	10.7
28925	CF32735	BF	CF3	19.4	5.1	0.41	<0.2	62.5	0.76	0.21	<.05	1.27	0.1	.	.	9.0
28950	3F271395	BF	CF3	8.3	9.3	0.05	<0.2	66.1	3.13	0.05	<.05	0.07	0.6	.	.	12.3

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
27893	17	4421	24	220	254	17	871	47	5.5	27	.	56	11	46	<2.0	2.1	<.1
28965	9	5408	76	32	15	73	57	144	3.6	135	9	9	17	25	3.7	1.3	0.5
28969	8	768	69	89	86	32	264	9	10.9	80	7	49	26	42	3.4	3.3	0.5
31821	9	1960	33	77	50	25	145	41	4.3	38	7	8	9	19	<1.0	1.1	0.6
28967	7	1															

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
28959	CF3.N.N	BF	CF3	14.3	3.5	0.58	<0.2	59.1	1.57	0.15	<.05	0.90	0.3			19.3
29616	SP45	BF	CF3	11.2	7.4	0.44	<0.2	59.9	0.32	0.20	0.07	1.43	0.3			8.1
29626	SP55	BF	CF3	5.3	1.8	0.18	<0.2	78.3	0.15	0.07	0.05	0.40	0.4			11.2
34730	G2 6.5	BF	CF3	10.9	6.0	0.20	<0.2	55.9	16.61	<.02	0.07	0.34	1.6			11.0
34745	G3 8.00	BF	CF3	12.4	6.0	0.22	<0.2	64.9	2.04	0.14	0.10	1.33	0.7			11.6
34746	G3 9.00	BF	CF3	5.7	1.1	0.03	<0.2	81.0	0.22	0.04	0.07	0.32	0.3			10.6
28926	CF327130	FCE	CF3	1.9	2.3	0.05	<0.2	82.7	0.97	0.06	<.05	<.05	<.05			10.6
28928	CF327370	FCE	CF3	1.8	2.5	0.05	<0.2	82.9	0.76	0.02	<.05	<.05	<.05			10.6
28929	CF327520	FCE	CF3	7.4	3.2	0.20	<0.2	73.8	2.98	0.09	<.05	0.65	0.5			10.7
28953	F3F41305	FCE	CF3	5.4	3.3	0.26	<0.2	76.1	0.10	0.09	<.05	0.65	0.4			11.8
28958	CF3F286	FCE	CF3	6.7	3.3	0.09	<0.2	76.1	0.03	0.05	<.05	0.26	0.2			12.8
31782	F41020	FCE	CF3	8.6	3.5	0.13	<0.2	73.6	0.04	0.07	<.05	0.30	0.1			12.0
31786	F4183035	FCE	CF3	5.3	2.3	0.13	<0.2	79.1	0.20	0.09	<.05	0.30	0.1			10.9
33812	TOG13-1	FCE	CF3	13.4	1.9	0.00	<0.2	71.7	0.22	<.02	<.05	0.36	0.6	0.14	<.02	10.1
33813	TOG13-2	FCE	CF3	19.6	2.6	0.24	<0.2	69.7	0.18	<.02	<.05	0.34	0.3	0.06	0.14	6.5
33814	TOG13-3	FCE	CF3	12.8	1.4	0.13	<0.2	75.7	0.10	<.02	<.05	0.34	0.4	0.09	0.06	8.9
33815	TOG13-4	FCE	CF3	14.5	1.8	0.18	<0.2	73.6	0.15	<.02	<.05	0.46	0.3	0.08	0.08	8.1
28930	CF327670	FMS	CF3	6.1	4.7	0.13	<0.2	72.9	0.96	0.07	<.05	0.31	0.6			11.5
28947	CF327965	FMS	CF3	2.5	4.1	0.05	<0.2	76.3	1.90	0.05	<.05	<.05	<.05			11.9
28949	3F271235	FMS	CF3	3.3	3.3	0.09	<0.2	72.5	5.20	0.05	<.05	0.19	0.5			12.0
28952	CF3F4970	FMS	CF3	4.9	3.4	0.15	<0.2	78.7	1.66	0.08	<.05	0.35	0.5			7.3
28956	CF3F3.1	FMS	CF3	13.0	4.1	0.35	<0.2	69.6	0.04	0.15	0.07	1.1	0.3			10.9
31368	TOG.27	FMS	CF3	2.1	1.7	0.04	<0.2	82.5	1.62	0.06	<.05	<.05	<.05			11.4
31781	F4620	FMS	CF3	18.9	7.5	0.12	<0.2	62.3	0.06	0.07	<.05	<.05	0.3			10.5
31783	F41140	FMS	CF3	2.6	2.6	0.03	<0.2	80.9	0.03	0.06	<.05	<.05	0.2			12.6

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
28959	55	2011	37	198	146	26	14357	2	7.1	85	<5	48	47	97	6.3	4.6	0.4
29616	5	1315	44	243	88	31	9119	23	8.8	73	10	200	14	<10	2.8	18.6	1.0
29626	1	740	24	417	62	18	3251	21	10.9	44	8	95	10	<2.0	6.9	<0.5	<.1
34730	57	25900	49	207	415	52	3466	53	15.1	34	3	133	68	157	1.0	8.6	<.1
34745	16	7637	120	78	48	44	1651	145	11.7	63	8	116	58	81	2.3	11.7	0.2
34746	5	924	38	87	32	16	658	48	3.5	53	3	34	18	43	<1.0	2.9	<.1
28926	5	1251	93	291	100	26	3130	28	5.0	33	3	116	<5	22	2.1	11.2	0.6
28928	9	677	58	299	77	16	3632	32	3.5	32	5	62	5	31	<2.0	22.0	1.9
28929	9	5087	45	379	195	24	3353	33	4.6	97	7	153	5	44	3.0	4.5	<.1
28953	1	2411	37	93	103	28	16583	71	5.2	45	6	33	9	11	5.4	4.4	1.7
28958	6	432	36	94	33	19	6223	71	6.3	35	<5	176	14	44	1.1	5.3	0.9
31782	1	707	31	274	38	20	10759	63	5.4	30	7	25	6	6	<1.0	5.7	1.4
31786	2	233	28	113	66	15	8243	27	4.9	30	7	35	6	24	<1.0	4.7	0.9
33812	8	798	125	111	72	30	9549	24	6.7	58	11	123	23	42	2.5	10.3	0.7
33813	6	1171	61	80	66	31	8457	17	3.9	76	11	28	20	31	<2.0	2.4	<.1
33814	5	561	56	113	72	26	8266	8	6.9	57	9	68	15	35	4.3	6.8	0.9
33815	4	5.5	65	113	74	29	7816	9	7.2	72	7	69	8	36	1.7	6.8	1.0
28930	16	1603	67	447	108	41	3229	67	4.8	47	6	67	12	49	2.0	9.1	0.7
28947	9	2988	31	476	148	20	3468	72	4.2	33	6	137	22	47	5.2	17.4	2.3
28949	18	8493	23	480	328	19	3834	69	4.2	33	6	108	21	58	8.2	9.9	1.3
28952	7	1267	36	269	141	20	15131	14	11.8	42	6	500	70	163	17.7	39.0	2.9
28956	33	1359	58	40	22	29	10313	4	4.1	13	7	154	<3	27	<1.0	25.5	1.9
31368	13	2051	41	487	119	14	3736	31	4.7	27	3	20	12	25	<1.0	4.4	0.7
31781	5	645	45	61	23	35	2227	56	24.7	27	3	20	12	25	<1.0	4.4	0.7
31783	1	68	26	958	23	83	2391	81	8.4	25	5	7	4	<10	<1.0	1.9	0.8

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p. feu
31785	F41500	FMS	CF3	29.3	10.9	0.45	<0.2	48.3	0.11	0.18	<.05	1.22	0.4			9.6
34717	G1 2.4	FMS	CF3	48.7	6.4	0.13	<0.2	35.2	<0.01	<.02	0.06	0.41	0.6			8.1
34727	G2 5.0	FMS	CF3	12.4	5.1	0.41	<0.2	70.1	0.20	0.12	0.08	0.66	0.3			10.6
34731	G2 7.0	FMS	CF3	42.1	5.7	0.65	<0.2	33.3	6.20	0.15	0.09	1.54	0.3			6.9
34732	G2 7.5	FMS	CF3	20.5	0.8	0.18	<0.2	68.5	0.47	<.02	0.05	0.25	0.3			9.9
34733	G2 9.0	FMS	CF3	15.7	6.0	0.65	<0.2	63.4	0.66	0.18	0.10	1.58	0.5			9.8
34734	G2 10.0	FMS	CF3	10.9	0.5	0.14	<0.2	74.8	0.10	<.02	0.07	0.18	0.9			10.2
34738	G3 0.50	FMS	CF3	11.3	5.2	0.31	<0.2	68.3	0.68	0.08	0.07	0.93	0.1			9.1
34739	G3 1.00	FMS	CF3	5.2	4.9	0.17	<0.2	80.4	0.14	0.06	0.09	0.47	0.1			6.3
34740	G3 2.50	FMS	CF3	3.5	1.4	0.03	<0.2	80.6	0.04	<.02	0.07	0.06	0.2			12.9
34741	G3 3.50	FMS	CF3	9.8	5.9	0.05	<0.2	78.6	0.13	<.02	0.07	0.13	0.2			8.3
34743	G3 6.00	FMS	CF3	9.8	3.5	0.17	<0.2	75.2	1.26	<.02	0.06	0.24	0.4			10.8
34744	G3 7.00	FMS	CF3	3.3	1.1	0.34	<0.2	85.1	0.21	<.02	0.08	0.35	0.2			9.2
34747	G3 10.0	FMS	CF3	3.3	1.0	0.28	<0.2	85.3	0.80	0.04	0.06	0.15	0.2			8.2
28931	CF327765	FSC	CF3	3.3	1.7	0.06	<0.2	77.6	2.67	0.05	<.05	0.12	0.5			11.6
28948	3F271200	FSC	CF3	19.0	18.1	0.06	<0.2	49.3	1.05	0.04	<.05	0.08	0.4			11.4
28951	3F271700	FSC	CF3	5.1	3.9	0.09	<0.2	78.3	0.12	0.07	<.05	0.19	0.6			11.6
28954	F3F41830	FSC	CF3	8.7	5.1	0.24	<0.2	73.5	0.15	0.10	<.05	0.65	0.5			10.0
31784	F41190	FSC	CF3	11.8	7.7	0.38	<0.2	66.7	0.03	0.18	0.06	1.08	0.5			11.3
34728	G2 5.5	FSC	CF3	3.9	0.9	0.11	<0.2	78.2	2.84	<.02	0.07	0.14	0.6			11.7
34729	G2 6.0	FSC	CF3	20.4	3.2	0.45	<0.2	60.7	2.11	0.04	0.09	1.00	0.7			9.5
34736	G2 12.0	FSC	CF3	17.9	1.5	0.22	<0.2	70.4	0.06	<.02	0.07	0.43	0.4			9.6
34742	G3 5.00	FSC	CF3	6.9	1.2	0.18	<0.2	76.5	1.06	<.02	0.07	0.18	0.2			11.9
29623	SP52	G	CF3	97.6	0.6	<0.02	<0.2	0.9	0.02	0.08	<.05	0.05	<0.1			<0.0
29627	SP56	G	CF3	97.7	0.4	<0.02	<0.2	0.8	0.01	0.04	<.05	<.05	<0.1			0.0

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
31785	3	3489	46	51	46	41	2337	48	10.8	51	8	25	12	52	1.1	3.6	0.8
34717	232	1706	103	20	12	123	267	79	43.9	25	6	26	79	104	7.2	2.1	0.8
34727	6	1333	57	93	29	47	1107	98	14.7	72	3	41	16	20	<1.0	4.8	<.1
34731	45	9500	60	82	105	48	1355	34	10.1	62	2	37	69	81	<1.0	3.0	0.1
34732	5	1118	33	152	48	47	1525	27	4.7	65	<2	45	3	12	<1.0	1.0</	

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p.feu
34718	G1 4. 0	G	CF3	98.5	0.6	0.03	<0.2	0.9	0.02	<.02	<.05	0.08	<0.1	.	.	0.4
29619	SP48	MD	CF3	9.2	0.4	20.93	26.8	2.1	0.11	0.04	<.05	<.05	<0.1	.	.	40.5
29622	SP51	MS	CF3	63.9	17.3	1.13	<0.2	6.5	0.06	0.99	0.27	4.85	<0.1	.	.	5.0
29625	SP54	MS	CF3	46.7	30.0	1.34	<0.2	6.3	0.07	0.93	0.64	8.04	0.2	.	.	6.3
34719	G1 5.0	MS	CF3	49.8	26.5	2.38	<0.2	4.7	<0.01	1.12	0.44	9.35	0.1	.	.	4.8
34720	G1 5.3	MS	CF3	64.5	18.9	1.69	<0.2	2.1	<0.01	0.81	0.29	6.38	<0.1	.	.	3.3
34721	G1 6.2	MS	CF3	66.3	18.1	1.58	<0.2	2.1	<0.01	0.75	0.31	6.10	<0.1	.	.	3.1
34735	G2 11.0	MS	CF3	68.1	16.5	1.68	<0.2	2.0	<0.01	0.60	0.21	5.75	<0.1	.	.	3.0
28957	CF3F10.1	S	CF3	65.4	19.0	1.79	<0.2	3.1	<0.01	0.92	0.25	6.30	<0.1	.	.	3.4
29617	SP46	S	CF3	64.4	19.5	1.88	<0.2	0.9	0.02	0.89	0.25	6.54	<0.1	.	.	3.9
29618	SP47	S	CF3	45.9	11.9	7.03	8.7	7.1	0.09	0.51	0.12	3.64	0.3	.	.	14.4
29620	SP49	S	CF3	61.2	18.5	1.82	<0.2	5.8	0.05	0.69	0.33	5.09	<0.1	.	.	7.1
29621	SP50	S	CF3	55.5	17.7	1.01	0.3	10.6	0.09	0.69	0.35	4.87	0.2	.	.	9.0
29624	SP53	S	CF3	59.2	18.0	1.54	0.5	7.9	0.21	0.83	0.28	5.55	0.2	.	.	6.3
29628	SP57	S	CF3	46.9	27.9	1.28	0.3	6.1	0.04	1.54	0.42	8.87	0.1	.	.	6.3
29629	SP58	S	CF3	43.3	28.6	1.14	<0.2	1.9	0.02	1.45	0.61	8.32	0.1	.	.	14.7
29630	SP59	S	CF3	46.6	29.2	1.29	<0.2	5.5	0.04	1.63	0.38	9.34	0.2	.	.	5.8
29631	SP60	S	CF3	52.7	25.5	1.35	<0.2	6.1	0.05	1.27	0.33	7.97	0.2	.	.	5.2
29632	SP61	S	CF3	50.2	23.9	1.70	<0.2	9.1	0.11	1.06	0.30	7.15	0.2	.	.	6.5
31369	TOG.28	S	CF3	72.7	16.1	1.63	<0.2	1.0	<0.01	0.61	0.17	5.10	<0.1	.	.	2.8
34726	G2 4. 5	S	CF3	86.8	4.8	0.44	<0.2	3.6	0.05	0.15	<.05	1.38	<0.1	.	.	1.7
34737	G2 12.5	S	CF3	61.6	21.3	2.25	<0.2	0.6	<0.01	0.78	0.29	7.36	<0.1	.	.	3.8
28927	CF327250	SF	CF3	5.6	5.1	0.13	<0.2	74.3	1.27	0.09	<.05	0.28	0.2	.	.	10.7
31787	F420201	SF	CF3	9.6	5.1	0.30	<0.2	72.3	0.04	0.14	0.05	1.08	0.1	.	.	9.7
31788	F420202	SF	CF3	20.5	10.4	0.63	<0.2	55.3	0.03	0.21	0.08	2.09	0.1	.	.	10.7

N°Labo	Sr	Ba	V	N1	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34718	2	135	5	<1	<5	5	20	8	1.4	7	3	3	6	<10	<1.0	0.5	0.6
29619	68	27	13	32	17	8	2	6	0.5	4	<5	4	<5	<10	<2.0	0.2	0.5
29622	49	250	107	38	27	74	24	25	16.6	159	11	32	45	140	<2.0	2.8	<1
29625	101	502	156	26	14	123	35	28	20.4	268	20	19	57	149	<2.0	2.0	<1
34719	18	8422	163	29	7	170	407	43	20.7	227	23	13	51	97	<1.0	2.1	0.8
34720	13	2968	126	10	<5	114	62	23	19.5	165	15	30	39	72	<1.0	3.3	1.1
34721	17	2061	115	11	6	104	23	20	17.2	154	14	25	47	84	<1.0	2.9	0.8
34735	4	4693	99	100	10	105	134	9	12.5	109	7	6	28	61	<1.0	1.3	0.5
28957	16	713	105	24	6	95	46	19	15.5	260	14	19	52	73	3.9	2.7	0.4
29617	14	3630	126	45	16	123	168	8	19.3	206	22	17	38	132	<2.0	3.4	0.5
29618	37	3834	95	76	37	59	19	20	7.8	108	12	8	26	53	<2.0	0.6	0.2
29620	45	486	91	37	22	79	38	27	16.2	112	11	22	30	70	2.0	1.6	<1
29621	55	412	106	35	22	90	35	20	15.1	198	11	19	42	107	<2.0	1.1	<1
29624	68	326	130	48	32	81	12	31	16.5	173	14	34	34	74	<2.0	3.4	<1
29628	70	594	175	38	62	117	48	33	28.1	240	27	48	64	161	<2.0	4.7	<1
29629	96	906	182	1	10	204	31	11	23.0	359	30	30	84	198	<2.0	2.0	<1
29630	76	676	184	14	16	122	18	18	28.0	253	29	49	97	188	<2.0	4.8	<1
29631	59	504	156	33	11	101	11	18	23.4	197	22	45	79	163	<2.0	4.2	<1
29632	64	459	143	56	23	89	28	43	22.2	220	26	50	73	174	2.1	4.5	0.3
31369	7	7319	104	10	7	89	41	18	9.3	176	11	6	24	63	<1.0	1.8	0.4
34726	3	1888	32	34	11	28	148	21	5.2	38	<2	8	<3	12	<1.0	0.8	<1
34737	7	5078	118	18	6	127	20	7	16.6	137	11	4	58	107	<1.0	1.2	0.5
28927	9	1862	48	228	87	20	3193	44	9.5	40	<5	123	9	45	2.1	14.2	1.2
31787	1	595	40	69	27	29	6505	39	12.4	50	8	15	4	13	<1.0	3.4	0.9
31788	3	846	67	51	24	48	2656	69	21.9	63	8	17	7	18	<1.0	3.4	0.8

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na20	K20	P205	C	S	p.feu
34715	G1 1.0	SF	CF3	46.0	12.9	0.92	<0.2	26.9	0.02	0.28	0.14	2.88	0.2	.	.	7.7
34716	G1 1.5	SF	CF3	31.2	13.3	0.66	<0.2	40.9	0.03	0.20	0.11	1.96	0.5	.	.	10.3
34722	G2 1.0	SF	CF3	24.1	10.4	0.73	<0.2	50.6	0.02	0.22	0.14	2.61	0.1	.	.	10.1
34723	G2 1.5	SF	CF3	30.7	16.1	1.53	<0.2	36.4	<0.01	0.54	0.24	4.96	0.1	.	.	9.0
34724	G2 2.5	SF	CF3	37.0	12.8	1.05	<0.2	36.6	0.09	0.30	0.17	3.52	0.2	.	.	8.3
34725	G2 3.0	SF	CF3	22.4	12.4	0.88	<0.2	52.3	0.04	0.31	0.16	3.06	0.2	.	.	8.4
34748	G3 11.0	SF	CF3	1.6	0.4	0.14	<0.2	84.1	0.12	<.02	0.07	0.16	0.4	.	.	12.5
28955	CF3F1.1	SIAL	CF3	45.2	38.6	0.03	<0.2	<0.1	0.02	0.02	<.05	<.05	0.3	.	.	14.8
31778	F4.395	SIAL	CF3	46.5	38.6	0.05	<0.2	0.4	0.02	0.05	<.05	0.08	0.2	.	.	14.3
31779	F4570	SIAL	CF3	47.9	33.7	0.06	<0.2	4.2	0.01	0.03	<.05	0.08	0.1	.	.	13.3
35551	3F1-1	SIAL	CF3	45.9	38.5	0.07	<0.2	0.4	0.02	<.02	<.05	<.05	0.1	0.04	0.02	14.9
35552	3F1-2	SIAL	CF3	45.2	37.4	0.05	<0.2	2.5	<0.01	0.05	<.05	<.05	0.1	0.01	<.02	14.6
35553	3F1-4	SIAL	CF3	46.6	38.9	0.08	<0.2	0.2	<0.01	0.04	<.05	0.12	0.3	0.01	<.02	14.6
35554	3F7-3	SIAL	CF3	40.6	36.1	0.03	<0.2	8.7	<0.01	<.02	<.05	<.05	0.2	0.08	<.02	14.7
35555	3F7-4	SIAL	CF3	41.9	37.1	0.03	<0.2	3.5	<0.01	<.02	<.05	0.08	0.6	0.09	<.02	15.1
35556	3F7-5	SIAL	CF3	37.5	36.0	0.04	<0.2	5.9	<0.01	<.02	0.05	0.05	1.8	0.08	0.17	15.8
35557	3F7-6	SIAL	CF3	44.1	37.4	0.04	<0.2	3.4	<0.01	0.05	<.05	0.05	0.2	0.14	<.02	14.8
35558	3F7-7	SIAL	CF3	42.0	37.1	0.03	<0.2	4.4	<0.01	0.02	<.05	<.05	0.2	0.03	<.02	14.9
35559	3F17-2	SIAL	CF3	18.4	50.0	0.06	<0.2	2.1	0.01	0.04	<.05	0.11	0.3	<0.01	0.17	27.8
35560	3F21-2	SIAL	CF3	38.4	37.7	0.03	<0.2	0.7	<0.01	0.04	0.07	1.14	0.4	0.02	0.03	19.6
35562	3F17-3	SIAL	CF3	43.9	37.2	0.03	<0.2	<0.1	<0.01	<.02	<.05	<.05	0.1	0.24	<.02	17.0
33880	CF4-1	BF	CF4	48.2	7.9	0.80	<0.2	34.2	0.05	0.36	0.11	2.44	0.1	0.13	<.02	6.1
33881	CF4-3	FMS	CF4	30.8	6.8	0.50	<0.2	52.3	0.06	0.28	0.07	1.68	0.1	0.12	<.02	8.5
33882	CF4-5	FMS	CF4	27.2	4.2	0.71	<0.2	55.8	0.03	0.23	<.05	1.57	0.2	0.15	<.02	8.8
33883	CF4-7	FMS	CF4	20.8	2.4	0.30	<0.2	66.4	0.01	0.08	<.05	0.71	0.2	0.10	<.02	9.2

N°Labo	Sr	Ba	V	N1	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34715	33	5447	165	33	14	144	206	82	28.0	126	9	22	97	234	3.0	2.4	1.1
34716	136	6372	345	31	14	341	266	92	37.1	81	13	34	71	95	5.1	2.9	0.9
34722	4	822	82	22	15	101	2680	56	25.9	82	11	15	10	33	<1.0	2.8	0.5
34723	7	1507	95	22	11	97	1463	113	24.9	125	13	15	9	20	<1.0	2.6	0.5
34724	6</																

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	SiO2	Al2O3	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
33885	CF4-10	MS	CF4	65.9	17.5	0.71	<0.2	6.6	0.02	0.88	0.34	4.64	<0.1	0.08	<0.02	3.2
33884	CF4-8	MS	CF4	62.5	17.7	1.06	<0.2	6.6	0.27	0.80	0.24	5.74	<0.1	0.08	<0.02	3.5
33975	CF4-12	TER	CF4	67.2	13.8	0.85	<0.2	9.7	0.15	0.66	0.11	2.71	<0.1	1.12	<0.02	6.0
34580	5.3	BF	CF5	31.1	4.5	0.53	0.3	52.1	0.05	0.28	0.11	1.53	0.2	.	.	7.6
34581	5.4	FMS	CF5	36.0	9.4	0.88	<0.2	39.9	0.09	0.59	0.20	2.88	0.2	.	.	7.1
27176	CB20	MD	CF5	26.3	5.9	13.99	18.4	5.2	0.05	0.35	<0.5	1.92	0.1	.	.	28.8
27174	CB18	S	CF5	62.0	20.5	1.76	<0.2	4.8	0.05	0.53	0.13	6.49	0.3	.	.	3.9
27175	CB19	S	CF5	60.0	17.9	2.10	1.6	3.8	0.05	0.86	0.14	5.55	<0.1	.	.	5.0
27173	CB17	SF	CF5	23.7	2.9	0.32	<0.2	61.4	0.07	0.19	<0.05	0.89	0.5	.	.	8.9
34202	62.1	FMS	CF62	19.8	3.7	0.34	<0.2	64.3	1.69	0.17	<0.05	0.77	0.5	0.20	<0.02	8.0
34203	62.3	FMS	CF62	5.5	2.3	0.12	<0.2	76.1	2.47	0.07	<0.05	0.11	0.4	0.15	<0.02	11.7
34204	62.6	SF	CF62	36.3	6.5	0.61	<0.2	45.1	0.04	0.28	0.05	1.50	0.4	0.32	<0.02	8.4
27171	CB4	FSC	CF8	65.7	2.4	0.27	<0.2	29.1	0.16	0.16	<0.05	0.61	0.7	.	.	1.5
27172	CB6	FSC	CF8	33.1	2.5	0.30	<0.2	47.4	5.92	0.14	0.07	0.71	0.7	.	.	8.4
27170	CB2B	SF	CF8	11.0	3.9	0.40	<0.2	72.5	0.28	0.19	0.09	0.95	0.8	.	.	9.3
31371	TOG.32.B	FCE	CF81	37.9	<0.2	0.04	<0.2	56.7	0.19	0.02	<0.05	<0.05	0.1	.	.	5.3
30097	TOG32A	QF	CF81	76.7	0.3	0.03	<0.2	20.5	0.11	0.03	<0.05	<0.05	<0.1	.	.	0.4
33827	PTOG70A	SF	CF81	16.7	5.6	0.60	<0.2	64.2	2.70	0.20	<0.05	1.81	0.2	0.15	0.04	7.2
33828	PTOG70B	SF	CF81	33.4	7.5	0.85	<0.2	52.9	0.19	0.31	<0.05	2.53	0.3	0.19	0.04	2.0
31372	TOG.34	CS	COUPE C2	36.8	5.9	10.51	17.4	3.3	0.06	0.31	0.29	2.09	0.1	.	.	23.5
31373	TOG.37	CS	COUPE C2	70.1	11.8	3.06	<0.2	5.2	0.12	0.67	1.01	3.12	0.1	.	.	3.4
30098	TOG33C	MD	COUPE C2	27.2	9.2	1.69	29.7	4.2	0.04	0.33	0.58	1.78	0.2	.	.	25.1
27882	C7.5	FMS	COUPE C7	41.7	2.4	0.10	<0.2	47.3	0.01	0.16	<0.05	0.24	0.4	.	.	6.5
27883	C7.7	FMS	COUPE C7	42.5	0.6	<0.02	<0.2	50.3	0.03	<0.02	<0.05	<0.05	0.8	.	.	6.5
35143	E133	AMP	CP ROUTE	51.8	15.6	6.64	11.7	9.4	0.19	0.80	2.33	0.46	0.2	.	.	1.0

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
33885	42	774	98	33	18	77	580	11	17.7	216	14	40	36	100	<1.0	3.6	0.5
33884	21	1105	90	108	76	99	1475	34	15.5	168	14	49	56	146	<1.0	3.6	0.8
33975	32	1555	89	23	16	80	674	60	16.6	192	15	72	38	101	2.8	6.6	1.3
34580	4	456	58	545	162	37	9619	100	8.0	72	8	78	9	45	<1.0	10.2	0.9
34581	9	866	82	603	180	68	10079	264	19.1	113	11	62	15	39	<1.0	6.0	0.6
27176	141	923	41	<1	10	27	39	24	5.9	63	5	13	16	31	<2.0	0.8	0.2
27174	12	2412	94	19	8	106	348	37	14.7	85	9	32	38	68	<2.0	3.1	0.3
27175	24	11492	97	4	16	105	57	24	17.2	170	15	27	43	86	<2.0	2.5	0.3
27173	16	1047	41	250	129	53	12618	183	8.0	45	5	114	5	38	2.0	12.5	0.5
34202	12	3680	32	427	299	27	6162	687	5.3	39	3	115	17	54	<1.0	8.0	0.6
34203	3	4469	37	174	600	42	6469	2680	4.1	24	7	104	10	249	<1.0	7.0	0.5
34204	4	875	45	283	111	34	6079	269	4.6	63	8	69	9	29	<1.0	6.4	1.2
27171	14	181	22	102	20	19	399	36	2.3	30	4	15	5	25	<2.0	0.6	<1
27172	66	3269	36	383	641	64	2776	77	5.1	49	5	43	9	43	<2.0	2.7	<1
27170	16	346	88	273	155	76	3254	27	22.3	66	9	59	16	30	<2.0	4.3	<1
31371	5	31	38	160	75	20	1583	17	2.2	14	5	20	8	44	<1.0	1.4	0.5
30097	17	107	53	5	9	9	135	22	0.9	6	2	7	34	<1.0	<1.0	0.4	<1
33827	11	1829	114	59	66	44	1667	11	11.4	66	13	23	15	66	<1.0	1.1	<1
33828	16	2123	74	34	24	52	1302	14	7.4	87	13	17	19	60	<1.0	0.9	<1
31372	133	508	42	18	22	33	47	13	7.0	79	6	15	16	43	<1.0	1.7	0.5
31373	8	1037	89	55	24	53	64	64	14.3	161	14	23	24	70	<1.0	2.7	0.4
30098	584	270	42	7	9	45	47	18	6.1	72	3	15	29	46	<1.0	1.2	0.2
27882	10	102	42	44	27	13	542	24	7.1	40	.	33	26	28	<2.0	2.3	<1
27883	2	118	55	130	30	32	274	38	12.1	20	.	17	<10	21	<2.0	1.1	<1
35143	152	76	271	85	49	261	101	104	37.4	33	<2	16	<3	<10	<1.0	1.6	<1

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	SiO2	Al2O3	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
35140	E109	B	CP ROUTE	60.0	20.7	2.19	<0.2	3.3	0.04	0.96	0.19	6.97	0.2	.	.	3.9
35137	E102	CS	CP ROUTE	44.1	6.6	8.84	13.7	3.0	0.06	0.36	0.11	2.83	0.2	.	.	20.3
35139	E107	CS	CP ROUTE	72.8	10.4	1.26	0.7	3.3	0.05	0.59	2.72	2.03	0.2	.	.	4.5
35138	E106	MET	CP ROUTE	70.1	11.1	3.75	1.5	5.3	0.11	0.63	0.53	3.81	0.2	.	.	1.1
34570	D11	FCE	DIKPELE	8.9	3.1	0.31	<0.2	75.3	2.59	0.11	0.07	0.79	0.2	.	.	7.9
34571	D13	FMS	DIKPELE	2.9	1.8	0.06	<0.2	82.2	0.08	0.02	0.05	0.17	0.4	.	.	11.2
27178	AB669	FSC	DIKPELE	10.7	6.8	0.09	<0.2	70.1	2.74	0.23	<0.05	0.06	0.7	.	.	8.0
31370	TOG.29	MD	J-KOPE	37.9	7.8	11.38	13.8	4.2	0.08	0.46	0.27	2.48	0.2	.	.	21.6
33823	TOG29	MD	J-KOPE	37.5	8.0	10.79	13.9	3.9	0.08	0.41	0.30	2.52	0.2	5.57	<0.02	21.8
31229	KOUIDA2	H	KOUIDA	28.8	0.6	0.04	0.4	70.2	0.02	0.04	<0.05	0.25	0.3	.	.	0.1
34582	AB36	FMS	LABO	45.3	1.0	0.06	<0.2	45.1	0.05	0.07	<0.05	0.09	1.4	.	.	6.0
34583	AB42	FMS	LABO	17.1	2.7	0.16	<0.2	66.5	0.81	0.11	0.07	0.42	1.6	.	.	9.8
27177	AB657	FSC	LABO	61.9	0.8	0.05	<0.2	30.7	0.82	0.09	<0.05	0.12	0.2	.	.	4.2
31376	TOG.53	G	LABO	95.1	<0.2	0.11	<0.2	3.2	0.02	<0.02	<0.05	<0.05	<0.1	.	.	0.5
30107	TOG51	QF	LABO	78.2	0.3	0.05	<0.2	20.4	0.17	0.09	0.06	0.12	0.3	.	.	0.0
30108	TOG52	QF	LABO	90.9	<0.2	0.08	<0.2	7.6	0.04	<0.02	<0.05	0.08	<0.1	.	.	<0.0
30109	TOG54B	QF	LABO	59.3	0.2	<0.02	<0.2	39.8	0.05	0.11	0.06	<0.05	0.1	.	.	<0.2
30110	TOG54C	QF	LABO	1.4	0.7	0.06	<0.2	96.9	0.06	0.51	0.08	0.22	0.2	.	.	0.2
31777	PTOG78	B	LALAMILA	73.9	5.8	0.21	1.5	9.6	0.01	0.10	<0.05	0.44	3.99	.	.	3.9
30096	TOG24	H	LALAMILA	0.3	2.3	0.07	<0.2	94.7	0.04	0.07	<0.05	0.10	1.3	.	.	0.7
31774	LA1	H	LALAMILA	57.7	2.5	0.17	<0.2	31.1	0.03	0.13	<0.05	0.38	1.2	.	.	5.3
31819	LA.2	H	LALAMILA	37.4	11.8	0.13	<0.2	40.3	0.19	0.72	<0.05	0.18	0.3	.	.	7.9
31820	LA.3	H	LALAMILA	5.3	2.3	0.07	<0.2	88.8	0.03	0.26	<0.05	0.20	1.3	.	.	1.0
34586	LA1	H	LALAMILA	24.0	7.5	0.11	<0.2	58.6	0.04	0.38	<0.05	0.23	0.6	.	.	6.8
30541	J1.1	BF	OPOBLE	71.1	1.3	0.09	0.4	23.1	0.05	0.04	<0.05	0.15	0.4	.	.	3.5

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
35140	6	13368	114	24	14	120	45	9	12.1	307	14	6	19	46	<1.0	1.0	0.1
35137	95	742	56	10	16	33	37	25	8.5	76	5	16	12	26	<1.0	1.4	0.4
35139	74	300	65	28	21	55	55	17	8.2	293	7	20	30	71	1.1	1.8	0.6
35138	18	1144	84	29	17	57	63	16	13.0	150	10	35	33	58	3.9	2.8	0.6
34570	6	109	54	196	91	34	810	24	11.								

N*Labo	N*Ech.	Facies	Site	S102	Al203	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
30543	J1.3	BF	OPOBLE	16.8	3.5	0.24	0.2	69.4	0.04	0.10	<.05	0.54	1.0	.	.	6.5
30549	J2.1	BF	OPOBLE	15.8	6.0	0.50	<.2	64.3	1.10	0.22	0.05	1.58	0.9	.	.	9.8
30559	J4.1	BF	OPOBLE	28.6	9.8	0.62	0.2	47.3	1.62	0.41	0.09	1.41	0.4	.	.	9.8
34660	Z49	BF	OPOBLE	22.2	3.9	0.38	<.2	63.0	0.27	0.13	0.05	1.00	0.8	.	.	9.1
34664	Z58	BF	OPOBLE	3.3	0.6	0.05	<.2	93.0	0.30	0.05	<.05	0.16	<.1	.	.	2.1
34713	Z90	BF	OPOBLE	13.9	1.9	0.28	<.2	76.6	0.08	0.04	0.08	0.80	0.2	.	.	5.9
33824	TOG30	FCE	OPOBLE	8.9	3.1	0.25	<.2	72.4	2.63	0.10	0.05	0.54	0.5	0.12	0.04	9.8
34667	Z64	FCE	OPOBLE	7.4	4.6	0.18	<.2	73.0	1.07	0.09	0.07	0.42	1.0	.	.	11.5
30544	J1.4	FMS	OPOBLE	16.8	4.1	0.32	<.2	70.4	0.10	0.12	0.08	0.83	0.4	.	.	6.1
30545	J1.5	FMS	OPOBLE	34.8	1.5	0.06	<.2	53.5	0.03	0.15	<.05	0.11	0.1	.	.	8.4
30547	J1.7	FMS	OPOBLE	30.4	3.0	0.24	<.2	60.1	0.04	0.17	<.05	0.64	0.5	.	.	5.2
30551	J2.3	FMS	OPOBLE	3.9	1.5	0.16	<.2	81.2	0.08	0.08	0.05	0.32	1.3	.	.	11.0
30552	J2.4	FMS	OPOBLE	29.3	1.0	0.16	0.5	57.1	2.18	0.04	<.05	0.28	1.1	.	.	7.9
30553	J2.5	FMS	OPOBLE	2.0	0.3	0.07	<.2	82.0	0.65	0.02	<.05	<.05	2.1	.	.	11.1
30554	J2.6	FMS	OPOBLE	39.8	1.4	0.26	<.2	50.6	0.76	<.02	<.05	0.54	0.8	.	.	6.8
30555	J2.7	FMS	OPOBLE	24.6	2.4	0.40	<.2	61.6	0.41	0.11	<.05	0.88	0.8	.	.	8.1
30556	J3.1	FMS	OPOBLE	25.9	8.4	0.33	<.2	52.7	1.05	0.48	<.05	0.76	0.3	.	.	9.4
30557	J3.2	FMS	OPOBLE	1.7	0.9	0.09	<.2	83.3	1.00	0.05	<.05	0.14	1.5	.	.	10.9
30558	J3.3	FMS	OPOBLE	37.8	6.3	0.74	<.2	45.7	0.26	0.25	<.05	2.20	0.3	.	.	7.2
34218	H1.1	FMS	OPOBLE	40.1	2.8	0.17	<.2	47.5	0.02	0.22	0.06	0.73	0.2	0.26	0.02	8.3
34219	H1.2	FMS	OPOBLE	65.8	3.7	0.32	<.2	26.1	<.01	0.09	0.06	0.77	0.4	0.14	0.05	4.0
34220	H1.3	FMS	OPOBLE	14.5	3.7	0.13	<.2	69.8	0.02	0.09	<.05	0.35	0.2	0.32	0.04	11.8
34633	Z3	FMS	OPOBLE	7.3	2.3	0.27	<.2	76.0	2.81	0.04	0.07	0.52	0.9	.	.	10.5
34634	Z5	FMS	OPOBLE	12.6	2.0	0.27	<.2	71.5	0.08	0.08	<.05	0.66	0.8	.	.	10.5
34635	Z6	FMS	OPOBLE	25.1	1.1	0.18	<.2	62.6	0.06	0.02	<.05	0.44	1.5	.	.	8.5

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
30543	50	1471	243	50	25	79	144	106	9.0	42	7	15	35	71	1.7	1.7	0.7
30549	8	1354	40	362	337	47	1655	266	9.2	78	9	70	77	1522	8.5	16.4	1.6
30559	25	659	132	184	141	85	1246	53	10.6	92	9	29	32	90	<.1	2.2	0.7
34660	35	2772	154	154	42	45	436	166	25.4	62	10	67	54	69	<.1	6.5	0.6
34664	5	104	38	140	43	19	2722	20	1.5	37	7	42	6	12	<.1	2.3	<.1
34713	15	691	104	74	44	32	3188	29	7.4	63	9	21	25	32	<.1	3.0	0.4
33824	18	3147	132	518	1353	40	6101	266	7.9	62	10	149	117	368	6.0	8.2	0.9
34667	8	2024	51	302	193	37	2535	39	6.9	38	3	38	11	25	<.1	3.9	<.1
30544	3	523	139	82	52	61	732	61	10.9	46	7	37	12	36	3.6	3.9	0.8
30545	2	27	18	48	17	11	90	111	1.7	28	5	1	<.3	<.1	0.3	0.6	0.6
30547	76	1917	97	28	16	65	89	86	10.0	64	9	8	54	97	3.6	0.8	0.4
30551	1	246	28	592	192	19	2348	44	3.2	35	4	120	42	85	2.5	8.8	1.1
30552	7	3696	12	535	334	11	2113	11	0.9	38	4	28	9	14	<.1	1.5	0.9
30553	9	838	18	457	152	15	2633	18	1.1	27	6	17	13	15	<.1	0.5	0.8
30554	6	1494	12	348	152	9	1840	13	0.8	21	<.2	16	7	19	1.2	0.8	0.5
30555	4	1157	25	561	185	36	2207	21	3.2	62	8	28	<.3	25	<.1	1.4	0.6
30556	9	773	179	63	119	197	269	29	9.8	141	11	22	19	82	<.1	2.4	0.8
30557	32	380	23	344	142	14	738	12	2.0	30	6	12	<.3	11	<.1	0.2	0.8
30558	2	426	38	143	64	35	1260	17	4.5	160	7	19	17	32	<.1	1.7	0.6
34218	10	80	27	4	9	24	129	104	7.4	86	7	4	<.3	20	<.1	<.1	<.1
34219	10	1543	150	18	<.5	45	33	38	1.8	74	<.2	5	<.3	<.1	<.1	<.1	<.1
34220	7	125	35	24	<.5	15	87	126	3.3	89	6	4	4	<.1	<.1	<.1	<.1
34633	32	2530	115	153	168	43	355	143	12.0	51	8	25	13	18	<.1	2.8	<.1
34634	2	543	31	477	186	24	3050	26	2.9	60	13	30	10	12	<.1	1.7	0.2
34635	2	333	21	327	107	14	1695	24	1.8	25	9	18	5	<.1	<.1	1.2	<.1

N*Labo	N*Ech.	Facies	Site	S102	Al203	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	T102	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. feu
34637	Z11	FMS	OPOBLE	4.6	1.1	0.15	<.2	79.0	1.20	0.07	0.07	0.40	0.5	.	.	11.2
34641	Z16	FMS	OPOBLE	65.3	2.5	0.04	<.2	26.4	<.01	0.04	<.05	0.10	<.1	.	.	3.8
34642	Z18	FMS	OPOBLE	24.2	0.9	0.04	<.2	64.7	0.01	0.05	<.05	<.05	0.2	.	.	9.1
34643	Z19	FMS	OPOBLE	9.9	3.5	0.32	<.2	72.8	0.25	0.15	0.11	0.91	0.1	.	.	10.9
34644	Z20	FMS	OPOBLE	12.0	2.4	0.19	<.2	73.1	0.14	0.17	0.10	0.49	0.2	.	.	11.2
34645	Z22	FMS	OPOBLE	21.2	2.2	0.30	<.2	68.0	0.29	0.09	0.07	0.74	<.1	.	.	5.5
34646	Z23	FMS	OPOBLE	14.9	4.1	0.48	<.2	66.4	0.15	0.16	0.13	1.26	0.4	.	.	10.0
34647	Z25	FMS	OPOBLE	13.8	2.1	0.21	<.2	67.6	4.82	0.09	0.07	0.53	0.1	.	.	8.4
34648	Z26	FMS	OPOBLE	13.9	3.3	0.38	<.2	71.5	2.42	0.12	0.10	1.02	<.1	.	.	7.4
34650	Z31	FMS	OPOBLE	13.5	7.0	0.67	<.2	68.3	0.10	0.20	0.13	1.91	0.1	.	.	8.3
34651	Z32	FMS	OPOBLE	61.4	2.7	0.24	<.2	30.2	<.01	0.19	0.06	0.64	0.2	.	.	2.3
34652	Z34	FMS	OPOBLE	15.3	5.2	0.52	<.2	66.4	0.22	0.21	0.07	1.61	0.3	.	.	8.8
34655	Z41	FMS	OPOBLE	15.8	7.2	0.73	<.2	62.7	0.36	0.30	0.08	2.38	0.3	.	.	10.0
34656	Z42	FMS	OPOBLE	17.0	3.2	0.30	<.2	65.9	0.10	0.13	0.09	0.91	0.3	.	.	9.9
34657	Z45	FMS	OPOBLE	7.9	3.0	0.43	<.2	79.7	0.69	0.17	0.08	1.17	0.2	.	.	6.1
34659	Z47	FMS	OPOBLE	25.0	1.3	0.19	<.2	63.9	0.24	0.09	0.05	0.55	<.1	.	.	8.8
34661	Z51	FMS	OPOBLE	3.4	1.2	0.13	<.2	81.4	0.85	0.03	0.07	0.39	0.1	.	.	11.6
34662	Z53	FMS	OPOBLE	10.4	3.7	0.45	<.2	69.6	1.12	0.16	0.05	1.33	0.2	.	.	11.1
34663	Z55	FMS	OPOBLE	18.5	4.2	0.49	<.2	67.3	1.02	0.16	0.07	1.33	0.2	.	.	7.3
34665	Z60	FMS	OPOBLE	10.2	2.8	0.31	<.2	73.6	1.14	0.12	0.05	0.90	0.2	.	.	9.9
34666	Z62	FMS	OPOBLE	7.0	1.4	0.15	<.2	80.0	0.90	0.10	<.05	0.38	0.3	.	.	10.1
34668	Z65	FMS	OPOBLE	9.5	5.4	0.91	<.2	66.9	3.83	0.21	0.11	1.33	0.3	.	.	10.0
34669	Z68	FMS	OPOBLE	49.5	2.6	0.27	0.8	36.2	0.04	0.13	0.07	0.57	0.5	.	.	8.5
34670	Z70	FMS	OPOBLE	10.1	2.4	0.18	<.2	82.3	0.98	0.12	0.08	0.25	1.4	.	.	2.1
34671	Z72	FMS	OPOBLE	6.2	2.4	0.30	0.3	82.0	0.82	0.12	0.09	0.71	0.6	.	.	5.8

N*Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34637	11	818	45	198	114	19	2887	32	15.0	55	5	104	6	18	<.1	5.8	0.3
34641	2	21	20	44	18	20	20	102	3.0	21	<.2	1	<.3	17	<.1	0.3	<.1
34642	3	66	57	41	23	29	61	79	1.8	37	4	2	<.3	<.1	<.1	0.6	<.1
34643	5	827	66	87	55	36	1511	39	7.4	89	8	16	11	18	<.1	1.8	<.1
34644	8	492	65	80	45	48	643	222	5.0	75	8	17	29	29	<.1	2.0	<.1
34645	7	271	37	159	109	21	1621	358	5.8	63	5	33	6	23	<.1	3.2	0.2
34646	3	391	55	187	120	39	3638	101	8.6	57	9	45	7	26	<.1	2.7	0.6
34647	6	4846	40	130	202												

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na2O	K2O	P205	C	S	p. feu
34706	Z78	FMS	OPOBLE	10.8	2.0	0.17	<0.2	73.8	0.04	0.04	0.07	0.46	0.1	.	.	11.0
34707	Z81	FMS	OPOBLE	10.2	2.5	0.29	<0.2	76.5	1.33	0.17	0.11	0.60	0.2	.	.	6.4
34709	Z84	FMS	OPOBLE	9.3	2.3	0.07	<0.2	74.5	0.18	0.09	0.09	0.13	0.1	.	.	11.7
34711	Z87	FMS	OPOBLE	16.4	4.0	0.11	<0.2	70.4	1.12	0.22	0.06	0.29	<0.1	.	.	7.1
34712	Z88	FMS	OPOBLE	7.8	2.0	0.08	<0.2	73.5	8.36	0.04	0.07	0.07	0.1	.	.	7.1
34714	Z92	FMS	OPOBLE	44.2	1.6	0.27	<0.2	45.5	0.18	0.05	<0.05	0.72	0.1	.	.	6.8
34749	Z8	FMS	OPOBLE	5.4	2.1	0.31	<0.2	80.5	1.00	0.12	0.09	0.68	0.3	.	.	9.1
30542	J1.2	FSC	OPOBLE	15.5	3.5	0.23	0.3	71.1	0.05	0.07	<0.05	0.46	1.1	.	.	7.5
30546	J1.6	FSC	OPOBLE	56.3	1.8	0.19	<0.2	37.4	0.03	0.18	<0.05	0.43	0.6	.	.	1.4
30548	J1.8	FSC	OPOBLE	12.7	5.1	0.23	<0.2	69.5	0.04	0.15	0.06	0.67	0.4	.	.	11.5
30550	J2.2	FSC	OPOBLE	12.5	3.2	0.39	<0.2	71.3	1.17	0.14	0.06	0.95	0.6	.	.	9.3
34299	J1.1	FSC	OPOBLE	20.5	4.4	0.17	0.2	66.7	0.02	0.08	<0.05	0.49	0.9	0.31	0.11	6.5
34300	J1.3	FSC	OPOBLE	59.1	2.0	0.13	<0.2	32.9	0.03	0.10	<0.05	0.37	0.3	0.15	0.09	3.2
34636	Z7	FSC	OPOBLE	26.4	3.3	0.22	<0.2	59.4	0.17	0.08	<0.05	0.36	0.6	.	.	9.6
34640	Z14	FSC	OPOBLE	30.3	1.8	0.11	<0.2	58.1	<0.01	0.10	0.07	0.24	0.4	.	.	7.6
34649	Z28	FSC	OPOBLE	34.7	3.3	0.28	<0.2	52.9	<0.01	0.25	0.08	0.79	<0.1	.	.	7.3
34708	Z82	FSC	OPOBLE	14.7	2.3	0.27	<0.2	70.3	0.23	0.04	0.09	0.85	0.2	.	.	10.1
34301	J1.7	S	OPOBLE	54.4	25.5	0.88	<0.2	7.5	0.05	1.03	0.28	6.92	<0.1	0.21	0.04	4.1
34302	J1.9	S	OPOBLE	46.5	29.7	0.85	<0.2	8.3	0.04	1.17	0.34	8.28	<0.1	0.24	<0.02	4.9
34658	Z46	S	OPOBLE	46.3	17.7	6.00	1.0	16.6	0.08	3.95	0.12	2.90	1.1	.	.	2.9
34638	Z12	SF	OPOBLE	16.3	5.4	0.57	<0.2	65.5	0.78	0.21	0.13	1.67	0.9	.	.	9.0
34639	Z13	SF	OPOBLE	13.9	3.1	0.32	<0.2	69.8	0.32	0.13	0.09	1.00	0.3	.	.	10.7
34653	Z36	SF	OPOBLE	23.4	9.5	0.93	<0.2	46.8	3.85	0.33	0.17	2.87	0.5	.	.	9.0
34654	Z38	SF	OPOBLE	30.0	10.8	1.04	<0.2	46.1	0.09	0.52	0.09	3.50	0.4	.	.	8.1
34672	Z74	SF	OPOBLE	13.6	4.3	0.38	<0.2	69.3	0.07	0.17	0.13	1.21	0.4	.	.	10.1

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34706	6	194	132	61	25	17	1051	243	14.1	39	6	154	36	47	5.1	18.4	1.9
34707	3	434	41	106	101	30	1477	50	8.2	61	9	20	10	31	<1.0	2.2	<1
34709	2	32	60	82	46	23	3038	18	11.7	62	9	42	10	27	<1.0	4.3	0.4
34711	4	395	55	91	104	43	1457	140	5.6	91	9	54	21	59	<1.0	4.9	<1
34712	70	983	51	165	272	38	2359	53	8.7	56	8	87	21	73	<1.0	8.1	1.0
34714	2	524	25	46	44	16	1976	38	2.3	35	8	7	7	17	<1.0	1.7	1.3
34749	6	580	28	629	517	30	6161	27	2.1	45	8	98	22	62	<1.0	4.8	<1
30542	63	1284	207	33	22	80	194	154	9.9	41	8	22	54	75	1.5	1.6	0.4
30546	41	1111	78	17	13	42	195	23	4.6	58	5	8	24	46	<1.0	0.7	0.6
30548	43	1023	64	37	20	61	127	142	9.4	66	9	9	64	45	2.0	0.9	0.5
30550	10	2311	36	366	367	33	4795	229	3.4	81	8	147	97	130	6.2	10.8	1.3
34299	93	974	49	33	10	62	115	126	10.7	61	6	12	139	169	<1.0	<0.1	0.2
34300	39	734	90	20	9	62	74	42	4.0	48	5	10	20	53	<1.0	<0.1	0.6
34636	5	1543	51	220	56	30	682	31	6.9	65	3	60	23	52	<1.0	4.3	0.4
34640	37	930	85	45	18	35	64	198	3.3	40	<2	6	24	37	<1.0	0.7	<1
34649	3	517	36	38	23	34	67	86	3.9	84	8	5	<3	12	<1.0	1.2	0.4
34708	6	205	40	196	88	20	3184	125	9.9	44	4	32	8	16	<1.0	3.2	<1
34301	71	494	144	53	20	112	57	29	19.4	162	22	29	46	101	<1.0	2.8	0.1
34302	82	577	168	35	16	134	37	33	22.9	182	28	37	57	148	<1.0	3.7	0.2
34658	93	2823	169	80	34	12	1225	23	17.4	345	91	76	164	205	<1.0	4.5	0.4
34638	3	346	59	219	113	41	2488	51	10.0	88	6	31	6	25	<1.0	2.7	<1
34639	5	142	50	120	72	30	2835	101	22.4	80	5	78	6	28	<1.0	9.2	1.2
34653	31	6832	64	259	233	76	3114	25	9.9	119	10	41	33	73	<1.0	3.5	0.4
34654	7	496	83	54	32	78	1301	65	11.4	175	12	18	28	44	<1.0	2.2	0.1
34672	6	178	58	99	36	184	888	18	15.9	96	6	43	6	13	<1.0	4.1	<1

N°Labo	N°Ech.	Facies	Site	S102	A1203	MgO	CaO	Fe203	Mn304	T102	Na2O	K2O	P205	C	S	p. feu
34703	Z75	SF	OPOBLE	24.2	5.6	0.67	<0.2	59.8	1.33	0.17	0.13	1.92	0.6	.	.	6.1
34704	Z76	SF	OPOBLE	19.0	15.3	0.69	<0.2	50.5	0.14	0.33	0.13	1.85	0.2	.	.	10.3
34705	Z77	SF	OPOBLE	30.1	11.4	0.92	<0.2	43.4	0.02	0.50	0.20	3.14	1.0	.	.	7.6
34710	Z85	SF	OPOBLE	6.2	3.2	0.08	<0.2	80.3	2.19	0.14	0.07	0.09	0.2	.	.	6.3
31377	TOG.55	G	SOK-BAS	87.4	0.3	0.07	<0.2	6.7	2.78	0.04	<0.05	0.11	<0.1	.	.	1.0
30101	TOG41	SH	SOK-BAS	94.5	<0.2	0.16	<0.2	4.3	0.01	0.03	0.06	<0.05	<0.1	.	.	0.0
30099	TOG38A	BF	TCH-TCH	81.7	<0.2	0.04	<0.2	17.2	<0.01	<0.02	<0.05	0.08	0.1	.	.	0.7
30100	TOG38B	BF	TCH-TCH	56.9	0.5	0.11	<0.2	37.2	0.03	0.07	<0.05	0.19	0.5	.	.	4.2
31780	AB611	BF	TCH-TCH	12.3	0.7	0.09	<0.2	76.2	0.11	0.04	<0.05	0.14	0.7	.	.	9.6
33825	TOG38	BF	TCH-TCH	93.8	0.2	0.04	<0.2	5.7	<0.01	<0.02	<0.05	<0.05	0.1	<0.02	<0.02	0.5
31775	PTOG65	BF	TCHATCHA	29.9	2.1	0.15	<0.2	56.9	1.29	0.12	<0.05	0.60	1.1	.	.	8.2
30104	TOG46	FMS	TCHATCHA	15.6	1.6	0.04	<0.2	72.9	0.10	1.37	0.07	0.09	0.3	.	.	8.6
30106	TOG50	FMS	TCHATCHA	12.4	0.5	<0.02	<0.2	85.1	0.02	0.14	0.08	<0.05	0.3	.	.	0.3
33966	TCHA-26	FMS	TCHATCHA	20.8	1.2	0.03	<0.2	69.9	0.09	0.29	<0.05	<0.05	0.3	0.15	0.08	8.4
33967	TCHA-33	FMS	TCHATCHA	34.8	1.9	0.11	<0.2	54.6	0.03	0.56	<0.05	0.20	0.3	0.18	0.03	8.4
33968	TCHA-51	FMS	TCHATCHA	12.4	1.6	0.07	<0.2	76.5	0.18	0.20	<0.05	0.06	0.2	0.16	0.18	6.8
33971	TCHA55-3	FMS	TCHATCHA	55.2	2.7	0.17	<0.2	33.0	0.07	0.44	<0.05	0.26	0.2	0.15	<0.02	5.8
33972	TCHA-56	FMS	TCHATCHA	32.8	1.2	0.06	<0.2	58.8	0.03	0.03	<0.05	0.06	0.2	0.08	0.05	6.6
33973	TCHA-59	FMS	TCHATCHA	16.4	3.4	0.26	0.3	66.3	0.09	0.17	<0.05	0.12	0.3	0.20	0.04	10.8
30102	TOG44	G	TCHATCHA	93.6	<0.2	0.08	<0.2	6.7	0.02	0.04	0.06	<0.05	<0.1	.	.	<0.6
30103	TOG45	G	TCHATCHA	93.5	<0.2	<0.02	<0.2	5.8	<0.01	0.05	0.06	<0.05	<0.1	.	.	<0.1
33886	TCHA-20	G	TCHATCHA	95.5	1.3	0.14	<0.2	0.9	<0.01	0.05	<0.05	0.50	<0.1	<0.01	<0.02	0.4
33887	TCHA-21	G	TCHATCHA	71.2	1.9	2.73	<0.2	19.0	0.73	0.03	<0.05	<0.05	<0.1	0.12	<0.02	4.1
33969	TCHA55-1	G	TCHATCHA	97.1	0.4	0.05	<0.2	1.0	<0.01	0.92	<0.05	<0.05	<0.1	0.05	<0.02	0.3
33970	TCHA55-2	G	TCHATCHA	96.9	1.0	0.09	<0.2	1.4	<0.01	1.05	<0.05	<0.05	<0.1	0.07	<0.02	0.6

N°Labo	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
34703	10	247	56	175	88	45	490	37	9.7	111	11	25	18	39	<1.0	2.7	<1
34704	12	4173	175	141	48	98	581	47	26.2	133	15	43	35	60	<1.0	5.6	1.1
34705	35	10315	73	79	27	71	278	73	6.9	92	9	30	16	33	<1.0	3.0	1.0
34710	2	24	57	95	82	26	963	28	13.4	70	12	7	9	43	<1.0	1.6	0.1
31377	81	1347	25	36	199	9											

N°Lado	N°Ech.	Facies	Site	SiO2	Al2O3	MgO	CaO	Fe2O3	Mn3O4	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	C	S	p. Feu
30105	T0G47	QF	TCHATCHA	14.8	0.7	0.03	<0.2	80.5	0.04	0.21	0.08	<.05	0.2	.	.	2.9
33826	T0G43	SER	TCHATCHA	43.9	1.0	34.45	0.2	6.6	0.07	0.04	<.05	<.05	<0.1	0.08	<.02	11.9
33888	TCHA-24	SFC	TCHATCHA	24.0	1.3	0.04	<0.2	67.6	0.10	0.27	<.05	0.07	0.2	0.03	0.06	6.4
27894	SG. 50A	FMS	TINTCHRO	3.6	2.3	0.10	<0.2	85.8	0.31	0.25	<.05	0.21	0.4	.	.	2.1
27895	SG. 50B	FMS	TINTCHRO	1.0	0.4	0.06	<0.2	96.2	0.04	0.13	<.05	<.05	0.3	.	.	0.8
33870	TIN-1	FMS	TINTCHRO	6.1	1.4	0.08	<0.2	74.2	2.69	<.02	0.10	0.28	1.5	0.10	<.02	11.2
33871	TIN-2	FMS	TINTCHRO	14.6	2.4	0.16	<0.2	70.2	0.58	0.08	0.11	0.59	1.4	0.12	<.02	9.8
33872	TIN-3	FMS	TINTCHRO	9.9	4.3	0.39	<0.2	72.6	0.05	0.10	0.11	1.33	1.2	0.03	<.02	9.9
33873	TIN-4	FMS	TINTCHRO	23.5	3.4	0.16	<0.2	61.7	0.06	0.08	0.07	0.63	1.0	0.07	<.02	7.9
33874	TIN-5	FMS	TINTCHRO	56.6	3.8	0.16	<0.2	31.8	<0.01	0.06	<.05	0.65	0.4	0.08	<.02	4.8

N°Lado	Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Cu	Sc	Zr	Nb	Y	La	Ce	Eu	Yb	Lu
30105	2	8	199	422	33	232	66	89	5.2	47	8	39	6	32	<1.0	3.2	<.1
33826	4	14	42	1688	104	3802	47	8	10.9	<1	4	2	<3	13	<1.0	0.3	0.8
33888	5	19	205	348	20	270	130	182	11.6	53	4	36	11	45	1.2	2.1	<.1
27894	42	240	47	51	27	23	478	9	6.9	61	.	17	86	83	2.0	<0.1	<.1
27895	23	54	40	73	18	27	449	5	5.5	66	.	6	34	47	<2.0	<0.1	<.1
33870	13	4805	19	246	240	29	456	114	3.7	37	8	89	11	41	3.8	6.5	<.1
33871	4	948	23	148	76	25	380	167	10.4	47	<2	62	<3	40	<1.0	2.6	<.1
33872	2	510	29	344	85	26	615	379	17.3	63	<2	420	5	24	2.9	22.0	1.6
33873	9	148	67	140	51	94	381	187	17.6	121	<2	89	11	35	<1.0	4.7	<.1
33874	5	137	79	35	15	111	120	153	13.3	98	<2	13	12	48	1.5	0.6	0.1

N° 460

ANNEXE - 2

Analyses chimiques microsituées

Analyses microsituées de chlorites dans les roches primaires

Num. éch.	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MnO	FeO	NiO	
CF N-5	14,23	22,6	27,79			0,52	33,74		
	13,37	20,2	27,53			0,5	37,63		
	13,07	22,07	26,96	0,14		0,39	36,55		
	15,17	22,38	27,78	0,2		0,23	33,32		
	9,16	23,02	36,24	4,26	0,21	0,47	26,07		
	14,17	21,65	27,92	0,3		0,31	34,88		
	14,85	21,36	28,35	0,31		0,3	33,2		
	14,87	21,28	28,21	0,19		0,46	33,97		
85-2	9	22,7	26,4	0,56			39,68		
	9,85	23,45	25,35	0,22			39,41		
	7,95	22,3	25,43	0,23			43,18		
15	11	18,6	25			0,4	42	1,9	
	13,6	20,6	26,5			0,4	36	2,09	
	13	19,5	25			0,3	34,1	2	
	12,6	20,3	26,3			0,42	36	3,1	
	14,3	21,4	27,2			0,5	34	2,12	
134	15,92	23,57	29,9				29,11		
	15,82	23,7	27,99				31,87		
AB 869	35,47	22,09	36,11		0,27		5,69		
	34,64	21,95	36		0,36		6,17		
	34,57	23,19	36,23		0,22		5,33		
	35,4	22,19	35,22		0,38		6,35		
CFO 12	17,23	22,97	29,63			0,94	27,81		
	18,17	22,7	28,64			0,9	28,68		
	18,62	22,85	29,93	0,16		0,74	26,62		
	19,15	22,15	29,16			0,61	27,15		
CF X-5	17,09	23,11	29,6			0,91	28,01		
	12,81	21,86	26,48				37,68		
	12,83	21,73	26,8				37,94		
	12,32	21,93	26,47				32,31		
	10,84	19,49	23,87				37,55		
	12,92	22	27,02				37,87		
	12,07	4,37	27,7				37,21		
	12,28	22,01	27,59				33,7		
CF N-10	14,93	22,15	27,44				33,7		
	13,8	21,36	28,93				33,66		
TOG 36	23,12	14,91	45,46	4,76	1,35		7,28		
	22,12	15,11	45,64	5,5	1,62		8,1		
	30,84	23,38	33,32	5,14	1,48		11,82		
TOG 29	28,18	22,97	32,49				15,32		
TOG 37	27,8	22,93	36,67		0,5		11,23		
	24,38	16,87	46,48		0,95		8,75		
	28,67	23,16	35,87		0,38		10,91		
	17,97	26,06	44,64		0,7		8,5		
	23,96	24,66	40,45		0,63		9		
	24,61	25	36,82		0,4		11,87		
	30,18	23,71	33,29				12,08		
TOG 34 16	12,4	21,2	26,2	0,23	0,05	0,3	39		
	10,2	19,6	29,46	1,13		0,37	38,6		
	11	22,24	32,5	2,61		0,25	30,04		
	14	20,44	27,52	0,2		0,3	37,05		
	13,41	21,03	26,22	0,11	0,06	0,34	38,6		
	10	23,60	33	2,8	0,04	0,28	29,4		
	10,23	23,45	33,05	3,03		0,14	29,08		
	13,3	20,39	27,02	0,11		0,16	37,81		
	9	12,75	20,7	25,5	0,1		0,6	40	0,2
		14	20,6	27	0,3		0,4	37	
13,5		21	27,5	0,1		0,7	36	0,1	
13		20	27	0,2		0,6	38,5		
147	19,45	22,8	28,74				27,62		
	19,33	23,29	29,48				27,24		
	19,07	22,56	29,66				27,66		
	20,07	22,95	30,1				26		
	17,62	23,93	31,65	0,18			25,78		
124	17,84	22,38	28,9				29,01		
	17,54	23,76	28,76				28,3		
	18,35	23,43	29,2				28,12		
	18,04	23,52	28,32				28,87		
	18,73	22,43	28,82				28,01		
81	22,16	16	43	9,23		8,66			

Analyses microsituées de muscovites dans les roches primaires

Jum. éct	MgO	Al2O3	SiO2	K2O	TiO2	FeO	BaO	Jum. éct	MgO	Al2O3	SiO2	K2O	TiO2	FeO	BaO
109	3,06	30,87	50,73	11,4	0,55	0,43	2,69	101	1,8	31,13	52,68	9,2			4,15
	3,42	30,5	51,16	10,16	0,62	0,6	2,46		1,57	33	50,8	9,64	0,3	3,17	
	3,32	30,31	50,76	11,47	0,75	0,35	2,55		1,6	31,98	51,28	8,79	0,26	4,38	
	3,1	30,1	51,41	11,41	0,51	0,35	2,08		2,8	28,8	54,58	8,9		5,1	
	3,21	30,21	50,88	11,4	0,55	1,09	2,15		1,64	31,7	52	9,34	0,36	4,1	
	3,08	30,65	50,5	11,14	0,46	0,52	2,46		1,04	34,16	51,22	8,5	0,45	3,28	
	3	29,64	49,5	11,53	0,58	2,32	2,66		1,62	32,33	50,76	9,3	0,3	3,95	
TOG 21	2,92	31,44	48,44	10,55	0,61	0,41	5,41		1,4	32,48	50,8	8,7	0,36	5,2	
	3,09	30,52	48,03	9,69	0,85	0,47	6,14		1,04	31,45	46,62	8,48	0,28	11,14	
	2,72	31,28	49,13	10,04	0,61	0,4	5,24		1,6	33	51,4	9,45	0,3	3,7	
	3,23	31,05	48,6	10,01	0,56	0,36	5,61		0,6	34,78	47,49	9	0,35	6,09	
	2,75	30,98	48,87	10	0,6	0,4	5,53	78	1,47	30,18	51,9	10,63	0,34	4,16	
	2,97	30,76	49,06	10,11	0,66	0,5	5,2		1,11	33,39	50,64	10,56		3,02	
	3,33	30,9	48,42	10,04	0,47	0,8	5,35		1,14	34,4	49,8	10,6		2,54	
	2,8	31,32	48,92	9,9	0,76	0,67	5,63		1,19	31,85	50,9	10,61	0,46	3,58	
	2,85	31,38	48,06	9,65	0,62	0,52	5,6		1,42	32	50,2	10,51		3,17	
	2,83	31,3	49,7	9,6	0,56	0,44	5,6	TOG 36	4,41	27,6	52,4	10,43	0,52	3,14	
TOG 28	3,05	30,73	51	11,15		0,93	1,68		4,67	25,14	51,87	10	0,61	3,34	0,32
	3,24	31,63	50,58	11,21			1,9	CFN 9	2,84	28,53	53,18	11,99	0,68	1,8	
	3,06	31,7	50,21	10,83	0,62		1,98		3,55	27,75	53,53	11,96	0,33	1,56	
	3,09	31,15	50,86	11,54	0,4		1,99	104	4,03	28,77	52,49	11,84	0,69	1,68	
	3,13	31,3	50,79	11,36			1,87		3,74	27,34	54,2	11,78	1,09	1,26	
	3,05	31,2	51,28	11,15			1,84		4,05	27,28	54,19	11,43	1,05	1,28	
	3,41	29,47	51,69	10,2		1,86	1,64	111	2,39	32,51	51	11,26		1,21	
	2,67	32,31	50,84	11	0,53		1,68		2,67	30,54	50,62	10,64		1,62	
	3,09	30,93	50,73	11,76	0,46	0,72	1,98		2,66	32,49	50,82	11,09		1,52	
TOG 37	4,58	27,32	53,25	10,26	0,43	2,86	0,35		2,45	31,68	51,98	11,31		1,21	
	3,65	28,49	52,49	11,15	0,4	2,78		80	3,66	29,15	52,2	11	0,56	1	0,3
	3,66	28,63	53,34	10,52	0,36	2,96			3,5	27,6	55,57	10,67	0,67	1,23	0,25
	1,9	18,37	63,5	14,62		0,8			4	29,35	52,85	10,93	0,36	0,95	0,36
	4,36	26,8	52,75	10,74	0,4	3,22	0,45		4,23	28	59,46	10,35	0,43	1,26	0,26
	4,28	27,35	52,21	11,14	0,65	3,44			4,68	26	55,1			1,14	0,6
	3,54	29,49	51,66	10,09	0,33	2,62	0,32		3,41	28,95	52,8	10,64	0,78	1,76	
16	2,7	26,4	52,75	11,46	0,15	5	0,04	85	4,4	35,43	47,66	9,95		3,92	
	2,6	26,14	52,27	12,7	0,5	5,2	0,12		0,69	30,62	46,44	17,79		6,34	
	3	27	53,12	11,15	0,34	5			1,54	32,1	51,46	10,47	0,36	3,16	
	2,85	27,31	53,72	11,25	0,24	4	0,12		2,04	31,93	49,93	9,98	0,4	3,87	
	2,08	30	52	11,73	0,6	4,53	0,14	17	0,85	16,7	73,8	6,2	0,17	1,14	0,23
TOG 30	3,36	29,13	51,69	11,27		3,22			1,6	25,52	60	10	0,08	2,3	0,6
	3,17	29,03	52,36	10,77		3,32		18	3,23	25,76	53,75	11,63	0,67	4,07	
	3,96	27,7	51,48	10,9		3,26			3,22	26,15	53,47	12	0,77	4	0,13
	3,47	30,71	52,94	11,78		3,17			3,62	26,4	53,14	11,3	0,4	7,27	0,21
	3,34	28,78	51,98	11,18		2,83			3,85	25,25	52,92	11,06	0,73	4,7	0,12
	3,4	29,93	52,09	11,21		1,85			3,25	23,41	56,38	11,21	0,92	4	
CF A-1	1,16	32,63	51,43	10,68	0,33	2,7			3,14	27,51	52,03	11,66	3,85		
	1,58	32,8	50,41	10,43	2	2,81			3,18	25,7	53,88	11,53	0,77	4,5	
	1,5	32,49	50,39	10,2		3,29			3,82	25,41	53,75	11,54	0,49	4,24	0,02
	1,69	33,23	51,09	10,25		2,57			3,68	25,2	54,29	11,3	0,85	4,2	0,21
	1,61	32,56	50,97	10,18		2,6		19	3,11	25,08	51,16	11,61	0,72	6,78	0,46
	1,84	32,22	51,01	10,14	0,32	2,86			3,1	24,7	52,84	11,18	0,71	7	0,22
CF O-1:	2,84	29,94	50,52	10,41		4,26			2,9	25,57	51,58	8,97	0,52	8,96	0,03
	2,5	28,97	50,09	10,55	0,41	5,63			2,84	24,4	53,21	12	0,52	6,7	0,08
	1,76	31,18	49,62	10,05	0,64	4,98		8	3	24,2	51,8	12	0,7	7,5	0,3
	1,63	31,22	49,77	10,52		4,87			3,5	24,5	51,5	51,5	12,5	0,6	6,6
	1,79	30,11	50,47	11,08	0,35	5,39			3,2	23,6	50,6	11,8	0,7	8,7	0,3
CF N-5	2,71	28,08	50,7	11,02		6,25		9	2,5	26,6	51,3	11,6	0,1	6,7	0,3
CF X-5	2,12	31,23	51,32	10,77		3,56			2,7	27,8	50,5	11,8	0,3	6,1	
	1,83	30,3	51,78	10,6		3,71			2,4	28	50	12,2	0,2	6	0,3
	2,05	30,88	50,94	10,84		3,8			3	24	51	12	0,7	8,5	0,2
134	2,21	31,58	51,14	10,05	0,41	2,48			3	23,5	50,4	12,3	0,7	9,6	
	2,02	32,6	51,08	9,94	0,32	2,2		13	0,5	36	50	9,7	0,3	2,2	0,3
	1,84	32,66	51,53	10,25	0,33	2,46			1,5	31,2	49,2	11,7	0,3	4,5	0,4
	1,6	32,24	51,33	10,27		2,48			0,8	35,2	47,5	10,5	0,3	4	0,2
92-2	4,48	25,09	53,42	11,94	1,24	3,16		124	3,08	29,76	52,26	9,87	0,39	3,73	
	4,33	24,49	54,16	12,7	1,38	2,53			2,8	29,46	53,11	9,78		2,49	
	4,34	24,69	54,33	12,6	1,16	2,38			1,27	34,2	51,11	9,33		1,65	
	4,59	24,61	54,43	11,88	1,13	2,17			1,28	33,82	51,11	9,55	0,69	1,83	
	4,43	24,79	54,37	12,19	1,32	2,31			2,97	30,5	52,29	9,95	0,48	2,2	
102	3,76	24,8	52,8	11,46	0,37	3,21	0,32	147	1,47	31,46	51,37	10,76	0,33	2,78	
	4	25,66	54,37	11,32	0,48	3,43	0,48		2,53	29,39	51,79	10,34	0,36	3,88	
	4,6	26,28	53,79	11,23		2,65	0,23		2,2	31,73	50,58	10,01	0,56	3,61	
	5,89	26,26	48,4	9,89		3,62	0,52		2,14	32,01	50,64	10,63	0,35	2,81	
	5,16	22,59	57,21	10,78		3,04			2,56	30,63	52,03	10,66		2,72	
	3,75	28,33	49,85	10,67	0,9	3,14	0,54		1,84	32,69	50,47	9,53		2,96	
TOG 34	4,4	29,12	50,23	10,25		2,9			2,5	30,06	50,46	10,48	1,55	3,49	
	22,16	16	43	9,23		8,66			2,12	30,42	51,78	10,65	0,36	2,96	

Analyses microsituées de divers autres minéraux dans les roches primaires

Minéraux	Num. éch.	NaO	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO2	K2O	CaO	TiO2	MnO	FeO	CoO	NiO	CuO	ZnO	BaO	PbO
Hornblende	88-1			29,4	39,2				24,1			6,83						
				29,7	39,7				24,3			5,59						
		2,93	10,3	17,9	41,4			0,22	11,6	1,02		14						
Plagioclase	-			29,3	39,4				24,3			6,1						
		7,4		42	48,7				0,22			0,37						
		7,5	0,58	41,3	46,7			0,68	1,67			0,92						
		7,56	0,55	40,6	46,9			0,55	1,61			1,75						
Pyrite	-				0,34		48,7					49,6	0,52					
Pyrite oxy		0,65	2,22	7,63			0,32					85,7	0,77	0,76	0,62			
				0,44	0,45				0,34	94,4		0,67					1,52	
				0,42						94,9			0,61				2,73	
Grenat			2,59	20,3	50,6				6,38			35,2						
			2,79	19,7	36,1				4,98			35,3						
			2,29	20,3	36,4				6,16		0,75	33,6						
			2,55	20,1	41,8				5,5			34,7						
					0,5					50,2	0,3	47,4						
	147		2	20	36,5				9,35		1,97	29,6						
			1,44	20	36,5				10,1		2,09	29,1						
			2,46	20	36,2				5,79		2,26	32,8						
			1,85	19,7	36,9				9,19		1,6	30,3						
			3,13	20	35,9				5,53		3	31,6						
			1,3	20	36				9,1		2,6	30						
			1,2	19,7	36,5				9,32		6,25	25,7						
			1,06	18,8	37,1				9,01		5,14	26,9						
Ilménite					0,5					50,2	0,3	47,4						
			0,72		0,65					49		47,3						
					0,32					50,8		47,5			0,45			
					0,56					50		47,7						
Paragonite	124	8,17		39,7	49,4			1,21				0,6						
		7,8		40,4	49,5			1,12	0,28			0,39						
		7,85		40,1	49,2			1,23										
				0,48						98		0,61						
	147	5,89		38,3	51,9		0,24	1,4				1,57						
		6,4		39,6	51,5		0,32	0,73	0,26			0,62						
Clinozoisite	147			30,4	40,3				24,3		0,29	4,17						
				29,9	39,7				24		0,34	4,48						
				28,4	39,8				23,2		0,25	7,65						
				27,8	39,3				23,3			8,67						
				27,7	39				23,3		0,3	8,41						
				30,5	40,4				24,4		0,26	3,45						
Opagues	E9	0,1	0,6	0,9	3	2	0,2	0,2	0,7		0,4	91	0,1		0,3	0,1	0,1	0,8
		0,6	1	0,6	3	1,4	0,1		0,7		0,7	91	0,3		0,4			0,7
		0,9	1	0,8	3	1,5	0,1		0,7		0,8	90	0,1		0,4			0,7
		0,1	0,5	1	5	2	0,3	0,1	0,8		0,2	89,2	0,2	0,2	0,2		0,1	0,4
		0,8	1,2	1	4	1,7		0,1	0,6	0,2	0,3	89,2		0,2	0,1	0,2	0,1	0,7
		0,4	0,6	0,7	4	1,2	0,2		0,6		0,2	91,5		0,2	0,5			0,2
Sphene	E9	0,3		2,2	30	0,2			28	38,5		0,5						
		0,2		2	29	0,4			29	39		0,6		0,14	0,16			
				2,5	29	0,3		0,4	28	39		0,8						
		0,2		2,2	30	0,3		0,2	28	39		0,6						
Apatite				0,4	0,1	40,4			57,3			0,2	0,1		0,2			
Grenat	124		2,6	20,3	50,6				5,38			35,2						
			2,8	19,7	36,1				4,8			35,3						

Analyses microsituées sur la sidérite d'Opoblé

	Fe	Si	Ca	Mn	Al	Ba	Ti	Cu	Mg	Pb	Zn	P	S
Bord	sidérite												
53,69	0	0,52	1,58	0	0	0	n.d.	0	1,29	0	0	0	n.d.
54,42	0	1,36	2,14	0	0	0	*	0,04	1,24	0	0,23	0,33	*
55,3	0	0,76	1,5	0,01	0	0	*	0	0,63	0	0	0	*
54,92	0	0,54	1,78	0,01	0	0	*	0	0,81	1,84	0	0,09	*
53,57	0	1,05	2,13	0,02	0,11	0	*	0	1,14	0,28	0	0	*
54,78	0,63	0,56	1,66	0,14	0	0	*	0	0,82	0	0,06	0,13	*
51,43	5,35	0,12	0,97	3,18	0	0	*	0	0,5	0	3,75	0	*
55,7	1,52	0,03	1,57	0,68	0,3	0	*	0	0,24	0	3,31	0,12	*
54,24	1,33	0,01	0,96	0,69	0,17	0	*	0	0,33	0	0,56	0	*
49,84	2,78	0,08	2,54	1,38	0	0	*	0,01	0,74	0	3,55	0,02	*
53,38	0,03	0,39	1,76	0	0	0	*	0,04	0,55	0	0,12	0,02	*
48,24	6,51	0,03	1,31	5,6	0,28	0	*	0	1,76	0	0,19	0	*
51,09	1,77	0,82	1,74	1,16	0,48	0	*	0	0,55	0	0,16	0,07	*
53,55	0	0,2	1,48	0	0,05	0	*	0	0,95	0	0	0	*
46,14	0	0,04	1,07	0	0	0	*	0	0,44	2,39	0,31	0	*
48,08	0,12	0,05	1,9	0,17	0	0	*	0,05	0,31	1,6	0,62	0	*
51,95	2,34	0,08	0,7	0,98	0,01	0	*	0	0,18	0,1	2,93	0,14	*
48,43	0	0,54	1,49	0	0	0	*	0	0,79	0	0,05	0	*
52,46	0,11	0,03	1,07	0,13	0	0	*	0	0,48	0	0,11	0	*
48,31	0	0,03	2,2	0	0	0	*	0	0,41	0	2,34	0	*
50,68	5,88	0,22	1,29	3,57	0,25	0	*	0	0,67	0	2,64	0	*
52,39	0	0,04	2,02	0	0	0	*	0	0,06	0	3,85	0,08	*
40,26	10,93	0,08	1,4	7,49	n.d.	0,02	0,02	0	1,12	0	2,41	0,12	*
50,37	0,39	0,05	2,1	0,02	*	0,03	0,03	0	0,31	0	2,95	0,02	0,02
5,43	0	0,15	2,79	0,02	*	0	0	0	0,75	0,1	2,68	0,01	0,02
49,66	0,58	0,14	2,27	0,5	*	0	0	0	0,22	0,13	3,72	0,07	0,02
50,3	0,29	0,09	2,13	0,15	*	0	0	0	0,2	0	5,01	0,64	0,31
48,65	3,11	0,12	2,25	1,57	*	0	0	0	0,84	0	3,11	0,02	0,22
52,52	0,32	0,12	1,49	0,06	*	0	0	0	0,67	0,03	0,5	0	0
49,42	0,13	0,05	2,03	0,11	*	0	0	0	0,55	0,1	3,42	0	0,01
51,13	0,01	0,06	2,15	0	*	0	0	0	0,18	0	4,5	0,05	0
52,46	0,04	0,34	2,83	0,03	*	0	0	0	0,52	0	3,34	0	0,03
49,81	0,13	0,21	2,94	0,06	*	0	0	0	0,42	0,43	4,23	0,02	0,05
51,04	0,02	0,09	2,67	0	*	0,02	0	0,38	0	0	4,58	0,02	0,09
53,02	0	0,06	2,39	0,03	*	0,03	0	0,82	0,14	0	3,45	0	0,03
53,11	0,01	0,03	2,31	0	*	0	0	0	0,47	0,09	3,26	0,04	0,01
51,21	0,07	0,27	3,34	0,05	*	0	0	0	0,54	0,11	4,47	0	0
Coeur	sidérite												
54,91	0	0,82	2,01	0	0,05	n.d.	n.d.	0	0,89	0	0,05	0	n.d.
54,2	0,06	1,36	2,5	0,01	0	*	*	0	1,21	0,66	0,05	0,26	*
55,01	0,03	0,86	1,83	0,06	0	*	*	0	0,98	1,03	0,04	0	*
55,63	0	0,15	1,35	0	0	*	*	0	0,64	0,08	0,2	0	*
54,73	0	0,72	2,1	0,01	0	*	*	0	0,89	0,04	0,12	0	*
56,14	0	0,5	1,61	0,06	0	*	*	0	0,83	0	0	0,35	*
56,1	0	0,56	1,73	0,04	0,7	*	*	0	0,9	0,03	0	0,04	*
53,49	0,78	0,01	1,81	0,36	0	*	*	0	0,39	0,02	1,7	0,06	*
53,84	1,83	0,05	1,51	0,6	0	*	*	0	0,15	0	1,13	0	*
54	1,77	0,08	1,49	0,68	0	*	*	0	0,17	0	1,3	0	*
51,65	0	0,09	2,88	0,02	0	*	*	0	0,62	0	3,52	0	*
52,31	0	0,08	2,31	0	0	*	*	0	0,72	0	3,47	0,09	*
54,32	0,03	0,21	1,18	0,01	0	*	*	0,17	0,33	0,12	0,4	0	*
52,01	0,02	0,28	1,15	0,07	0	*	*	0	0,37	0	0,2	0	*
51,73	0	1,05	1,93	0	0	*	*	0	1,4	0	0	0,14	*
44,89	0	0,06	1,85	0	0	*	*	0	0,58	0,12	3,27	0	*
50,9	0	1,18	2,05	0	0	*	*	0	0,74	0	0,2	0	*
52,79	0	0,62	1,85	0,02	0	*	*	0,08	0,65	0,24	0	0,08	*
51,18	0,01	0,15	2,26	0	0,04	*	*	0,06	0,48	0	2,82	0	*
53,75	0,04	0,34	1,78	0	0,09	*	*	0,03	0,47	0	0,14	0,1	*
52,88	0,16	0,05	1,49	0,11	0,04	*	*	0	0,24	0	1,62	0,04	*
50,43	0,51	0,05	1,92	0,1	0	*	*	0,05	0,12	0	1,96	0,06	*
49,99	0	0,08	1,34	0,03	0	*	*	0,03	0,19	0	1,93	0,03	*
48,39	0,02	0,06	1,77	0,04	0	*	*	0,08	0,21	0	2,32	0	*
Joint	sidérite												
53,91	0	1,42	1,9	0,01	0	*	*	0,12	0,85	0,22	0,37	0	*
55,22	0,33	0,59	1,71	0,12	0	*	*	0	0,92	1,09	0	0,53	*
54,24	0	0,77	0	0	0	*	*	1,25	0	0,12	0,12	0	*
54,32	0,03	0,79	1,74	0	0,08	*	*	0	1,09	0,52	0,01	0,96	*
54,29	0	0	1,52	0,03	0	*	*	0	1,04	0	0,68	0,11	*
53,67	0,03	0,28	1,15	0,07	0	*	*	0	0,37	0	0,2	0	*
44,83	0,12	0,08	1,11	0,08	0	*	*	0	0,28	0	0	0	*

Analyses microsituées sérieées dans la sidérite d'Opoblé (1)

Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total	Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total
1	1,14	0	0,45	2,22	97,22	0,07	101,1	73	1,21	0	1,07	3,26	91,3	0,6	97,44
2	1,15	0	0,24	2,41	96,44	0,42	100,7	74	1,2	0,05	1,07	3,3	92,5	0,44	98,6
3	1,14	0,01	0,32	2,04	97,32	0,23	101,1	75	1,17	0	0,44	2,07	95,8	0,16	99,6
4	1,54	0,04	0,84	2,12	96,39	0,14	100,7	76	1,2	0	1,01	3,07	93,15	0,5	98,9
5	1,17	0,06	1,43	2,85	94,17	0,11	99,8	77	1,15	0	0,4	2,05	97,3	0,14	101
6	1,19	0	1,65	3,03	93,09	0,04	99,02	78	1,13	0	0,51	2,27	96,65	0	101,7
7	1,17	0	1,2	3	94,07	0,24	99,69	79	1,15	0	0,45	2,3	96,92	0	100,8
8	1,17	0	1,69	3,32	93,21	0,17	99,6	80	1,13	0	0,46	2,3	97,53	0	101,4
9	1,22	0,03	2,64	3,46	90,2	0,01	97,59	81	1,15	0,15	0,5	1,77	97,1	0	100,6
10	1,19	0,06	1,84	3,5	92,16	0	98,77	82	1,15	0	0,6	1,49	97,4	0	100,7
11	1,18	0	1,77	3,37	92,86	0,07	99,27	83	1,14	0	0,52	1,43	97,9	0,18	101,2
12	1,17	0	1,61	2,76	94,11	0	99,66	84	1,13	0	0,35	1,99	98,14	0,04	101,7
13	1,2	0,04	1,77	3,23	91,88	0,1	98,25	85	1,15	0	0,81	2,39	96,27	0,18	100,8
14	1,21	0	1,58	3,16	91,72	0,1	97,78	86	1,14	0	0,52	1,91	97,46	0,06	101,1
15	1,18	0,01	1,44	2,93	93,49	0	99,07	87	1,12	0	0,42	2,05	98,53	0,11	102,3
16	1,18	0,02	1,76	2,99	93,4	0,02	99,39	88	1,16	0,08	0,72	2,45	95,67	0,22	100,3
17	1,19	0,11	1,8	3,27	92,27	0	98,66	89	1,15	0	0,59	2,18	96,42	0,15	100,5
18	1,18	0	1,36	2,72	94,13	0	99,4	90	1,2	0	1,18	3,22	92,19	0,44	98,24
19	1,17	0	1,74	2,85	94,18	0,03	99,99	91	1,21	0	1,32	3,68	91,02	0,54	97,79
20	1,18	0	1,71	3	93,52	0	99,43	92	1,22	0	1,28	3,64	90,02	0,71	96,88
21	1,22	0	1,24	4,03	90,16	0,63	97,3	93	1,19	0,04	1,32	3,54	91,71	0,62	98,45
22	1,2	0,02	1,39	3,67	91,64	0,49	98,43	94	1,22	0,09	1,12	3,8	90,18	0,64	97,07
23	1,19	0	1,37	3,02	92,84	0,29	98,72	95	1,2	0	1,21	4,05	90,64	1,03	98,14
24	1,19	0	1,23	2,53	93,78	0,12	98,87	96	1,2	0,05	1,34	3,84	90,56	0,96	97,97
25	1,18	0	1,57	2,88	93,4	0,05	99,11	97	1,2	0,04	1,27	3,75	91,25	0,84	98,37
26	1,18	0	1,6	2,96	93,49	0,11	99,35	98	1,19	0,01	1,18	4	90,81	1,23	98,45
27	1,2	0,16	1,2	2,98	92,26	0,2	98,02	99	1,19	0,02	1,12	3,69	92,1	0,68	98,82
28	1,18	0	1,41	3,33	92,26	0,34	99,23	100	1,18	0	1,01	3,18	92,99	0,51	98,89
29	1,16	0	0,93	2,43	95,35	0,1	100	101	1,19	0	1,28	3	92,93	0,1	98,52
30	1,16	0	0,51	1,99	96,53	0,2	100,4	102	1,17	0	1,13	2,49	94,82	0,09	99,91
31	1,14	0,16	0,47	1,87	97,17	0,06	100,9	103	1,14	0	0,52	1,76	97,2	0,38	101
32	1,6	0,01	1,21	2,36	95,47	0,33	100,5	104	1,14	0	0,5	1,99	97,52	0,03	101,2
33	1,17	0	0,79	2,33	93,28	2,18	99,77	105	2,79	0	7,99	0,2	4,87	0,07	15,93
34	1,16	0	1,01	3,67	87,95	6,32	100,1	106	1,66	0,01	4,54	2,26	61,57	4,31	74,38
35	1,16	0,08	0,8	5,45	83,35	8,8	99,66	107	1,16	0,06	0,44	3,73	90,66	4,06	100,1
36	1,16	0	0,78	5,55	84,56	7,77	99,84	108	1,14	0	0,2	4,14	88,51	6,91	100,9
37	1,17	0	0,85	5,62	85,3	6,44	99,4	109	1,15	0	0,59	4,15	85,3	8,94	100,2
38	1,16	0	1,68	4,71	87,46	5,22	100,3	110	1,19	0	0,68	2,92	89,79	4,02	98,61
39	1,16	0,08	0,91	2,92	91,56	3,36	100	111	1,15	0,02	0,39	3,41	94,61	0,94	100,5
40	1,17	0	0,93	3,28	90,51	3,94	99,84	112	1,18	0,02	0,28	2,24	95,36	0,11	99,21
41	1,16	0,11	0,78	1,91	95,95	0,15	100,1	113	1,15	0	0,44	2,03	97,33	0	101
42	1,21	0	1,63	2,96	91,83	0,11	97,76	114	1,21	0,09	1,77	3,8	90,3	0,41	97,6
43	1,2	0,05	1,26	2,61	92,64	0,12	97,9	115	1,2	0	1,37	3,74	91,1	0,79	99,2
44	1,21	0	1,56	3,24	91,58	0,23	97,83	116	1,2	0	1,44	3,63	91,2	0,43	98
45	1,21	0,06	1,58	2,94	91,88	0,12	97,82	117	1,16	0	0,87	2,79	95,1	0,19	100,1
46	1,22	0,15	1,76	3,47	90,5	0,22	97,34	118	1,13	0	0,34	2,24	97,49	0,16	101,4
47	1,18	0,04	1,4	3,23	92,99	0,18	99,05	119	1,13	0,1	0,41	2,12	97,67	0,17	101,7
48	1,21	0	1,54	3,69	90,84	0,43	97,72	120	1,14	0	0,49	1,94	97,18	0,19	101
49	1,23	0,07	1,8	3,68	89,85	0,29	96,94	121	1,13	0	0,5	1,67	98,24	0,14	101,7
50	1,22	0	1,83	3,59	90,64	0,19	97,49	122	1,13	0	0,55	1,67	98,25	0,02	101,7
51	1,21	0,02	1,48	3,07	91,89	0,01	97,7	123	1,13	0	0,62	1,7	98,28	0,12	101,9
52	1,2	0	1,62	2,94	92,61	0	98,32	124	1,12	0,1	0,35	2,01	98,29	0,05	101,9
53	1,21	0	1,67	3,29	91,55	0,02	97,76	125	1,18	0	1,04	3,48	92,58	0,67	98,97
54	1,19	0,04	1,67	3	92,9	0	98,82	126	1,21	0,07	1,18	4	89,76	1,08	97,52
55	1,18	0,07	1,77	3	93,08	0,08	99,2	127	1,88	0	1,28	4,05	91,31	1,13	98,97
56	1,2	0	1,88	2,9	92,41	0	98,41	128	1,19	0,01	1,33	4,08	91,15	0,82	98,61
57	1,19	0,04	1,42	3,09	93,15	0,05	98,96	129	1,21	0	1,21	3,54	90,97	0,79	97,74
58	1,21	0,03	2,24	2,97	91,49	0	97,96	130	1,19	0,06	1,39	4,12	90,68	0,97	98,44
59	1,18	0	1,27	2,69	93,96	0,05	99,17	131	1,21	0	1,25	4,07	90,13	1	97,78
60	1,2	0	1,6	2,84	92,69	0,15	98,49	132	1,14	0	0,56	2,15	97,31	0,1	101,3
61	1,18	0	1,4	3,36	92,72	0,45	99,13	133	1,15	0,02	0,39	2,15	97,06	0,03	100,8
62	1,15	0,02	1,15	2,49	95,61	0,47	100,9	134	1,14	0,03	0,37	2,23	97,06	0,04	100,9
63	1,16	0	0,71	1,68	96,4	0,18	100,1	135	1,15	0	0,3	2,31	96,99	0,02	100,8
64	1,16	0,02	0,53	1,67	96,71	0	100,1	136	1,15	0	0,86	2,35	96,49	0,05	100,9
65	1,18	0	1,29	2,53	94,38	0	99,39	137	1,14	0	0,87	1,84	97,54	0,08	101,5
66	1,18	0	1,3	2,62	93,88	0,03	99,04	138	1,13	0,02	0,49	2,29	97,84	0,1	101,9
67	1,18	0,04	2,25	2,65	93,26	0	99,39	139	1,13	0	0,27	2,31	97,58	0,13	101,4
68	1,19	0	1,47	2,56	93,46	0,06	98,76	140	1,14	0,02	0,42	2,18	97,22	0,03	101
69	1,14	0	0,49	1,73	97,56	0,03	100,1	141	1,31	0	0,47	2,28	97,73	0,05	101,2
70	1,19	0	0,63	2,4	94,44	0,13	98,8	142	1,14	0,08	0,42	2,19	97,27	0,04	101,2
71	1,21	0,03	1,24	3,7	90,5	0,8	94,5	143	1,21	0,02	3,41	3	90,61	0	98,27
72	1,21	0	1,26	3,7	90,8	0,7	97,6	144	1,15	0	0,73	2,72	95,82	0,29	100,7

Analyses microsituées sériées dans la sidérite d'Opoblé (2)

Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total	Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total
145	1,14	0,03	1,23	2,75	95,69	0,22	101,1	217	1,15	0	0,88	1,94	96,92	0,17	101,1
146	1,19	0,04	1,9	3,09	92,39	0,07	98,7	218	1,15	0	1	1,88	96,66	0,35	101,1
147	1,2	0,05	2	3,19	91,33	0,3	98,07	219	1,14	0	0,75	1,9	97,57	0	101,4
148	1,21	0	1,82	3,29	91,04	0,26	97,64	220	1,15	0	0,65	2,66	95,63	0,68	100,8
149	1,18	0	1,38	3,04	93,32	0,17	99,11	221	1,12	0	0,55	2,44	98,2	0	102,4
150	1,18	0	1,69	2,87	93,66	0,02	99,44	222	1,14	0	0,36	2,9	94,78	1,98	101,2
151	1,2	0	1,64	2,66	92,52	0,12	98,16	223	1,16	0	0,45	2,7	91,63	4,12	100,1
152	1,19	0	1,49	2,9	93,22	0,06	98,87	224	1,14	0	0,55	2,85	92,35	4,31	101,2
153	1,19	0,11	1,7	2,84	93,04	0	98,9	225	1,15	0	0,75	2,3	94,61	1,94	100,8
154	1,18	0,08	1,52	2,9	93,76	0,01	99,48	226	1,18	0	1,6	3,2	92,99	0	99,11
155	1,21	0	1,48	3,7	90,51	0,6	97,6	227	1,18	0	2,23	3,55	92,18	0,15	99,3
156	1,2	0	1,15	3,6	91,6	0,5	98,07	228	1,18	0	1,94	3,37	92,74	0	99,31
157	1,2	0	1,1	3,3	92,6	0,44	98,65	229	1,17	0,14	1,7	3,68	92,86	0,4	99,96
158	1,2	0	1,31	3,3	92,71	0,27	98,8	230	1,17	0	1,54	3,8	93,2	0,39	100,1
159	1,2	0	1,3	3,3	92,75	0,25	98,81	231	1,17	0	1,56	3,43	93,24	0,28	99,68
160	1,2	0,1	1,82	3,3	91,86	0,2	98,5	232	1,16	0	1,66	3,46	93,74	0,31	100,4
161	1,2	0	2	3,34	91,93	0	98,5	233	1,19	0	2,7	3,45	91,64	0,13	99,11
162	1,2	0	1,92	3,41	90,72	0	97,33	234	1,18	0	2,48	3,1	93	0	99,8
163	1,16	0	0,64	2,18	96,03	0	100	235	1,18	0	1,88	3,42	93,08	0	99,58
164	1,15	0	0,37	2,33	97,03	0	100,6	236	1,18	0	1,8	3,42	92,68	0	99,2
165	1,15	0	0,44	2,36	97,58	0	101	237	1,18	0	1,45	3,58	92,82	0,29	99,35
166	1,15	0	0,32	2,18	97,09	0,15	101	238	1,18	0	1,62	3,13	93,08	0	99,11
167	1,13	0	0,36	2,33	97,77	0	101,6	239	1,19	0	2,23	3,79	91,8	0	99,15
168	1,14	0	0,35	2,05	97,54	0,1	101,3	240	1,2	0	2,24	3,91	90,7	0,12	98,24
169	1,13	0	0,26	2,4	97,71	0	101,5	241	1,21	0	2,04	3,88	90,77	0	97,93
170	1,15	0,1	0,24	2,28	96,88	0	100,7	242	1,17	0	1,92	3,74	92,82	0	99,67
171	1,13	0	0,52	2,31	97,51	0	101,5	243	1,19	0	2	3,54	92,05	0	98,84
172	1,14	0,2	0,47	2,16	96,96	0,11	101	244	1,17	0	1,93	3,56	93	0	99,69
173	1,73	0	0,35	1,96	98,41	0	101,9	245	1,2	0	2,32	3,45	91,33	0	98,4
174	1,15	0	0,4	2,05	97,17	0	100,8	246	1,18	0	1,86	2,98	93,54	0	99,68
175	1,15	0,11	0,35	2,1	96,98	0,1	100,8	247	1,17	0	1,64	2,83	94,15	0	99,8
176	1,14	0	0,3	2,07	97,53	0	101,2	248	1,16	0	1,52	2,82	95	0	100,6
177	1,14	0	0,37	2,13	97,27	0,22	101,2	249	1,16	0	2,03	2,8	94,34	0	100,4
178	1,11	0	0,31	2,14	97,47	0,92	102	250	1,15	0	1,68	2,64	95,05	0,11	100,7
179	1,13	0	0,41	2,5	96,72	0,79	101,6	251	1,16	0	2,5	2,98	93,73	0	100,4
180	1,11	0,14	0,92	3	96,74	0,65	102,6	252	1,16	0	1,41	2,78	95,06	0	100,4
181	1,14	0,1	0,92	2,05	96,81	0,36	101,4	253	1,18	0	2,04	2,97	93,17	0	99,37
182	1,13	0	1,08	2,69	96,07	0,84	101,8	254	1,2	0	1,59	3,12	92,45	0	98,41
183	1,15	0	0,84	2	96,25	0,61	100,9	255	1,19	0	1,33	3,8	92,08	0,26	98,7
184	1,14	0	0,49	1,88	97,6	0,11	101,2	256	1,2	0	1,89	3,9	91,17	0,23	98,4
185	1,19	0	1,08	3,1	93,1	0,3	98,85	257	1,19	0	1,06	2,9	93,41	0,19	98,77
186	1,2	0	1,06	3,17	92,5	0,31	98,3	258	1,18	0	1,92	3,53	92,65	0	99,38
187	1,19	0	1,08	3,3	92,72	0,57	98,91	259	1,19	0,12	1,92	3,5	92,02	0	98,86
188	1,23	0	1,43	3,65	90,11	0,38	96,81	260	1,22	0	2,34	3,61	90,25	0	97,43
189	1,23	0	1,67	3,78	89,84	0,38	96,91	261	1,18	0	1,61	3,05	93,31	0	99,26
190	1,68	0	1,07	2,6	94,94	0,26	100	262	1,15	0	1,68	2,89	95,16	0	100,9
191	1,15	0	0,45	1,7	97,21	0	100,6	263	1,18	0	1,78	3,17	93,38	0	99,6
192	1,15	0	0,56	1,86	96,85	0,11	100,6	264	1,18	0	1,81	3,5	93,16	0	99,66
193	1,15	0	0,63	1,85	96,84	0	100,5	265	1,21	0	1,63	3,83	90,94	0,33	97,95
194	1,14	0	0,47	1,88	97,35	0,14	101	266	1,19	0	1,51	3,61	92,33	0,22	98,89
195	1,14	0	0,33	2,26	97,12	0,11	101	267	1,18	0	1,84	3,47	92,94	0	99,46
196	1,13	0	0,31	2,34	97,5	0,13	101,4	268	1,19	0	2,21	3,83	91,62	0,13	99
197	1,15	0	0,33	2,13	97,07	0,14	100,8	269	1,19	0	1,19	3	92,98	0,27	98,64
198	1,14	0	0,23	2,2	97,61	0	101,3	270	1,19	0,1	1,01	2,88	93,55	0,1	98,84
199	1,14	0	0,54	2,23	97	0	101	271	1,2	0	1,28	3,15	92,73	0	98,38
200	1,16	0	0,37	2,18	96,65	0,12	100,5	272	1,2	0	2,13	3,18	91,73	0	98,32
201	1,13	0	0,36	2,16	97,44	0	101,2	273	1,19	0	1,8	2,86	93,23	0	99,07
202	1,15	0,11	0,24	2,15	97,07	0,11	100,9	274	1,17	0	1,53	2,84	94,28	0	99,87
203	1,15	0	0,64	1,76	97,26	0,21	101	275	1,15	0	1,73	2,93	95,3	0	101,1
204	1,18	0	1,16	2,49	94,49	0,2	99,49	276	1,18	0	1,79	2,8	93,48	0	99,27
205	1,2	0	1,96	3,32	91,91	0	98,43	277	1,19	0	2,26	2,83	92,43	0	98,73
206	1,2	0	2,31	3,38	91,64	0	98,59	278	1,2	0	2,23	3,06	92,05	0	98,55
207	1,15	0	0,8	2,18	96,75	0,12	101	279	1,2	0	2,01	3,41	91,74	0	98,4
208	1,14	0	0,4	1,83	97,66	0,13	101,2	280	1,21	0	2,35	3,7	90,33	0	97,68
209	1,15	0	0,4	1,9	97,41	0	100,9	281	1,18	0	1,69	3,32	93,32	0	99,56
210	1,14	0	0,31	2,11	97,59	0	101,2	282	1,64	0	1,53	3,14	94,5	0	100,3
211	1,13	0	0,4	2,17	97,71	0	101,6	283	1,18	0	2,2	3,54	92,78	0	99,74
212	1,13	0	0,47	2,32	97,68	0	101,6	284	1,18	0	2,28	3,85	92,17	0	99,66
213	1,14	0	0,42	2,07	97,56	0,1	101,3	285	1,21	0	1,58	3,4	91,6	0,11	97,92
214	1,15	0	0,61	2,22	96,92	0	101	286	1,19	0	1,58	2,98	92,9	0	98,74
215	1,14	0	0,48	2,17	97,33	0	101,1	287	1,18	0	1,71	3,24	92,98	0,13	99,3
216	1,14	0	0,91	2,42	96,38	0,5	101,4	288	1,17	0	1,28	3,22	93,98	0,34	100

Analyses microsituées sériées dans la sidérite d'Opoblé (3)

Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total	Points	CO2	Y2O3	MgO	MnO	FeO	ZnO	Total
289	1,18	0	1,26	3,18	93,61	0,2	99,44	361	1,12	0	0,89	5,26	89,08	5,61	102
290	1,16	0	1,02	2,71	94,96	0,2	100,2	362	1,12	0	0,94	4,74	88,88	6,6	102,4
291	1,15	0	0,63	2,2	96,55	0,19	100,7	363	1,1	0,1	0,47	3,6	90,85	6,77	102,9
292	1,15	0	0,4	1,96	97,2	0,16	100,9	364	1,11	0	0,6	4,01	87,71	8,91	102,3
293	1,24	0	0,74	1,97	91,87	0	95,92	365	1,1	0	0,97	3,25	92,42	5,16	102,9
294	1,15	0	0,56	1,91	96,7	0,17	100,5	366	1,1	0	0,35	2,73	94,81	3,8	102,8
295	1,18	0	0,5	2,23	94,77	0,21	98,9	367	1,1	0	0,25	3,55	96,23	1,97	103,2
296	1,3	0	0,43	2,42	87,94	0,91	93,02	368	1,09	0,12	0,82	3,28	98,16	0,66	104,2
297	1,15	0	0,52	2,46	95,68	0,78	100,6	369	1,09	0	0,28	2,33	99,57	0,36	103,7
298	1,16	0,11	0,36	2,5	94,61	1,21	99,97	370	1,09	0,18	0,35	2,2	99,5	0,34	103,7
299	1,22	0	0,54	3,51	87,02	4,6	96,98	371	1,14	0,11	1,7	3,73	94,15	0,54	101,4
300	1,17	0,1	1,04	3,8	86,54	6,61	99,28	372	1,15	0	1,88	3,64	93,81	0,51	101
301	1,14	0	0,58	2,32	95,12	2,07	101,2	373	1,13	0	1,46	3,12	96,07	0,4	102,2
302	1,14	0	0,73	1,83	97,13	0,23	101,1	374	1,12	0,13	1,04	2,63	97,36	0,3	102,6
303	1,15	0	0,46	1,68	97,28	0,12	100,7	375	1,12	0	0,99	2,45	97,86	0,16	102,6
304	1,16	0	0,73	2,15	95,7	0,19	99,94	376	1,1	0	0,42	1,66	100	0	103,3
305	1,15	0	1,06	2,42	95,94	0	100,6	377	1,09	0	0,32	1,81	100,4	0,2	103,8
306	1,17	0	1,88	2,59	94,39	0	100,1	378	1,07	0,11	0,43	1,8	101,2	0,24	104,9
307	1,17	0	1,47	2,57	94,7	0	99,96	379	1,1	0	0,4	1,74	99,45	0,25	103
308	1,15	0	1,26	2,8	95,67	0	100,9	380	1,1	0	0,8	2,24	98,6	0,31	103,1
309	1,18	0	1,7	2,67	93,78	0	99,41	381	1,09	0,23	0,86	2,28	99,59	0,11	104,2
310	1,17	0	1,35	2,5	94,7	0	99,71	382	1,1	0	0,81	1,88	99,2	0,27	103,3
311	1,47	0	1,53	2,23	78,93	0,15	84,32	383	1,11	0	2,03	2,5	96,61	0,7	103
312	1,2	0	1,7	2,54	92,8	0	98,3	384	1,1	0	0,9	2,4	95,53	3,01	103
313	1,16	0	1,42	2,73	95,2	0	100,6	385	1,1	0	1,14	3,48	90,9	6,63	103,3
314	1,17	0	1,35	2,57	94,76	0	99,9	386	1,11	0,11	1,02	3,9	90,12	6,34	102,6
315	1,15	0	1,3	2,57	95,62	0	100,7	387	1,1	0	1,41	4,35	91,18	5,05	103,1
316	1,18	0	1,25	2,76	94,18	0,11	99,5	388	1,12	0	1,53	4,65	90,15	4,93	102,5
317	1,16	0	1,36	2,68	95,1	0	100,4	389	1,12	0,25	0,98	4,24	89,52	5,95	102,1
318	1,16	0	1,64	2,67	94,95	0	100,6	390	1,14	0	1,05	3,34	90	5,79	101,3
319	1,17	0	2,13	2,6	94,11	0	100	391	1,11	0,13	1,34	2,28	96,15	2,01	103
320	1,16	0	1,75	2,5	95,07	0,12	100,6	392	1,09	0	0,67	1,97	99,7	0,27	103,7
321	1,16	0,12	1,09	2,52	95,85	0,18	100,9	393	1,1	0	0,56	1,74	99,82	0,23	103,5
322	1,15	0	1,45	3,37	93,02	0,31	99,34	394	1,12	0	0,8	2,4	97,9	0,18	102,4
323	1,18	0	1,04	3,27	93,3	0,55	99,4	395	1,13	0	1,5	2,73	96,56	0,17	102,1
324	1,11	0	0,13	3,45	93,77	3,93	102,5	396	1,15	0	2,25	3,18	94,69	0	101,3
325	1,1	0	0,1	4,87	91,88	5,23	103,2	397	1,13	0,13	1,4	2,71	96,37	0,12	101,9
326	1,1	0	0,37	5	90,82	5,54	102,9	398	1,13	0	1,53	2,71	96,08	0,33	101,8
327	1,11	0	0,4	5,01	90,53	5,38	102,5	399	1,14	0	1,98	2,86	95,4	0,17	101,5
328	1,09	0	0,1	4,46	92,3	5,36	103,4								
329	1,08	0,21	0,15	4,14	93,21	5,06	103,9								
330	1,08	0	0,2	4,3	93,12	5,04	103,8								
331	1,09	0	0,21	4,06	93,32	4,75	103,5								
332	1,08	0	0,2	4,11	93,28	5,19	103,9								
333	1,11	0	0,63	4,43	87,74	8,6	102,6								
334	1,09	0	0,65	5	87,8	8,93	130,6								
335	1,1	0	0,5	3,43	91,75	6,09	102,9								
336	1,09	0,2	0,42	2,42	95,71	3,71	130,6								
337	1,04	0	0,33	3,51	87,15	2,51	103,6								
338	1,09	0	0,12	3,48	97,17	1,7	103,6								
339	1,09	0	0,46	3,09	98,28	0,99	104								
340	1,13	0	1,25	3,26	95,6	0,36	101,6								
341	1,14	0	1,66	3,56	94,24	0,7	101,4								
342	1,12	0	1,65	3,46	96,02	0,65	102,6								
343	1,12	0	1,49	2,68	96,75	0,18	102,2								
344	1,12	0	1,83	2,83	96,68	0,18	102,7								
345	1,13	0,26	2,26	3,06	95,24	0,1	102,1								
346	1,14	0,16	2,22	3	94,91	0,12	101,6								
347	1,15	0	2,21	3	94,78	0	101,2								
348	1,13	0	2,18	3,04	95,56	0,14	102,1								
349	1,13	0,17	2,4	2,88	95,13	0,11	101,9								
350	2,34	0,11	0,43	0,91	33,85	0,1	37,76								
351	2,97	0	0	0	1,64	0	4,78								
352	2,97	0,1	0	0	1,23	0,11	4,46								
353	2,98	0	0	0	1,16	0	4,22								
354	1,54	0,11	0,22	1,85	72,6	3,75	80,06								
355	1,23	0	0,18	2,66	88,56	3,38	96,06								
356	1,12	0	0,25	2,9	93,72	3,95	102,1								
357	1,18	0	0,37	2,91	90,37	4,13	98,98								
358	1,09	0	0,45	3,35	93,6	4,92	103,5								
359	1,1	0	0,81	4,04	91,75	5,16	102,9								
360	1,09	0	0,98	4,32	92,23	4,96	103,6								

Analyses microsituées sur goethites et hématites des faciès oxydés (1)

Num. éch.	Faciès	FeO	P2O5	TiO2	CaO	SiO2	CaO	ZnO	Al2O3	PbO	MnO	MgO	SO2	BaO	Na2O	K2O		
CB 17		68,93				3,67			1,97						0,1			
		66,67				7,67	0,1	2,04	2,17		0,27				0,47	0,16		
		70,26		0,6		4,19		2,28	0,05			0,05			0,07			
		70,77				5,05		2,73										
		70,48				4,47	0,06	2,28							0,17			
		71,51				2,67	0,08	2,04	0,16		0,39	0,1						
		65,15				6,65	0,13	1,55							0,13			
		66,57				4,99		2,18			0,13				0,13			
		60,13				6,74		1,98										
		67				3,99		2,31								0,18		
		60,49					13,15		2,17	0,13						0,22		
	CB 18		65,45				4,65		2,15	0,38								
			68,92				4,65		1,75		0,66					0,22		
			61,57				4,93		1,94	0,12								
			60,62		0,1		5,7		0,99									
			67,15				6,48		2,1			0,14	0,11			0,16		
			68,11				4,79		1,74									
		67,4				5,28		2,75										
		66,68				4,09		0,95	0,18						0,17			
		63,84				3,09		1,64	2,24						0,83	0,21		
		66,39				3,96		2,2	0,15						0,1			
		66,69				4,04		1,95										
		67,29				4,22		2,14										
PTOG70A	A	66,94	0,04	0,01	0	1,65	0,29	0,42	0,3	0,08	1,3	0,03	0,07					
		70,66	0,06	0,06	0,01	2,52	0,19	0,26	1,06	0	1,46	0,18	0,11					
		59,75	0,09	0	0	15,39	0,06	0,1	3,68	0	0,26	0,46	0,2					
		74,21	0,08	0	0,08	1,54	0,24	0,32	0,38	0,05	1,92	0,05	0					
		74,21	0,2	0	0	1,99	0,45	0,35	0,34	0	1,16	0,06	0,11					
		73,44	0	0,04	0	0,85	0,06	0	0,41	0	1,06	0,07	0,14					
		68,16	0,18	0	1,1	0,22	0,07	0,15	0	1,07	0	0,16						
		66,17	0	0,03	0	1,77	0,2	0,29	1,3	0	3,81	0,12	0,19					
PTOG70B		59,34	0,18	0	0	4,29	0,41	0,06	0,69	0	3,31	0,08	0					
PTOG70A	B	70,75	0	0,11	0,05	1,61	0,24	0,16	0,22	2,73	0,52	0,12	0,05					
		72,32	0,13	0	0	1,57	0	0,35	0,26	0,2	0,91	0	0,12					
		71,07	0	0,25	0,14	1,4	0,41	0,27	0,19	0,02	0,78	0,11	0,22					
		70,63	0	0	0,13	1,44	0,24	0	0,35	0,23	0,47	0,13	0					
		71,09	0,22	0	0,02	3,61	0,36	0,44	0,1	0,63	0,35	0,09	0,1					
		71,09	0,38	0	0	2,02	0,17	0,12	0	0	0,25	0	0,05					
		72,45	0,12	0	0	2,99	0,27	0,57	0,06	0,25	0,32	0,04	0,41					
		72,06	0	0	0	2,37	0,12	0,21	0,17	0,24	0,44	0,01	0					
		66,98	0,07	0	0	2,57	0,3	0,02	0,08	0,15	0,49	0,02	0,14					
		71,92	0,24	0,13	0	3,79	0,33	0,31	0,06	0	0,35	0,09	0					
		75,57	0,15	0	0	2,96	0,28	0	0,03	0	0,1	0,03	0					
		75,67	0,22	0	0	3,43	0,31	0,17	0,28	0,22	0,37	0,19	0,18					
		69,72	0,1	0,05	0	2,67	0,34	0	0,09	0,02	0,16	0	23,18					
		73,85	0,32	0,03	0,02	2,12	0,14	0	0,01	0,19	0,28	0,07	0,07					
		72,98	0,37	0	0	2,04	0,18	0,11	0,13	0,29	0,31	0,02	0,06					
		71,71	0,08	0	0	1,95	0,2	0,33	0,03	0,06	0,33	0,08	0					
		72,07	0,29	0	0,05	1,76	0,08	0	0,24	0	0,14	0	0					
		72,97	0,15	0	0	2,55	0,21	0,26	0,34	0	1,97	0	0,08					
		75,04	0,22	0,01	0	2,98	0,28	0,08	0,34	0	0,65	0,11	0,16					
		69,85	0,34	0	0	1,58	0,29	1,7	1,6	0	0,97	0	0,05					
	PTOG70A	C	73,7	0,23	0,01	0	1,66	0,28	0,26	0,06	0	0,39	0,03	0				
			72,89	0,23	0	0,02	1,36	0,25	0	0,08	0,23	0,34	0,06	0				
			75,8	0,17	0	0	1,18	0,17	0,24	0,09	1,070,3:	0,08	0,04	0,04				
			71,83	0,26	0,05	0	1,3	0	0	0,1	0	0,17	0,02	0,22				
		E		70,64	0,17	0	0,04	2,09	0	0,52	0,47	0	0,66	0,07	0,16			
				70,23	0,18	0	0	1,44	0,22	0,03	0,24	0,29	0,76	0,14	0,03			
				67,51	0,2	0,05	0	0,88	0	0,13	0,13	0,21	0,75	0	0,12			
		71,13	0,44	0	0,08	1,58	0,12	0,26	0,31	0,34	0,47	0,11	0					
		71,24	0	0	1,16	0	0	0	0	0,49	0	0,08						
		73,13	0,34	0	0,16	2,45	0,11	0	0,53	0	0	0,08	0,28					
		77,02	0,14	0,06	0	1,28	0	0,25	1,07	0	0,09	0,09	0,39					
		73,51	0	0	0	1,27	0,1	0,26	0,28	0	0,02	0	0,44					
		80,08	0,16	0	0,07	0,78	0	1,16	0,16	0	0,25	0	0,45					
		80,44	0,16	0	0	0,68	0	1,22	0,1	0	0,25	0	0,67					
		78,99	0	0	0	0,46	0	0,99	0,2	0,23	0,54	0,06	0,45					
	79,51	0	0	0,02	0,23	0	0,93	0,14	0	0,58	0	0,5						
	79,87	0	0,04	0	0,92	0	0,81	0,12	0,24	1,26	0,11	0,5						
	80,55	0	0	0	0,29	0	1	0,05	0	0,9	0,07	0,67						
	80,27	0,13	0,01	0	0,68	0	0,82	0,11	0	0,5	0	0,58						
	68,22	0,04	0,01	0	0,44	0	3,69	0,59	0	2,88	0,04	0,48						
	78,79	0,05	0	0,13	0,52	0,03	0,65	0,23	0	0,34	0,09	0,32						
TOG30	G	69,09	0	0,01	0	0,8	0	1,46	0,05	0,11	0,31	0	0,04					
		70,24	0,05	0,01	0	1,5	0,05	0,94	0	0,4	0,37	0,06	0					
		69,65	0	0	0	0,98	0	1,14	0	0	0,3	0,06	0					
		67,63	0	0	0	1,41	0	1,33	0,03	0,11	0,64	0	8,98					
		63,35	0	0	0	1,58	0,02	1,28	0,02	0	1,81	0	0,11					
		66,16	0,16	0,1	0	1,57	0,01	1,25	0	0,22	1,02	0,03	0,12					

Analyses microsituées sur goethites et hématites des faciès oxydés (2)

TOG30		67,36	0	0	0	1,63	0	0,73	0,01	0,04	0,56	0	0,09
TOG30	H	69,12	0,15	0	0,1	1,94	0,07	1,02	0,08	0	0,23	0,04	0,05
TOG30	I	68,16	0,62	0,02	0,08	2,02	0,02	0,9	1,02	0,06	0,19	0,06	0,02
		73,28	0,06	0	0	1,25	0,04	0,54	0,47	0,18	0,3	0,04	0,11
		70,78	0,41	0	0	2,57	0,22	0,66	0,72	0	0,16	0,18	0,16
		72,13	0,46	0	0	1,18	0	0,75	1,43	0,31	0,15	0,14	0,15
		71,3	0,2	0	0	2,99	0,12	0,99	1,56	0	0,22	0,24	0,04
		71,92	0,25	0	0,03	1,25	0,04	0,89	0,59	0	0,21	0	0
TOG30	k	65,91	0	0,04	0,15	2,78	0,02	0,45	0,45	0,29	0	0,08	0,32
		70,79	0,1	0	0	1,64	0	0	0,01	0	0	0,01	0,07
		60,77	0,03	0	0	0,53	0,04	0,22	0,57	0,23	0	0,06	0,4
		66,45	0,09	0,04	0	1,2	0,04	3,2	0,68	0,13	4,12	0,2	0,08
		70,56	0,03	0	0,11	1,18	0,03	2,24	0,37	0	2,93	0	0,29
		77,88	0,04	0	0	1,31	0	1,44	0,53	0,37	0,76	0	0,31
		70,42	0	0	0	1,75	0,04	1,15	0,45	0,1	0,65	0,04	0,26
		72,86	0	0	0,14	1,68	0,03	1	0,55	0	0,9	0	0,14
		56,66	0,04	0	0,05	0,57	0,08	1,04	0,3	0,06	0,36	0,04	0,27
		45,07	0,08	0,05	0	0,5	0	0,97	0,23	0,09	0,45	0	0,2
		46,71	0	0	0	0,85	0	0,65	0,24	0	0,32	0	0,24
		76,2	0,06	0,6	0	1,83	0	390,61	0	0,58	0	0,3	
		44,6	0,28	0	0,2	1,44	0,13	0,78	0,23	0	0	0,15	0,37
		72,08	0	0	0,06	0,42	0	1,95	0,04	0	0	0	0,28
TOG30	L	67,76	0	0,05	0	1,94	0	1,17	0,05	2,74	0,11	0,07	0
		69,56	0	0	0	2,21	0,09	1,35	0,01	0,31	0,27	0	0,17
		69,83	0,08	0	0,06	1,83	0	1,01	0	0	0,14	0,08	0
		69,69	0	0,01	0	1,68	0	1,19	0,01	0,2	0,05	0,03	0,05
		47,7	0	0	0	1,53	0,07	0,63	0,09	0	0,12	0,03	0,17
		71,74	0,12	0	0	0,65	0,08	0,38	0,73	0,17	0	0	0,52
		69,88	0,16	0	0	3,18	0	1,41	0,07	0,32	0,04	0,03	0
TOG30	N	71,22	0,21	0	0	3,05	0,1	1,06	1,56	0,12	0,16	0,11	0,22
		54,39	0,19	0,04	0	14,35	0,04	0,75	11,59	0	0,05	1,33	0,13

Analyses microsituées sur pyrites de la sidérite d'Opblé

Points	Fe	S	Zn	Pb	Cu	Total
1	45,56	53,27	0	0	0	98,84
2	46,17	53,3	0,03	0	0,02	99,51
3	45,75	53,18	0,01	0	0	98,95
4	45,95	53,8	0,04	0	0	99,8
5	45,76	53,43	0,03	0	0,02	99,25
6	46,21	53,67	0	0	0	99,88
7	45,63	53,54	0,02	0	0	99,2
8	45,72	53,38	0	0	0,03	99,15
9	45,97	53,31	0,04	0	0	99,33
10	45,75	53,28	0,01	0	0,02	99,07
11	45,71	53,32	0,03	0	0	99,06
12	45,82	53,5	0,03	0	0	99,35
13	45,53	53,31	0,01	0	0,04	98,9
14	45,48	53,43	0,03	0	0	98,95
15	45,78	52,87	0,02	0	0,01	98,68
16	45,42	53,5	0,01	0	0,02	98,96
17	45,62	53,18	0	0	0	98,81
18	45,97	53,8	0,02	0	0,02	99,82
19	45,52	53,15	0,02	0	0	98,7
20	45,92	53,58	0,04	0	0,02	99,56
21	45,47	53,24	0,01	0	0	98,73
22	45,48	53,4	0	0	0	99,09
23	46,05	53,3	0	0	0	99,36
24	45,88	53,64	0,02	0	0,01	99,55
25	45,84	53,31	0	0	0,02	99,17
26	45,99	53,45	0,02	0	0	99,47
27	45,22	53,4	0,04	0	0,04	98,7
28	45,32	53,7	0	0	0,03	99,05

Résumé

Les chapeaux de fer de Pagala (région centrale du Togo) sont localisés dans une série volcanosédimentaire faisant partie de l'unité structurale de l'Atacora. Les principaux termes lithologiques sont des schistes et micaschistes variés, des quartzites, des dolomies, des calcschistes, des métavolcanites, des phosphatites. Ces roches présentent une constitution minéralogique et une composition chimique normales. Au sein de ces formations sont intercalés des faciès argileux massifs et des sidérites mis en place par des phénomènes hydrothermaux. Ils présentent des anomalies en Ba, Zn, Mn, Ni, Co, Y et en T.R..

L'oxydation de la sidérite engendre des structures secondaires et des textures réticulées. Elle s'accompagne d'un lessivage des éléments chimiques. Malgré ce lessivage, les matériaux qui en résultent, demeurent très anormaux en plusieurs éléments en Zn, Ba, Mn, Ni, Co, Y et T.R.. Ce mécanisme qui transforme la sidérite en chapeau de fer pourrait s'appliquer aux autres chapeaux de fer.

Les matériaux ferrugineux des chapeaux de fer sont tous identiques par leur texture et leur composition chimique, mais se distinguent par leur faciès. Ceci conduit à l'établissement d'une typologie permettant de distinguer des faciès massifs, scoriacés, cendriers, brèches ferrugineuses. Ces chapeaux de fer présentent des teneurs en goëthite dominante et des valeurs nettement anormales en Zn, Mn, Ba, Ni, Co, Y, et en T.R.

Mots clés: Togo - Chapeaux de fer - Sidérite - Hydrothermalisme - Altération météorique - Minéralogie - Géochimie multiélémentaire.

Abstract

Pagala's gossans (central Togo) are localised in volcanogenic serie which is part of the Atacora Structural Unit. The major formations are schistes, micaschistes, quartzites, dolomites, calcschistes, metavolcanics, phosphatites. Mineralogical and geochemical compositions of these rocks are normal. Due to hydrothermal activity, massive clay deposit (metahalloysite, kaolinite) and siderite are stratified with these formations. They present Ba, Zn, Ni, Co, Y, and REE anomalies.

The oxidation of siderite give way to secondary structures and reticulated textures, with a leaching. In spite of this leaching, the resulting material show strong Zn, Ba, Ni, Co, Y, and REE anomalies. The transformation of siderite to gossan could be applied to other gossan formations.

Ferruginous material of gossan are homogenous in texture and chemical composition, but they differ by facies. This link to establish a typology of facies: massive, scoriaceous, "cendrier", ferruginous breccia. These gossans are characterised by a goëthite mineralogical composition and strong Zn, Ba, Ni, Co, Y, and REE anomalies.

Key words: Togo - Gossans - Siderite - Hydrothermal Event - Weathering - Mineralogy - Multielement Geochemistry.