

Altération et bilans géochimiques des biotites des gneiss de Nkolbisson (NW de Yaoundé, Cameroun)

K. Beyala KAMGANG⁽¹⁾, Georges Emmanuel EKODECK⁽²⁾

Résumé : Un sondage a été réalisé au nord-ouest de Yaoundé (Cameroun) dans un profil d'altération météorique sur gneiss. Ce sondage traverse trois ensembles d'horizons d'altération avant d'atteindre la roche saine. L'indice calculé de lixiviation potentielle indique que l'altération de ces gneiss conduit à la formation de kaolinite (monosiallisation). Au cours de cette altération, les biotites évoluent d'abord vers des interstratifiés biotite-vermiculite, avant de se transformer en kaolinite.

Mots-clés : Altération supergène - Gneiss - Biotite - Biotite/Vermiculite - Kaolinite - Cameroun.

Abstract: Weathering and geochemical balance of biotites. Gneisses of Nkolbisson (NW Yaounde, Cameroon). A borehole was performed on a weathered profile on gneisses in the North-West area of Yaounde (Cameroon). This borehole revealed three layers of alteration on top of the bedrock. The value of potential lixiviation index indicated that the greatest part of the profile is subjected to monosiallisation (high lixiviation). It was also revealed that biotites evolve to an interlayered biotite-vermiculite stage before changing to kaolinite.

Keywords: Weathering - Gneiss - Biotite - Biotite/vermiculite - Kaolinite - Cameroun.

INTRODUCTION

Les altérations supergènes des gneiss de Yaoundé ont déjà fait l'objet de plusieurs travaux (EMBRECHTS et STOOPS, 1982; SARAZIN *et al.*, 1982; YONGUE, 1986). Le but de ce travail est de mieux préciser, à la suite de travaux précédents (EKODECK, 1984; KAMGANG, 1987), le contexte et les mécanismes de la transformation supergène spécifique des biotites. La séquence d'altération étudiée provient d'un sondage carotté au cours de la campagne de reconnaissance du site de construction du barrage de la Méfou. Ce sondage, profond de 19 m, est situé à Nkolbisson, petite localité au nord-ouest de la ville de Yaoundé; ses coordonnées géographiques sont : 3°52' et 3°53' de latitude Nord et 11°25' et 11°26' de longitude Est.

La région de Yaoundé, soumise à un climat équatorial chaud et humide à quatre saisons, appartient à la sous-zone de climat équatorial forestier du Sud-Cameroun (LACLAVERIE et LOUNG, 1979).

La roche saine est très riche en biotites. L'objet de cette étude est de mettre en évidence la succession de différentes phases d'altération de ces biotites et d'appréhender les mécanismes géochimiques de leurs transformations.

MÉTHODES

Outre les descriptions à l'échelle macroscopique effectuées sur le terrain, nous avons procédé sur les échantillons prélevés, à différentes analyses en laboratoire :

(1) Université de Yaoundé, Ecole normale supérieure, Annexe de Bambili, Cameroun.

(2) Institut de Recherches géologiques et minières, BP 4110, Yaoundé, Cameroun.

— des analyses pétrographiques ont été réalisées au microscope optique en lumière réfléchiée et en lumière transmise sur des sections polies et des lames minces confectionnées à partir d'échantillons indurés, et complétées par des analyses chimiques ponctuelles réalisées à la microsonde électronique (CAMECA MS 46 couplé à un système EDS-ORTEC);

— la diffraction des rayons X, qui permet de déterminer les constituants de diverses paragenèses minérales, a été effectuée sur des poudres de roche totale, sur les fractions argileuses et sur des biotites isolées par liqueur dense et par tri manuel sous loupe binoculaire. Les traitements utilisés pour l'identification des minéraux phylliteux ont été le glycolage et le chauffage à 70°, 110°, 350° et 550 °C pendant deux heures;

— des analyses chimiques quantitatives globales réalisées au spectrophotomètre d'absorption atomique, ont permis d'évaluer les pertes et gains d'éléments qui interviennent pour chaque horizon.

Avant de procéder à l'étude des biotites et de leur transformation, il est nécessaire de décrire brièvement le profil choisi et de caractériser son évolution géochimique globale.

PROFIL D'ALTÉRATION

Le profil étudié s'organise en trois ensembles définis, de bas en haut, comme suit (Fig.1) :

Ensemble rocheux compact

La roche saine est un gneiss non fissuré, marqué par une alternance de lits blancs et de lits sombres d'épaisseur variable, millimétrique à centimétrique. Les lits blancs sont essentiellement quartzofeldspathiques, avec quelques petites muscovites en paillettes parfaitement individualisées. Toutefois, associées aux feldspaths alcalins, on peut observer quelques rares paillettes d'hydromuscovite de rétrodiagenèse. Les quartz sont pour l'essentiel des grains pluricristallins.

Les lits sombres sont riches en minéraux ferromagnésiens (biotite, grenat) auxquels s'ajoutent quelques disthènes en baguettes aplaties de couleur bleutée.

La roche altérée compacte forme au-dessus de la roche mère un horizon d'environ 20 cm d'épaisseur. Bien que la roche conserve sa structure lithologique, elle présente déjà des signes évidents d'altération : les feldspaths s'altèrent en un produit blanc argileux (kaolinite); autour des grenats appa-

rait une auréole d'altération peu épaisse, de couleur brun clair, constituée par une association de grenat/kaolinite; alors que les biotites subissent un début de transformation, les muscovites, disthènes et quartz restent parfaitement sains.

La transition roche altérée compacte et altérites est marquée par le développement d'un important système fissural parallèle au litage originel. Les fissures sont millimétriques et remplies de produits de remplissage composés de kaolinite et d'oxyhydroxydes de fer. Ces accumulations ferrugineuses provoquent un changement brusque de la couleur qui passe du gris au brun rouge. Les lits blancs deviennent très friables en raison de l'altération complète des feldspaths.

Ensemble altéritique meuble

Les altérites à structure conservée forment un horizon d'une épaisseur d'environ 1 m. Le réseau de fissures parallèles, soulignant le litage originel, est ici bien développé. Dans les lits quartzofeldspathiques, les quartz pluricristallins ne sont pas disloqués et les produits d'altération des feldspaths sont en grande partie maintenus sur place; la texture de la roche mère est toujours reconnaissable.

Dans les lits à minéraux ferromagnésiens la texture est aussi préservée. Une auréole d'altération entoure encore certains grenats alors que d'autres présentent déjà un réseau interne de cloisons goethitiques dont l'effritement peut effacer la forme initiale du cristal (KAMGANG, 1987). Les disthènes ne présentent pas de figure d'altération.

Les altérites à structure modifiée forment un horizon meuble d'argile tachetée brun rouge à jaune d'environ 80 cm d'épaisseur. Elles sont marquées par la disparition totale du litage originel de la roche-mère. Les textures sont aussi complètement effacées. Seule la présence de fantômes de grenats altérés, de minéraux résiduels sains (disthène et muscovite) témoignent de la filiation verticale à partir du gneiss. Les grains de quartz pluricristallins sont dissociés et disséminés au sein de ce fond matriciel.

Ensemble argilo-sableux

Cet ensemble très épais (15 m), homogène, s'étend jusqu'à la surface du profil. La transition avec l'argile tachetée sous-jacente est soulignée par la présence de quelques boules décimétriques résiduelles d'altérite à structure conservée. La base (30 cm) de cet horizon argilo-sableux contient

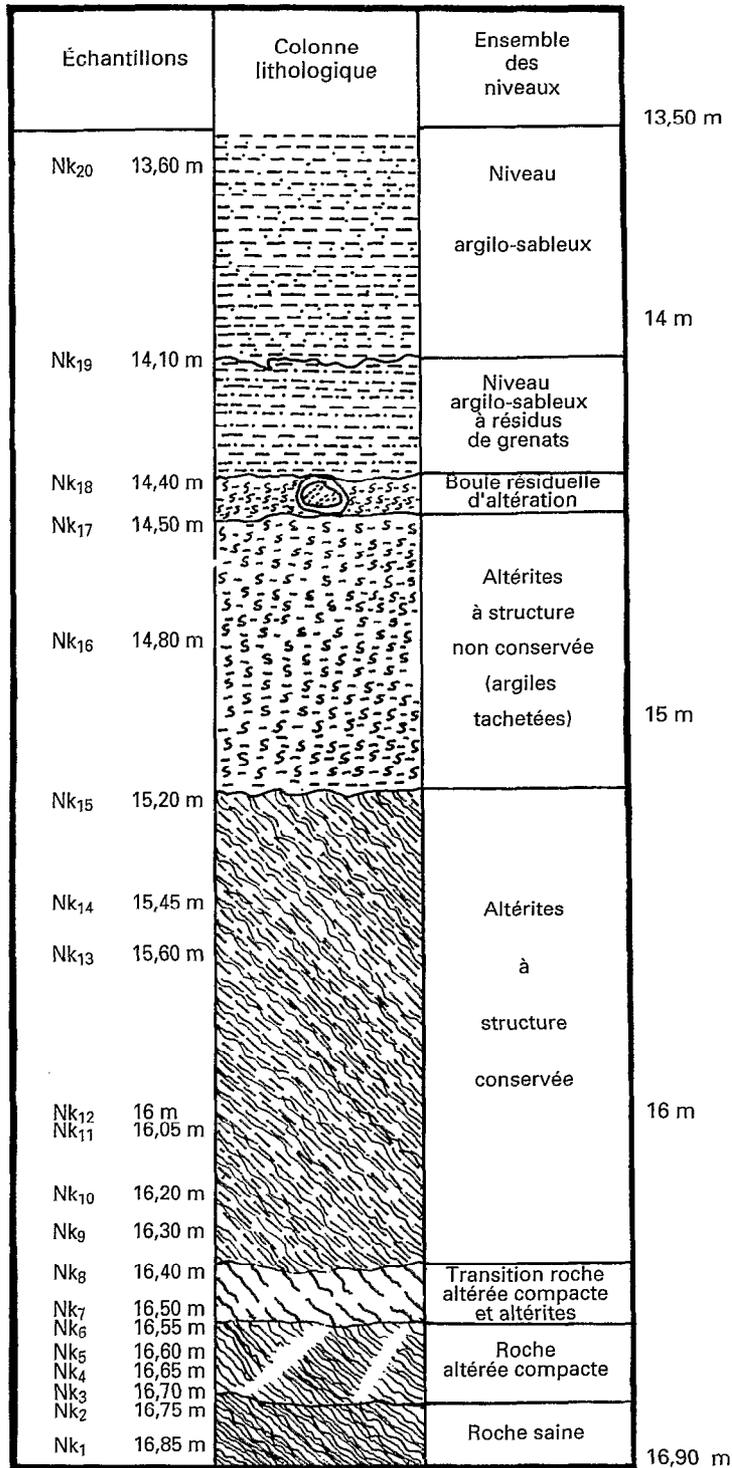


Fig. 1. — Profil d'altération sur gneiss à grenats de Nkolbisson.
 Altered sequence on the gneiss of Nkolbisson.

TABLEAU I

Composition chimique et indice de lixiviation potentielle (ilp) du profil sur gneiss (Nkolbisson)

I : Ensemble rocheux compact; 1 - Roche-mère; 2 - Roche altérée; 3 - Transition.

II : Ensemble altérite meuble; 4 - Structure conservée; 5 - Structure non conservée.

III : Ensemble argilo-sableux; 6 - à reliques de grenats; 7 - sans reliques de grenats.

Chemical composition and potential lixiviation (ilp) of the profile on gneiss (Nkolbisson)

I : Rock level; 1 - Bed rock; 2 - Weathered rock; 3 - Transitional level.

II : Weathered rock level; 4 - Preserved structure; 5 - Structureless.

III : Sandy-argillaceous level; 6 - With garnet 's relicts; 7 - Without garnet's relicts.

	I			II		III	
n°	1	2	3	4	5	6	7
n° échantillon	2	4	2	8	2	1	1
SiO ₂	70,21	62,05	62,57	59,72	59,33	62,14	55,97
Al ₂ O ₃	14,60	16,62	18,78	17,24	18,63	16,16	21,20
Fe ₂ O ₃	5,03	8,89	5,89	8,87	8,24	8,17	9,05
MnO	0,18	0,19	0,12	0,21	0,22	0,12	0,19
MgO	2,63	3,04	2,08	1,40	0,22	0,33	0,12
CaO	0,70	0,83	0,60	0,11	0,07	0,05	0,08
Na ₂ O	1,46	1,44	1,87	0,15	0,05	0,06	0,05
K ₂ O	2,89	3,27	3,61	1,60	0,80	0,71	0,13
TiO ₂	1,00	1,14	0,84	1,07	1,23	1,11	1,53
H ₂ O	0,72	0,67	1,27	7,97	8,96	7,33	10,03
Total	99,42	98,14	97,63	98,34	97,75	96,18	98,35
1lp	4	4	7	68	80	76	81

I Ensemble rocheux compact : 1- roche-mère, 2- roche altérée, 3- transition

II Ensemble altérite meuble: 4- structure conservée, 5- structure non conservée

III Ensemble argilo-sableux: 6- à reliques de grenats, 7- sans reliques de grenats.

encore des reliques pseudomorphiques de grenats altérés. Le fond matriciel de cet ensemble supérieur est constitué d'une matrice argileuse kaolinique et d'un squelette de minéraux résiduels (quartz, disthène et muscovite).

Les observations et analyses ci-dessus montrent que le passage de la roche-mère à l'horizon argilo-sableux supérieur résulte des transformations géochimiques, minéralogiques et structurales successives.

ÉVOLUTION CHIMICO-MINÉRALOGIQUE

Les résultats d'analyses chimiques globales (Tabl. I) des échantillons de roche saine et des ensembles altérés ont fait l'objet d'un traitement chimico-minéralogique par le biais de « l'Algorithme généralisé de restructuration normative altérologique » (PEDRO et DELMAS, 1971; EKODEK, 1989). Cette méthode conventionnelle de reconstitution de minéraux virtuels, inspirée de la méthode américaine CIPW (CROSS *et al.*, 1903), permet le calcul

de paramètres qui rendent compte de l'état d'avancement de l'altération et des produits secondaires associés. Cet état d'avancement de l'altération des silicates est donné par l'indice de lixiviation potentielle (ilp) dont l'expression est la suivante :

$$ilp = \frac{(gibbs\%) 100 + (kands\%) 75 + Sil.al^{\circ} [(Ca-alc\%) 50 + (Fe-Mg\%) 25]}{gibbs\% + Cor\% + Sil\%}$$

gibbs% + Cor% + Sil%

gibbs = gibbsite; kand = kandite; sil = silicates; sil.al^o = silicates d'altération; Ca-alc = calco-alcalins; Fe-Mg = ferromagnésiens; Cor = corindon.

Cet indice prend en compte une évolution de l'altération allant des alumino-silicates primaires à la gibbsite. Les coefficients de pondération que l'on retrouve dans son expression tiennent compte de l'ordre d'apparition des minéraux secondaires au cours de l'altération, qui affecte successivement les silicates ferromagnésiens et les silicates d'alumine calciques, sodiques et enfin potassiques, suivant l'ordre de stabilité (GOLDICH, 1938).

Les valeurs de l'ilp sont un indicateur direct de l'évolution géochimique. Ainsi, PEDRO et DELMAS (1971) ont déterminé :

— un domaine de lixiviation faible (0 à 20 %);
 — un domaine de lixiviation moyenne (20 à 62 %) dans lequel prévaut la formation de minéraux secondaires de type smectite (bisiallittisation);
 — un domaine de lixiviation forte (63 à 87 %) dans lequel prévaut la formation de minéraux secondaires de type kaolinite (monosiallittisation);
 — un domaine de lixiviation extrême (88 à 100 %) dans lequel prévaut la formation d'hydroxydes d'aluminium (allittisation).

Pour les échantillons du profil choisi, les valeurs moyennes de l'ilp (Tabl. I) montrent non seulement que le degré de transformation des silicates croît brutalement de la roche mère (ilp = 4) aux altérites (ilp = 68) avec prédominance immédiate de la monosiallittisation dans ces derniers, mais aussi que ces transformations s'intensifient à mesure que l'on monte dans le profil (ilp = 80). La présence des reliques pseudomorphiques ferrugineuses de grenats altérés, à la base de l'ensemble argilo-sableux, induit une inflexion dans cette évolution (ilp = 76). C'est dans ce milieu de monosiallittisation que se situe cette étude de la transformation des biotites.

Malgré l'extrême variabilité du nombre d'échantillons analysés, les valeurs de l'ilp montrent non seulement que le degré de transformation des silicates croît brutalement lorsqu'on passe de la roche mère aux altérites avec prédominance immédiate de la monosiallittisation dans ces derniers, mais aussi que ces transformations s'intensifient à mesure que l'on monte dans le profil. La présence des résidus de grenats induit une inflexion dans cette évolution qui, du reste, n'atteint pas le stade de l'allittisation. C'est donc dans ce milieu de monosiallittisation que nous présentons la transformation des biotites, en mettant un accent particulier sur les aspects géochimiques de cette transformation par le biais des bilans de masse.

ÉVOLUTION MINÉRALOGIQUE DES BIOTITES

Dans la roche saine, les biotites sont principalement localisées dans les lits sombres où elles représentent 18,5 % des minéraux présents. Au microscope optique les cristaux, de 25 à 350 µm, apparaissent avec une coloration forte, brun-rougeâtre, et un pléochroïsme intense. Leurs teintes de polarisation sont vives, brun-jaune à brun-rouge du deuxième ordre. Dans la plupart des cas, les biotites entourent les grenats. Elles se trouvent aussi fréquemment en inclusion dans les

grenats, disthènes et feldspaths sous forme de baguettes de très petites tailles (< 25 µm).

Les spectres de diffraction des rayons X des biotites triées présentent une série de réflexions intenses à 10.06 (001), 3.35 (003), 2.28, 1.67 et 1.54 Å, correspondant au spectre de diffraction de la biotite (fiche ASTM 2-45).

Les analyses à la microsonde électronique ont permis de déterminer la composition chimique de ces biotites non altérées (Tabl. II, analyse 1). Ces biotites sont riches en magnésium, fer ferreux, mais aussi en potassium interfoliaire.

TABLEAU II

Analyses à la microsonde et formules structurales
 1 : Biotite saine; 2 : Biotite-vermiculite; 3 : Kaolinite;
 4 : Produits ferrugineux.

Microprobe analysis and structural analysis.
 1 : Fresh biotite; 2 : Biotite-vermiculite; 3 : Kaolinite;
 4 : Ferruginous products.

n°	1	2	3	4
Nombre années	12	12	12	6
SiO ₂	36,73	35,85	45,29	35,71
Al ₂ O ₃	18,74	25,70	37,75	17,57
FeO	15,04	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,00	8,40	2,12	26,94
MgO	13,29	9,61	0,53	8,68
TiO ₂	3,44	3,24	0,04	1,81
MnO	0,02	0,04	0,03	0,06
CaO	0,06	0,04	0,06	0,00
Na ₂ O	0,06	0,02	0,04	0,06
K ₂ O	10,05	5,85	1,14	5,61
Somme	97,43	88,75	87,00	96,44
Si	2,68	2,64	1,96	2,58
Al	1,32	1,36	0,04	1,42
Al	0,29	0,86	1,89	0,08
Fe ³⁺	-	0,46	0,07	1,46
Fe ²⁺	0,92	-	-	0,00
Mg	1,45	1,05	0,03	0,93
Mn	-	-	-	-
Ti	0,19	0,18	-	0,10
Ca	-	-	-	-
Na	0,01	-	0,01	0,01
K	0,94	0,55	0,06	0,52
Base : oxygènes	11	11	7	11

Dans l'ensemble compact les transformations subies par les biotites sont faibles. Au microscope optique, il est possible d'observer un début d'altération des biotites. Celle-ci se marque par la déformation et l'ouverture des clivages, séparant

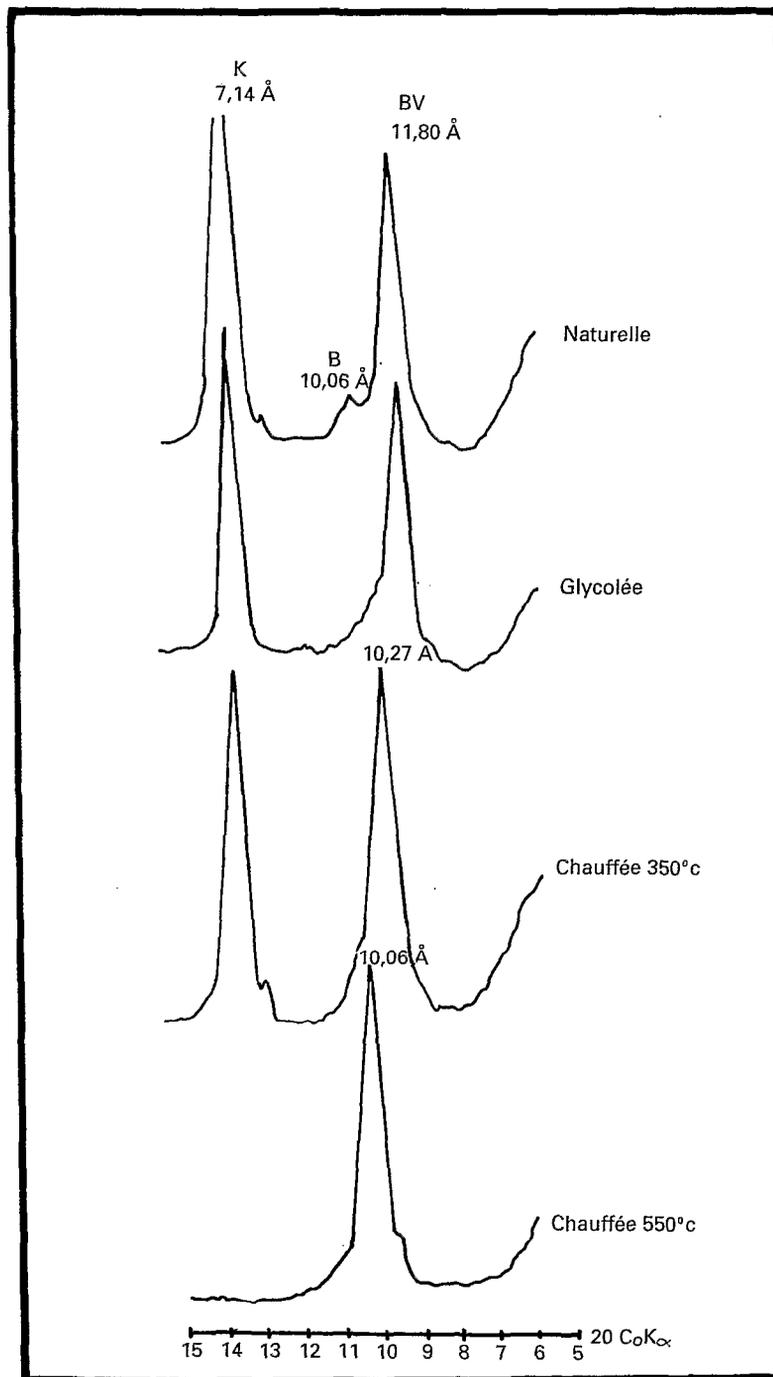


Fig. 2. — Analyses diffractométriques de la fraction argilleuse inférieure à 2 μ m du sommet des altérites à structure conservée.
B : Biotite; BV : Biotite-vermiculite; K : Kaolinite.
Diffractograms of the argillaceous fraction in the top of the alterites with preserved structure.
B : Biotite; BV : Biotite-vermiculite; K : Kaolinite.

des paquets de feuillets qui prennent un aspect sinueux. Simultanément le pléochroïsme et les teintes de polarisation s'atténuent : certains paquets de feuillets se fixent sous forme d'oxyhydroxydes de fer en bordure des micas et dans les zones interfoliaires qui prennent ainsi une teinte brun-rouge.

Cependant, ces transformations n'entraînent pas de modifications notables des spectres de diffraction des rayons X qui restent semblables aux spectres des biotites de la roche saine.

Dans les altérites à structure conservée les transformations initiées dans l'ensemble compact s'accroissent. Les paquets de feuillets ont totalement perdu leur pléochroïsme. Ils polarisent dans les tons gris du premier ordre. Ils sont séparés par les zones interfoliaires brun rouge dans lesquelles s'est accumulé le fer sous forme d'oxyhydroxydes.

Les spectres de diffraction des rayons X montrent un évasement et une diminution de l'intensité de la réflexion principale de la biotite (10.06 Å) consécutifs au développement de la raie principale d'un interstratifié (11.80 Å) et de l'accroissement du pic de la kaolinite (7.17 Å) (Fig. 2). Le maintien de la raie à 11.8 Å après traitement par le glycol, et son déplacement après chauffage jusqu'à 10.06 Å permet de préciser que ce minéral est un interstratifié biotite/vermiculite.

Dans les altérites à structure non conservée, les biotites sont totalement altérées. S'il reste encore quelques traces de l'interstratifié biotite-vermiculite, la kaolinite est maintenant le minéral nettement dominant de cette transformation. Seules quelques reliques pseudomorphiques de biotite témoignent encore de cette filiation. En effet, correspondant à la perte des textures et des structures, les feuillets kaolinitiques issus de l'altération des biotites ont subi un fractionnement et une dispersion au sein du fond matriciel argilo-ferrugineux et quartzeux de cette altérite.

Dans les horizons argilo-sableux de surface, toutes traces relictuelles de biotites ont disparu au sein du plasma matriciel kaolinique.

ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE DES BIOTITES

L'évolution géochimique des biotites a été suivie par des analyses ponctuelles à la microsonde. Les résultats, moyennes calculées sur 12 analyses pour chaque minéral, sont présentés dans le tableau II. Ces analyses ont été faites compte tenu de l'étude minéralogique qui a permis de constater la transformation progressive des biotites en un minéral interstratifié biotite-vermiculite puis en kaolinite.

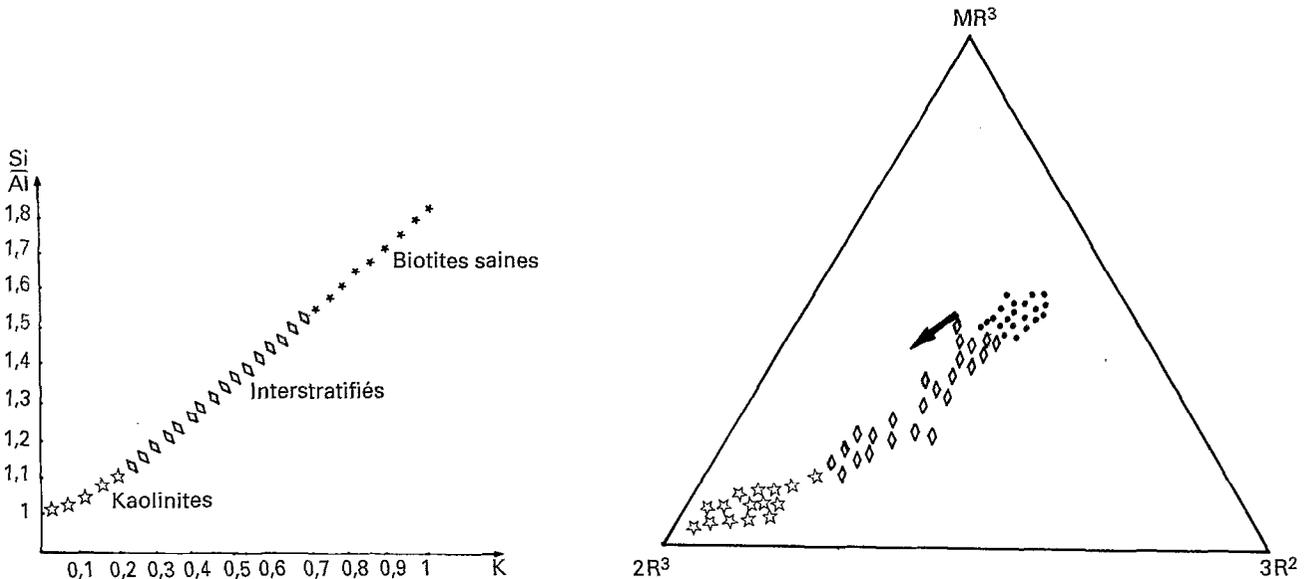


Fig. 3. — Evolution biotite - interstratifié - kaolinite illustrant la perte de potassium et l'enrichissement en alumine. Evolution biotite - mixed layers - kaolinite showing the loss of K and the enrichment in Al.

Au cours de la transformation de la biotite en biotite-vermiculite, les atomes de silicium et d'aluminium des sites tétraédriques ne sont pas touchés, ils restent en nombre et rapport égaux ($\text{Si}/\text{Al} = 2.03$). Par contre des échanges se produisent dans les sites octaédriques : perte de magnésium et de fer et augmentation de l'aluminium. Cette aluminisation précoce, déjà mise en évidence par

SEDDOH (1973), se traduit aussi dans la diminution du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, qui passe de 1.95 à 1.39. Dans le même temps, le potassium quitte les zones interfoliaires. Malgré la très bonne corrélation existant entre les pertes en K et les variations du rapport Si/Al (Fig. 3), ces deux paramètres sont totalement indépendants dans cette première phase de transformation.

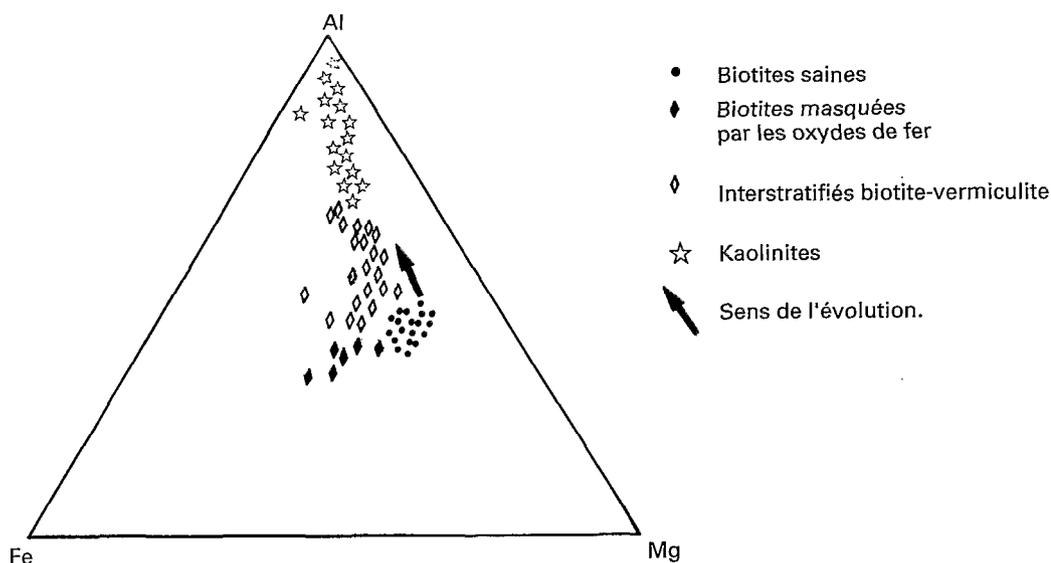


Fig. 4. — Représentation chimigraphique des biotites et leurs phases secondaires (système Al-Fe-Mg).
Chimiographic representation of the biotites and the secondary phases (system Al. Fe. Mg.).

Le passage de la biotite-vermiculite à la kaolinite se marque par une disparition de l'aluminium des positions tétraédriques et son piégeage dans les sites octaédriques. On s'aperçoit que le rapport Si total/Al change peu, 1.18 pour la biotite-vermiculite à 1.01 pour la kaolinite. Cette diminution est principalement liée à un départ de silicium qui correspond à la disparition d'un feuillet tétraédrique et donc à une modification structurale. Dans le même temps il y a, à l'échelle des feuillets, perte du fer qui migre vers les zones interfoliaires et perte de tout le potassium interfoliaire.

DISCUSSION - CONCLUSION

Depuis MILLOT (1964) qui a montré la vulnérabilité à l'altération des biotites riches en magnésium et fer ferreux, la transformation de la biotite en

kaolinite par cette étape obligée biotite-vermiculite a souvent été évoquée (KIMPE et TARDY, 1967; TARDY, 1969; NOVIKOFF, 1970; PINTO *et al.*, 1972; SOUBIES, 1973 *in* CHATELAIN, 1974; BOULANGE, 1984; TOLEDO-GROKE *et al.*, 1989), étape correspondant à une aluminisation (SEDDOH, 1973). Nos propres résultats sont en accord avec ces faits.

Les biotites abondantes (20 %) dans ces gneiss archéens de la région de Yaoundé ont pu être facilement isolées au sein des trois ensembles observés, qui sont l'ensemble rocheux compact, l'ensemble altérite et l'ensemble argilo-sableux supérieur. Il est intéressant de constater que la formation de l'interstratifié biotite-vermiculite intervient dans l'ensemble rocheux compact. L'indice d'altération γ est faible ($\text{ilp} = 4$ à 7). Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ varie peu, sa diminution (3.7 à 3.3) est surtout liée à l'altération des feldspaths. Une partie de l'aluminium ainsi libéré migre vers les

sites octaédriques des biotites, laissés vacants par le départ de Mg et Fe²⁺, et contribue à l'aluminisation de l'interstratifié biotite-vermiculite. Ainsi, même lorsque le degré d'altération est peu avancé, il existe des transferts interminéraux (BOCQUIER *et al.*, 1983).

Le passage à l'ensemble altérite est souligné par une augmentation brusque de l'indice d'altération

(ilp = 7 à 80), atteignant, sans terme intermédiaire, les valeurs caractéristiques de la monosiallisation. À cette rupture correspondent aussi les transformations fondamentales cristallographiques, chimiques, des interstratifiés biotite-vermiculite en kaolinite.

Manuscrit accepté le 20 septembre 1994.

BIBLIOGRAPHIE

- BOCQUIER (G.), BOULANGE (B.), ILDEFONSE (P.), NAHON (D.) MULLER (J.P.), 1983. — *Transfers, accumulation modes, mineralogic transformations and complexity of historical development in lateritic profiles*. Seminar on Lateritisation Processes. Sao Paulo, Brazil. A.J. Melfi et A.Carvalho Eds., 1983 : 331-343.
- BOULANGE (B.), 1984. — *Les formations bauxitiques latéritiques de la Côte-d'Ivoire*. Trav. et Doc. Orstom n° 175 : 352 p.
- CHATELAIN (Y.), 1974. — *Les sols ferrallitiques. T. III : L'altération*. Initiation, Documentation technique, Orstom, n° 24 : 144 p.
- CROSS (W.), IDDING (J.P.), PIRSSON (L.V.) and WASHINGTON (M.S.), 1903. — *Quantitative classification of igneous rocks*, univ. Chicago.
- EKODECK (G.E.), 1984. — *L'altération des roches métamorphiques du sud Cameroun et ses aspects géotechniques*. Thèse Sci., univ. Grenoble I : 392 p.
- EKODECK (G.E.), 1989. — *L'algorithme généralisé de restructuration normative altérologique et les diagrammes correspondants d'interprétation et de caractérisation*. Doc. Ined. Dact., 115 p.
- EMBRECHTS (J.) and STOOPS, (G.), 1982. — Microscopical aspects of garnet weathering in humid tropical environment. *Journ. Soil Sci.*, 33 : 535-545.
- GOLDICH (S.S.), 1938. — A study in rock weathering. *J. Geol.*, 46 : 17-23.
- KAMGANG (B.), 1987. — *Altération supergène des roches grenatifères de la région de Yaoundé (Cameroun) : Pétrologie-Minéralogie*. Thèse Doct. 3^e cycle, univ. Poitiers, 170 p.
- (de) KIMPE (C.P.) et TARDY (Y.), 1967. — Etude de l'altération d'une biotite en kaolinite par spectroscopie infrarouge. *Bull. Gr. Fr. Arg.*, 19,2 : 81-85.
- LACLAVÉRIE (C.) et LOUNG (J.F.), 1979. — *Atlas de la République Unie du Cameroun*. Jeune Afrique Ed., Paris, 72 p.
- MILLOT (G.), 1964. — *Géologie des argiles*. Masson Ed., Paris, 499 p.
- NOVIKOFF (A.), 1970. — *Altération des micas en zone ferrallitique (massif du Chaillu, République Populaire du Congo)*, Orstom, Brazzaville, 11 p.
- PEDRO (G.) et DELMAS (A.B.), 1971. — Sur l'altération expérimentale par lessivage à l'eau et la mise en évidence de trois grands domaines d'évolution géochimique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 273, sér. D : 1543-1546.
- PINTO (O.C.B.), YAHNER (J.E.) y BROTH (C.B.), 1972. — Natureza e formação de caolinita em forma de pseudomica, em solos de Vicosá. Minas Geraes. *Experimental*, 13,12 : 1185-1206.
- SARAZIN (G.), ILDEFONSE (Ph.) et MULLER (J.P.), 1982. — Contrôle de la solubilité du fer et de l'aluminium en milieu ferrallitique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 46 : 1267-1279.
- SEDDOH (F.K.), 1973. — Altération des roches cristallines du Morvan : granites, granophyres, rhyolites. Etude minéralogique, géochimique, micromorphologique. *Mém. Géol. Univ. Dijon*, Doin Ed., 377 p.
- TARDY (Y.), 1969. — *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Thèse Fac. Sci. Strasbourg, 274 p.
- TOLEDO-GROKE (M.C.), BOULANGE (B.), PARISOT (J.C.) et MELFI (A.J.), 1989. — Altération des biotites dans les roches cuprifères de Salobo 3A, Serra dos Carajas (Brésil) I: formation des phyllosilicates secondaires. *Géodynamique* 4 (2) : 135-150.
- YONGUE-FOUATEU (R.), 1986. — *Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatiques de la région de Yaoundé*. Thèse Doct. 3^e cycle, univ. Yaoundé, 214 p.