

# Altération des biotites dans les roches cuprifères de Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brésil)

## I. Formation des phyllosilicates secondaires

Maria Cristina TOLEDO-GROKE<sup>(1)</sup>, Bruno BOULANGÉ<sup>(2)</sup>, Jean-Claude PARISOT<sup>(3)</sup>  
et Adolpho José MELFI<sup>(4)</sup>

---

**Résumé :** Les analyses des produits issus de l'altération météorique des biotites de Salobo 3A (Serra dos Carajás) permettent de mettre en évidence l'existence d'une altération différentielle. Celle-ci correspond, dans une phase initiale, à la formation de smectites et s'accompagne d'un enrichissement en silicium et en bases alcalino-terreuses, d'une perte en potassium, d'une oxydation et d'une perte partielle en fer octaédrique, d'un gain en cuivre. Postérieurement, la modification des facteurs contrôlant l'altération, avec un milieu ambiant plus lixiviant, conduit tous ces phyllosilicates à une transformation en kaolinite.

Dans le cas des smectites d'altération, cette deuxième transformation entraîne la destruction totale des structures de la biotite et se fait avec conservation ou gain d'aluminium, perte partielle de silicium et perte totale des autres éléments y compris le cuivre.

Dans le cas des biotites encore saines, cette transformation est indirecte ; il se forme un produit intermédiaire ou « biotite altérée » qui comprend des minéraux de type vermiculite et interstratifiés biotite-vermiculite ; les variations géochimiques sont dans ce cas progressives, avec perte partielle de silicium, de fer et de magnésium octaédriques, et avec gain en aluminium et en cuivre ; les structures micacées sont conservées. La kaolinisation de cette phase intermédiaire préserve les structures micacées, avec perte partielle de silicium, déplacement de l'aluminium des positions tétraédriques vers les positions octaédriques et la lixiviation totale du cuivre et des autres éléments étrangers à la kaolinite (fer, magnésium et potassium).

**Mots-clés :** Biotite - Altération - Géochimie - Brésil.

**Abstract :** Weathering of biotites in cupriferous rocks from Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brazil).

I. Formation of secondary phyllosilicates. The study of products resulting from weathering of biotites from Salobo 3A (Serra dos Carajás) reveals a complex evolution. The initial phase corresponds to formation of smectite, with enrichment in silicon and alkali earth elements, loss of potassium, oxydation and partial loss of octahedral iron and gain of copper. Later, these phyllosilicates are transformed into kaolinite after changes of the factors controlling weathering to more leaching conditions.

In the case of smectites resulting from weathering, this transformation leads to the total destruction of the micaceous structure with conservation or gain of aluminium, partial loss of silicon and complete loss of other elements, including copper.

However in the case of still fresh biotites not yet changed into smectites, this second transformation proceeds through an intermediate step with formation of an intermediate phase called « weathered biotite » composed out of vermiculite and interlayered biotite-vermiculite type minerals. The geochemical changes during this transformation are progressive, with

---

(1) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, CP 20899, CEP 01498 - São Paulo (Brésil).

(2) ORSTOM, Laboratoire de Géosciences de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille III, 13397 Marseille Cedex 13 (France).

(3) ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex (France).

(4) Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, CP 30627, CEP 01051 - São Paulo (Brésil).

*gradual loss of silicon, octahedral iron and magnesium and with gain of aluminium and copper and conservation of the micaceous structures. Kaolinization of this intermediate phase proceeds with partial loss of silicon, change of aluminium from tetrahedral to octahedral positions, complete leaching of copper and other elements foreign to kaolinite (iron, magnesium and potassium), and preservation of the micaceous structures.*

**Key words :** Biotite - Weathering - Geochemistry - Brazil.

**Resumo :** O Intemperismo das biotitas nas rochas cupríferas do Salobo 3A Serra dos Carajás (Brasil) I. A formação dos filosilicatos secundários.

*As análises dos produtos da alteração meteórica das biotitas das rochas xistosas cupríferas do Salobo 3A (Serra dos Carajás) evidenciaram a existência de uma alteração diferencial. Numa fase inicial, os filosilicatos primários sofreram transformação em esmectita, com um enriquecimento em sílica e alcalino-terrosos, empobrecimento em potássio, oxidação e perda de ferro octaédrico, e ganho em cobre.*

*Posteriormente, modificações dos fatores que controlam a alteração promoveram o estabelecimento de um meio mais lixiviante, conduzindo as esmectitas à caolinização, com destruição total das estruturas micáceas, conservação ou ganho de alumínio, perda parcial de silício e total dos outros elementos, inclusive o cobre.*

*No caso das biotitas, ainda não transformadas em esmectitas, esta caolinização é indireta através de uma fase intermediária complexa, denominada « biotita alterada », compreendendo minerais tipo vermiculita e interstratificados biotite-vermiculita. As variações químicas são progressivas nesta evolução, com perda parcial de silício, de ferro e de magnésio octaédricos, e com ganho em alumínio e cobre. A estrutura micácea é conservada nesta fase de « biotita alterada », como também após a caolinização que se segue, quando ocorre perda parcial de silício, deslocamento do alumínio das posições tetraédricas em direção às octaédricas, e lixiviação total do cobre e dos outros elementos estranhos à caolinita (ferro, magnésio e potássio).*

**Palabres-Chaves :** Biotita - Alteração - Geoquímica - Brasil.

## INTRODUCTION

Le dépôt cuprifère de Salobo 3A se situe dans la province minérale de Carajás (Pará, Brésil) (fig. 1). Cette région fait partie de la zone tropicale humide amazonienne et est couverte de forêts. La minéralisation primaire est insérée dans la Formation Salobo-Pojuca (Protérozoïque supérieur) constituée par un ensemble de roches métasédimentaires de direction N70W avec des pendages accentués NE et SW. Cette séquence contient un ensemble schisteux dans lequel sont intercalés des faciès à forte proportion de magnétite. Ces faciès portent la majeure partie de la minéralisation cuprifère primaire. Les minéraux de cuivre sont principalement des sulfures de cuivre et de fer tels que bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) et chalcopryrite ( $\text{Cu-FeS}_2$ ) et des sulfures de cuivre tel que chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) (MEYER et FARIAS, 1980 ; MARTINS *et al.*, 1982).

Le gisement présente un épais manteau d'altération, atteignant jusqu'à 60 m d'épaisseur, avec des teneurs moyennes de 0,96 % de CuO, qui diffèrent peu des teneurs des roches primaires minéralisées (1,05 % de CuO) (FARIAS et SAUERESSIG, 1982).

Cependant, ces teneurs en cuivre ne sont pas dues aux minéraux secondaires de cuivre, communément

rencontrés en situation semblable, tels que carbonates, silicates, sulfates et oxydes (KOUD, 1985) ; la presque totalité du cuivre, libéré des sulfures primaires durant l'altération, est fixée par les diverses phases minérales secondaires (TOLEDO-GROKE, 1986 ; TOLEDO-GROKE *et al.*, 1987). Ainsi, en plus de la malachite présente très localement à la base du profil, le cuivre est fixé dans :

- des phases silicatées résultant de l'altération des biotites et contenant jusqu'à 18 % de CuO ou de l'accumulation de smectites dans un système fissural et contenant jusqu'à 5 % de CuO ;

- des phases ferrugineuses avec oxyhydroxydes de fer résultant de l'altération des minéraux mafiques et localisées dans les pseudomorphoses de ces minéraux ou dans le système fissural et contenant jusqu'à 6 % de CuO ;

- une phase manganésifère déposée dans le système fissural sous la forme de cryptomélane et contenant jusqu'à 25 % de CuO.

Quoique les teneurs les plus élevées en cuivre soient dans les silicates et dans le cryptomélane, les oxyhydroxydes de fer représentent aussi une phase cuprifère importante, en raison de leur abondance dans le manteau d'altération (TOLEDO-GROKE, 1986). Des calculs de bilan (PARISOT, 1989) ont montré que l'essen-

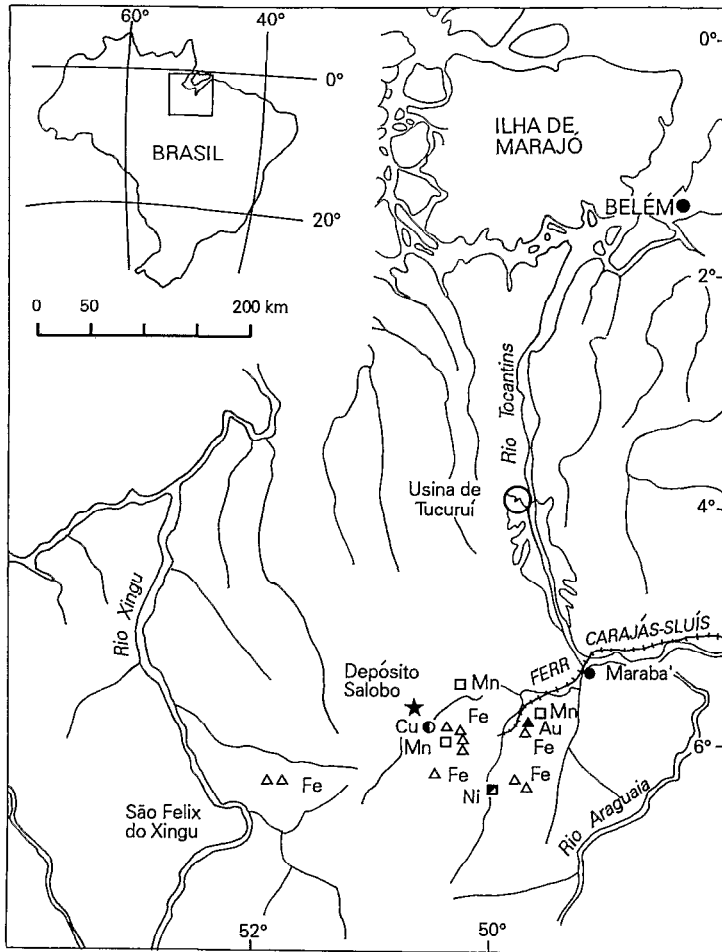


Fig. 1. — Localisation du dépôt de cuivre de Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brésil).

*Location of the copper deposits of Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brazil).*

tiel du cuivre se trouve associé aux minéraux du type vermiculite, originaires de biotites. La complexité de l'évolution des biotites au cours de l'altération et la formation de diverses phases minéralogiques, auxquelles le cuivre est associé, ont montré la nécessité d'une étude plus détaillée de ces évolutions, présentée ici et faite dans le cadre d'un travail général sur Salobo 3A (TOLEDO-GROKE, 1986).

Pour cette étude des transformations structurales, minéralogiques et géochimiques des biotites, diverses techniques analytiques ont été utilisées, les unes nécessitant la préservation des structures pétrographiques, les autres leur destruction.

Les structures ont été préservées, par induration des échantillons pour l'analyse microscopique des lames minces, ce qui permet une parfaite localisation des

produits secondaires. Leur détermination a été effectuée par microanalyses ponctuelles sur lames minces polies (microsonde électronique type Camebax). Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) sur agrégats naturels, non déformés, métallisés à l'or, ont permis de déterminer les constituants minéraux, leur morphologie et leur arrangement. Le couplage du MEB avec un spectromètre EDS a permis une analyse qualitative des constituants minéraux.

Les structures ont été détruites pour les déterminations minéralogiques (diffraction des rayons X, microscope électronique à transmission MET, spectroscopie infrarouge) effectuées sur les fractions micacées obtenues par séparation densimétrique, magnétique et manuelle.

## LES PRODUITS D'ALTÉRATION DES BIOTITES

La biotite est le minéral le plus largement distribué dans les roches minéralisées et son évolution, tout au long du profil d'altération, paraît plus complexe que celle des autres minéraux (amphibole, grenat, chlorite, sulfures, ...). L'altération des biotites engendre généralement diverses associations de minéraux secondaires qui peuvent se trouver simultanément dans un même horizon ou dans une même relique pseudomorphe de cristal altéré. Ces associations minérales sont (fig. 2) :

- 1 - biotite, biotite altérée et kaolinite ;
- 2 - biotite altérée, smectite et kaolinite ;
- 3 - smectite.

### Association 1 : biotite, biotite altérée et kaolinite

Cette association est la plus communément rencontrée à mesure que la biotite saine diminue d'importance vers le sommet des profils.

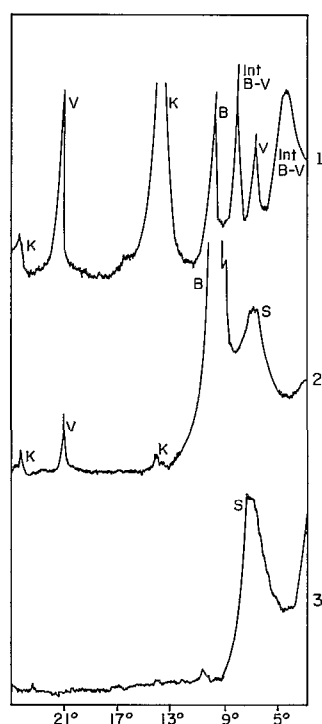


Fig. 2. — Diffractogrammes de rayons X des produits d'altération de biotites : 1. association biotite - biotite altérée - kaolinite ; 2. association biotite altérée - smectite - kaolinite ; 3. association smectite type nontronite.

X ray diffractograms of alteration products of biotites : 1. association biotite - altered biotite - kaolinite ; 2. association altered biotite - smectite - kaolinite ; 3. association smectite (nontronite type).

### Étude morphologique et minéralogique

Au début de l'altération des biotites on observe une expansion latérale des cristaux, s'accompagnant d'une ondulation variable des lamelles et de l'ouverture d'espaces interlamellaires (ph. 1).

L'intensité du pléochroïsme et la biréfringence diminuent progressivement jusqu'à atteindre les caractéristiques optiques de la kaolinite (GRUNER, 1934 ; WALTER, 1949 ; WILSON, 1966 ; BISDOM, 1967 ; OJANUGA, 1973 ; SEDDOH et PEDRO, 1974 ; STOCH et SIKORA, 1976 ; MEUNIER, 1977 ; GILKES et SUDDHIPRAKARN, 1979 ; PENVEN *et al.*, 1981 ; BISDOM *et al.*, 1982).

Ces modifications s'accompagnent d'une migration du fer qui sort des biotites et se fixe, sous la forme de goethite, dans les discontinuités telles que les espaces interlamellaires et intercrystallins, et les fissures. Dans ces discontinuités, zones préférentielles de circulation, le dépôt de produits secondaires néoformés, provenant d'apports en solution, est fréquent : kaolinite en cristaux perpendiculaires aux lamelles (ph. 1), halloysite à peine détectée au MET (ph. 2) et cryptomélane en fines pellicules (ph. 3).

Les analyses de diffraction des rayons X sur les fractions micacées ont permis de déterminer en plus des minéraux déjà cités :

— Une phase parfois absente, qui présente des réflexions à 8 Å, 12 Å et, éventuellement, à 24 Å. Cette phase, non expansible à l'éthylène-glycol, se ferme à 10 Å après chauffage à 600 °C. Elle a un comportement d'interstratifié biotite-vermiculite (fig. 3A).

— Un minéral à 14 Å, non expansible, qui montre une certaine résistance au chauffage ; la fermeture des feuillets n'est que partielle à 400 °C et totale seulement à une température plus élevée (600 °C) (fig. 3B). Normalement, les vermiculites ont leurs feuillets qui se ferment de 14 Å à 10 Å après chauffage à 200 °C (ROBERT, 1975) ou à 400 °C (ROBERT et TESSIER, 1974). Le comportement des phyllosilicates observés ici est analogue à celui des vermiculites hydroxyalumineuses qui contiennent une couche hydroxyalumineuse en position interfoliaire empêchant la fermeture normale de la structure à 10 Å (TARDY et GAC, 1968 ; SEDDOH *et al.*, 1969).

Les spectres d'absorption infrarouge (fig. 4), réalisés pour les fractions micacées de divers échantillons, montrent une évolution d'un phyllosilicate de type 2:1 vers un phyllosilicate de type 1:1 (kaolinite). L'apparition d'une raie autour de 920 cm<sup>-1</sup> correspond à la liaison Al-O-OH et ne peut se développer que dans la mesure où les feuillets 2:1 disparaissent (DE KIMPE et TARDY, 1967). De plus, les raies qui apparaissent autour de 3 620 et 3 695 cm<sup>-1</sup> sont dues au groupe OH des cavités octaédriques respectivement internes et externes et indiquent une kaolinite bien cristallisée, étant donné que la vibration de haute fréquence est plus intense que celle de basse fréquence.

Ainsi, la kaolinite apparaît comme le produit final de transformation pseudomorphique de la biotite (ph. 4).

Photo 1. — Biotites en voie d'altération (bi) avec ferruginisation et dépôt de kaolinite (ca) dans les espaces interlamellaires. Le plasma argilo-ferrugineux (pl) montre la perte des structures primaires entre les cristaux de biotite (Association 1). MO, LN

*Biotites (bi) undergoing weathering and showing appearance of ferruginous products and kaolinite deposits (ca) in the interlayer sites. The ferruginous and argillaceous plasma (pl) exhibits the degradation of primary structures within the biotite crystals of association 1. OM, NL.*

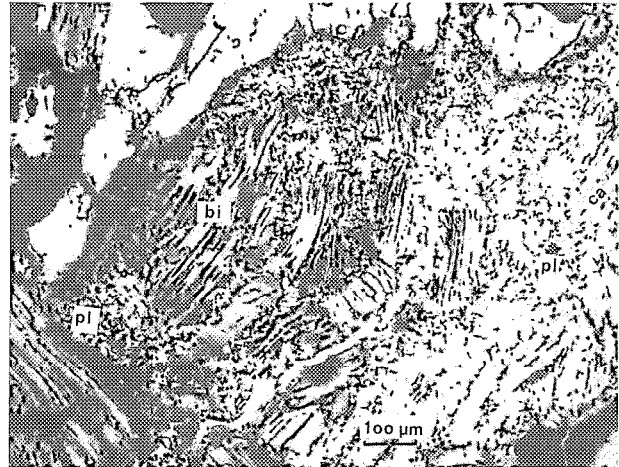


Photo 2. — Halloysite (ha) et kaolinite (ca) dans la fraction micacée de l'association 1. MET

*halloysite (ha) and kaolinite (ca) in the micaceous fraction of association 1. TEM.*

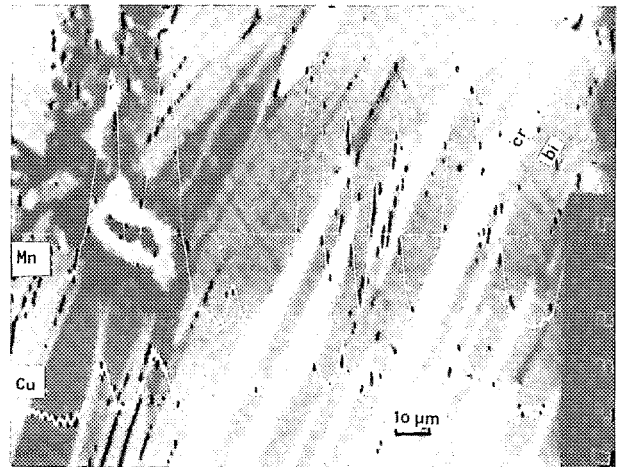
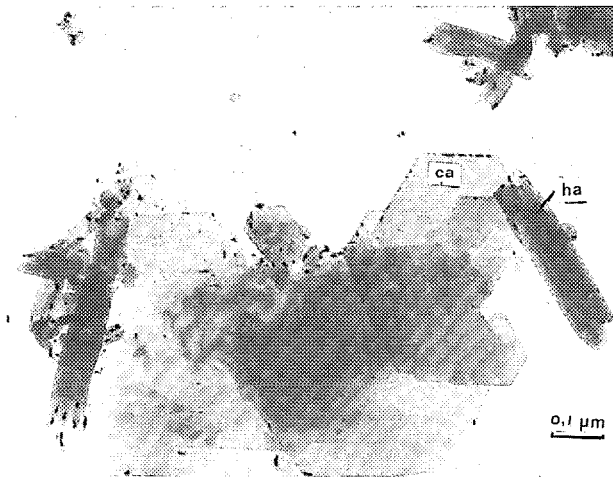


Photo 3. — Cryptomélane (cr) dans les espaces interlamellaires de biotite (bi) et analyse du Mn et du Cu le long de la section AA'. MEB

*Cryptomelane (cr) within the interlayered sites of the biotites (bi) and results for Mn and Cu along section AA'. SEM.*

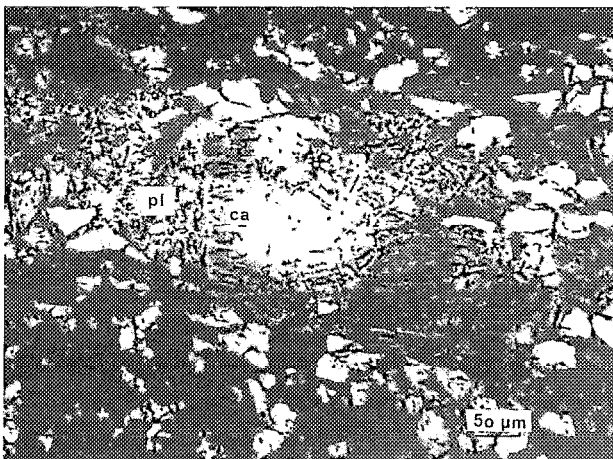


Photo 4. — Pseudomorphe de biotite totalement transformée en kaolinite (ca) dans un plasma argilo-ferrugineux (pl). MO, LN

*Pseudomorphosis of biotite completely transformed into kaolinite (ca) in a ferruginous-argillaceous plasma (pl). OM, NL.*

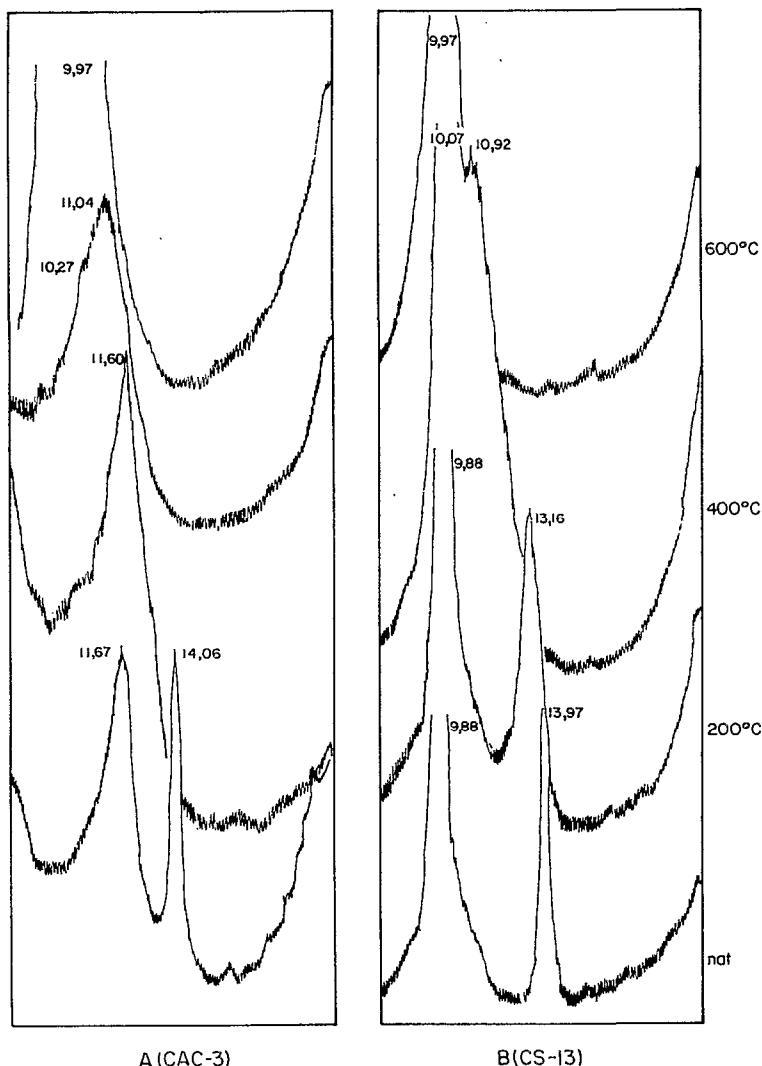


Fig. 3. — Comportement des minéraux type vermiculite (biotite altérée) au chauffage à 200°, 400° et 600 °C.

Behaviour of vermiculite type (altered biotite) minerals under heating at 200°, 400° and 600 °C.

La matrice argilo-ferrugineuse (kaolinite et goéthite), développée entre les pseudomorphoses de biotite, présente parfois de petits paquets de kaolinite sous forme de fragments similaires aux pseudomorphoses de biotite (ph. 1).

### Étude géochimique

Les microanalyses les plus représentatives sont données (tabl. I) pour la biotite saine (an. 1), pour les phyllosilicates issus de la transformation des biotites (an. 2 à 12) et pour les produits des espaces interlamellaires (an. 13 à 17). On peut noter la présence de cuivre (jusqu'à plus de 10 % de CuO) associé aux phyllosilicates secondaires (an. 2 et 3) et aussi à certains produits interlamellaires tel que le cryptomélane (an. 7).

Les vermiculites types ont des caractéristiques bien spécifiques :

$(K_{0,2}Ca_{0,12})_{0,32} Mg_{5,42} Fe_{0,13})_{5,55} (Al_{2,28}Si_{5,72})_8 O_{20} (OH)_4$  (BOETTCHER, 1966) ;

$(K_{0,14}Na_{0,08}Ca_{0,22})_{0,44} (Mg_{1,02} Fe^{+3}_{2,34} Al_{0,86} Ti_{0,30})_{4,52} (Al_{1,52} Si_{6,28})_8 O_{20} (OH)_4$  (DUNOYER DE SEGONZAC *et al.*, 1970).

Les phyllosilicates provenant des biotites et identifiés ici ont une composition chimique intermédiaire entre les biotites et les vermiculites ; pour cela, ils seront nommés « biotites altérées » :

$(K_{0,55}Ca_{0,01}Na_{0,01})_{0,57} (Mg_{0,39} Fe^{+3}_{2,14} Ti_{0,06} Mn_{0,01} Al_{2,08})_{4,68} (Al_{2,33} Si_{3,67})_8 O_{20} (OH)_4$  (tabl. I, an. 4).

Cette phase de « biotite altérée » inclut les premiers produits de la transformation des biotites. Ce sont des minéraux di-octaédriques présentant, par rapport à la biotite saine, une perte presque totale de potassium,

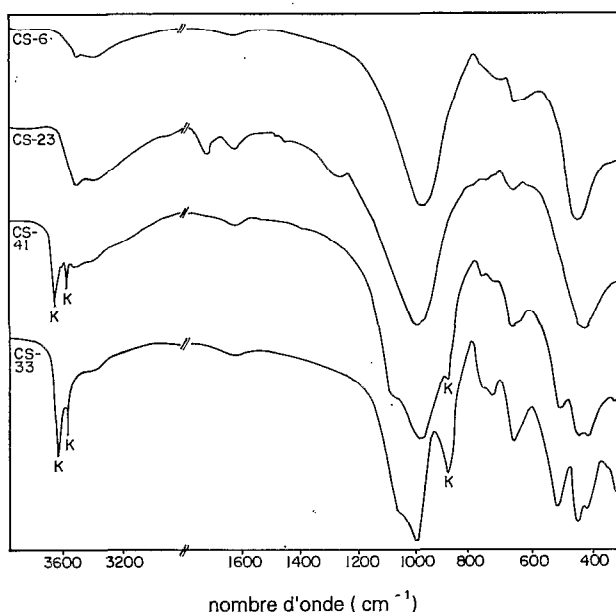


Fig. 4. — Spectres d'absorption IR de biotites (CS 6) et de leurs produits d'altération (CS 23, 41 et 33) montrant le développement progressif de la kaolinite.

*IR absorption spectra of biotites (CS 6) and of their weathering products (CS 23, 41 and 33) showing the development of kaolinite.*

partielle de fer et de magnésium octaédriques et une acquisition d'aluminium octaédrique, tandis que la composition tétraédrique (Si-Al) reste relativement constante, marquée cependant par une légère augmentation du rapport Si/Al (tabl. I). L'aluminium octaédrique est donc d'origine allochtone à l'échelle du feuillet. De plus, la présence de quantités notables de cuivre dans leur structure est une des caractéristiques marquantes de ces phyllosilicates. Cependant, pour simplifier le raisonnement, nous n'avons pas pris ici le Cu en considération dans les calculs des formules structurales, mais cette association du cuivre aux phyllosilicates d'altération, dans les sites tétraédriques, octaédriques ou interfoliaires, sera discutée dans la deuxième partie (TOLEDO-GROKE *et al.*, 1989).

Les analyses des produits de transformation pseudomorphique des biotites, à des degrés variés d'altération, ont été portés sur diagrammes triangulaires (fig. 5). Les points d'analyse se distribuent suivant des domaines plus ou moins continus allant de la biotite saine à la vermiculite et à la kaolinite selon les données types (DEER *et al.*, 1971).

Divers paramètres géochimiques (K interfoliaire, Fe et Al octaédriques, Si et Al tétraédriques), indices de l'altération, portés sur des graphiques (fig. 6), montrent le caractère graduel de l'évolution d'une biotite fraîche jusqu'à la kaolinite.

## Association 2 : biotite altérée, smectite et kaolinite

Dans cette association, une smectite est intercalée entre la « biotite altérée » et la kaolinite déjà désordonnée (fig. 7).

### Étude morphologique et minéralogique

La diffraction des rayons X de minéraux micacés de cette association montre une phase à 14-15 Å (fig. 2), expansible lors des tests de saturation à l'éthylène-glycol, indiquant la présence d'un minéral type smectite. La kaolinite n'apparaît pas toujours nettement sur les diffractogrammes, car, durant les traitements, elle se sépare facilement de la smectite pseudomorphique.

Cette smectite, en relation à la biotite saine et à la « biotite altérée », présente des lamelles ondulées et séparées dans lesquelles s'observent une perte de pléochroïsme et une diminution de la biréfringence (ph. 5, fig. 7). Sous le MEB, on peut observer une continuité apparente entre les lamelles de « biotite altérée » et celles de smectites qui se caractérisent par leur habitus alvéolaire (ph. 6).

La kaolinite de cette association, en continuité avec la smectite, perd, à très peu de distance (jusqu'à 10 microns), toutes traces d'une structure micacée originale. Dans les échantillons où la ferruginisation dans les plans de clivage est plus marquée et continue, il est possible de suivre la désorganisation progressive de la structure. Les lignes ferrugineuses, qui sont plus distantes les unes des autres et plus ondulées dans les smectites que dans les « biotites altérées », se rompent et se disloquent dans la kaolinite, avec laquelle elles se mélangent pour former une matrice argilo-ferrugineuse. Dans cette matrice, on peut toujours observer de petits paquets de feuillets de kaolinite et des fragments de lignes ferruginisées indiquant une filiation certaine à partir des biotites (ph. 5).

### Étude géochimique

Les microanalyses des produits de transformation de cette association (fig. 7) sont portées dans le tableau II. On observe que, comme pour l'association 1, la phase la plus enrichie en cuivre est celle qui correspond à la « biotite altérée » (an. 2).

Les analyses 1 à 4 sont semblables aux analyses de « biotite altérée » de l'association 1 (tabl. I) et montrent une évolution analogue, mise en évidence sur les diagrammes triangulaires (fig. 8). Les analyses de smectite (tabl. II, an. 5) indiquent des teneurs plus élevées en silice et en bases, et moins élevées en cuivre et en aluminium, ce qui marque une discontinuité par rapport à la « biotite altérée » mise en évidence sur le diagramme triangulaire Si/Al/Ca - Na - K (fig. 8). Cette constatation écarte la possibilité de considérer la smectite en tant que produit intermé-

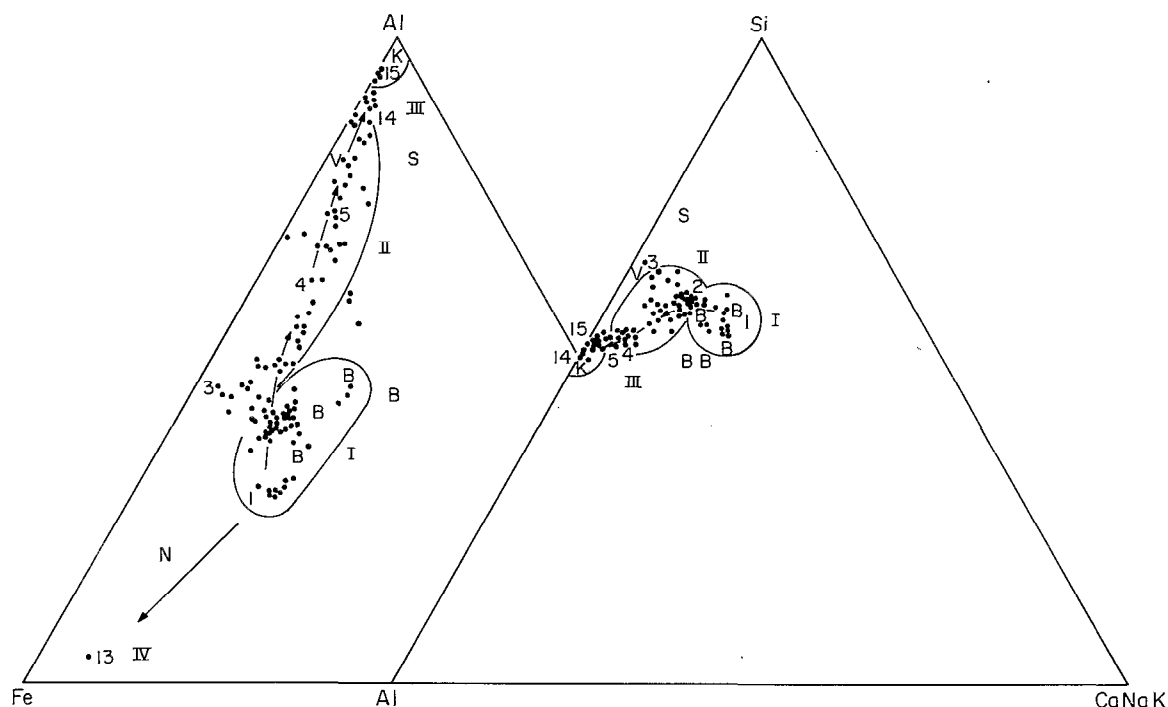


Fig. 5. — Distribution des analyses ponctuelles des minéraux pseudomorphes de la biotite de l'association 1 sur diagrammes triangulaires Al/Fe/Ca - Na - K et Si/Al/Ca - Na - K. I — domaine des biotites saines ; II — domaine des biotites altérées ; III — domaine des kaolinites ; IV — produits ferrugineux. B, V, K et S représentent respectivement biotite, vermiculite, smectite et kaolinite de référence selon DEER *et al.* (1971). 1 à 5, 14 et 15 représentent les analyses du tableau I.

Ternary diagram Al/Fe/Ca - Na - K and Si/Al/Ca - Na - K representing microprobe results obtained for biotite pseudomorphs from association 1. Fields I — biotites ; II — altered biotites ; III — kaolinites ; IV — ferruginous products. Points B, V, K et S correspond to biotite, vermiculite, smectite and kaolinite, respectively (after DEER *et al.*, 1971). 1 to 5, 14 and 15 correspond to analyses from table I.

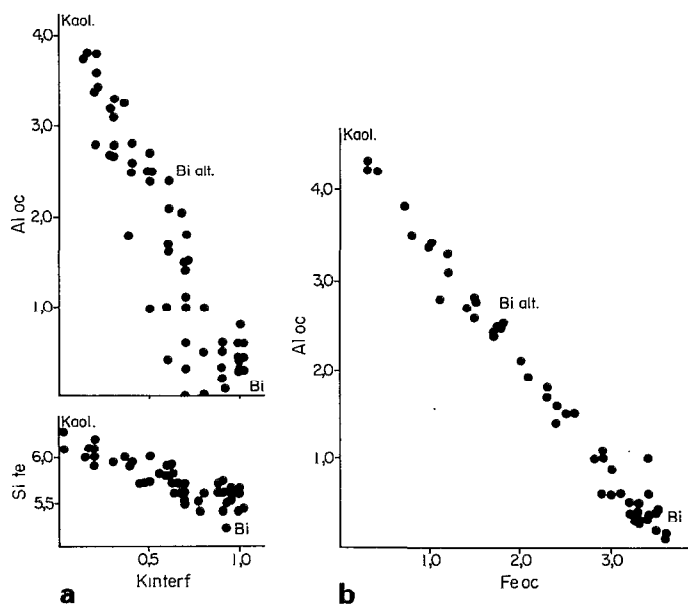


Fig. 6. — Diagrammes représentant les paramètres géochimiques : a = Si tétraédrique et Al octaédrique en fonction de K interfoliaire, et b = Al octaédrique en fonction de Fe octaédrique (calculés sur la base de 22 oxygènes), pris comme indices d'altération et montrant l'évolution continue des biotites vers la kaolinite.

Diagrams showing the geochemical parameters ; a = Si in tetrahedral and Al in octahedral sites versus interlayered K, and b = octahedral Al versus octahedral Fe (calculated on the basis of 22 oxygen atoms), used as weathering index and showing the continuous evolution from biotites to kaolinites.



Photo 5. — Biotites en voie d'altération (association 1 et 2) : « biotite altérée » (Bi.alt.), smectite (esm) et kaolinite (ca). MO, LN  
*Weathering of biotites (associations 1 and 2) : altered biotite (bi.alt.), smectite (esm) and kaolinite (ca). OM, NL*

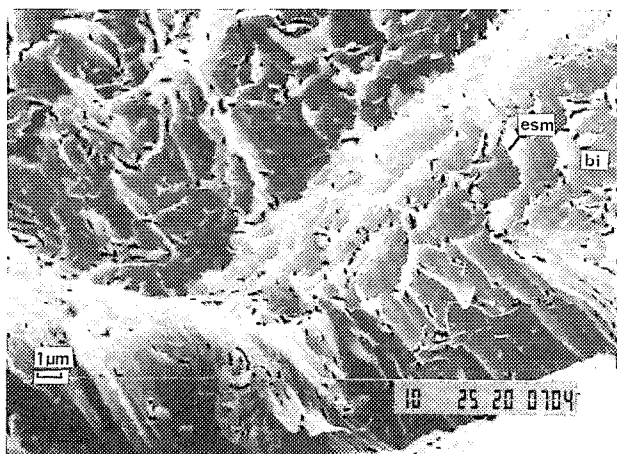
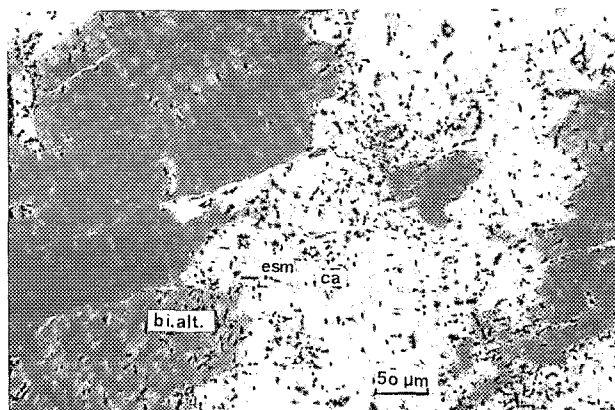


Photo 6. — Smectite (esm) au bord des lamelles, en continuité avec la biotite (bi). MEB  
*Smectite (esm) on the borders of sheets in continuous relation with biotite (bi). SEM.*

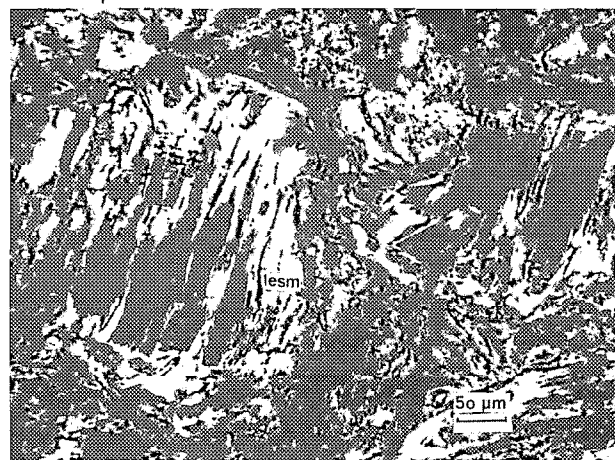


Photo 7. — Pseudomorphose de biotite totalement transformée en smectite de type nontronite (esm) de l'association 3. MO, LN  
*Pseudomorphosis of biotite completely transformed into smectite of nontronite type (esm), in association 3.*

MO, MET, MEB = microscope, respectivement optique, électronique à transmission et à balayage. LN = lumière naturelle.

OM, TEM, SEM = optical microscope, transmitting and scanning electron microscope, respectively. NL = natural light.

Tableau I  
Association 1 : analyses ponctuelles des biotites et de leurs produits d'altération  
Association 1 : electron microprobe analyses of biotites and their alteration products

Groupes		1	2													3			
Analyses n°		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
A	SiO <sub>2</sub>	33,45	32,19	28,16	39,79	42,18	31,6	31,01	32,23	34,78	39,37	33,85	33,03	2,11	43,89	44,48	46,49	0,18	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,30	14,09	12,18	26,26	28,01	13,46	14,52	13,57	17,74	24,36	22,00	26,84	0,50	35,07	35,45	36,40	0,90	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,72	29,43	21,83	19,96	13,06	25,35	21,80	27,21	23,75	7,86	14,04	4,93	89,34	7,32	2,70	3,26	1,82	
	CaO	0,00	0,13	0,11	0,09	0,00	0,21	0,24	0,15	0,10	0,16	0,09	0,05	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	
	Na <sub>2</sub> O	0,11	0,00	0,00	0,04	0,06	0,17	0,18	0,11	0,04	0,05	0,08	0,17	0,00	0,12	0,00	0,04	0,00	
	K <sub>2</sub> O	8,05	4,14	0,58	3,02	2,05	4,39	4,15	4,32	3,50	3,18	1,74	0,64	0,00	0,10	0,08	0,01	0,21	
	MgO	1,82	5,46	6,33	1,82	1,24	3,55	3,64	3,64	3,10	1,97	1,76	0,56	0,00	0,08	0,12	0,06	0,00	
	MnO	0,12	0,33	0,00	0,11	0,32	0,16	0,16	0,00	0,15	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	53,66	
	TiO <sub>2</sub>	1,09	1,42	3,52	0,56	0,31	1,17	1,19	1,36	0,94	0,67	0,30	0,12	1,00	0,07	0,00	0,00	0,00	
	CuO	0,00	5,95	11,40	0,88	0,17	5,96	5,92	5,98	5,21	2,65	1,50	1,19	4,07	0,16	0,03	0,00	22,18	
	Total	92,66	93,14	84,11	92,53	87,40	86,02	82,81	88,57	89,31	80,34	75,36	67,53	97,02	86,85	82,86	86,27	78,95	
B	Si	5,70	5,21	5,26	5,67	6,08	5,52	5,56	5,47	5,61	5,84	5,94	6,02		3,88	4,02	4,04		
	Al	2,30	2,69	2,68	2,33	1,92	2,48	2,44	2,53	2,39	2,16	2,06	1,98		0,12	0,00	0,00		
	Oc. te.	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00		4,00	4,02	4,04		
	Def. te.	-2,30	-2,69	-2,68	-2,33	-1,92	-2,48	-2,44	-2,53	-2,39	-2,16	-2,06	-1,98		-0,12	0,08	0,16		
	Al	0,38	0,00	0,00	2,08	2,84	0,29	0,63	0,18	0,99	2,10	2,50	3,79		3,53	3,78	3,73		
	Mg	0,43	1,32	1,76	0,39	0,27	0,92	0,97	0,92	0,75	0,44	0,29	0,15		0,01	0,02	0,01		
	Fe <sup>3+</sup>	4,95	3,49	3,01	2,14	1,42	3,33	2,94	3,47	2,89	1,99	1,80	0,68		0,48	0,18	0,21		
	Ti	0,14	0,17	0,49	0,06	0,03	0,15	0,16	0,17	0,11	0,07	0,03	0,02		0,01	0,00	0,00		
	Mn	0,00	0,05	0,00	0,01	0,04	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		
	Oc. oct.	5,90	5,03	5,26	4,68	4,60	4,71	4,72	4,74	4,76	4,61	4,62	4,64		4,03	3,98	3,95		
	Def. oct.	0,89	1,84	2,51	1,70	1,52	1,34	1,33	1,47	1,62	1,45	1,60	1,79		0,09	-0,08	-0,16		
	Ca	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01		0,00	0,00	0,00		
	Na	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,06	0,06	0,04	0,01	0,01	0,03	0,06		0,00	0,00	0,01		
	K	1,76	0,86	0,14	0,55	0,38	0,98	0,95	0,94	0,72	0,60	0,39	0,15		0,00	0,01	0,00		
Cat. int.	1,76	0,88	0,16	0,57	0,40	1,08	1,06	1,01	0,75	0,64	0,43	0,22		0,03	0,01	0,01			
Ch. int.	1,76	0,90	0,18	0,58	0,40	1,12	1,11	1,04	0,77	0,67	0,44	0,23		0,03	0,01	0,01			
Ch. tot.	0,35	0,00	-0,05	-0,05	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,04	-0,02	0,04		0,00	0,01	0,01			
	SiO <sub>2</sub> mol	4,22	3,83	3,88	2,54	2,53	3,94	3,58	3,99	3,29	2,71	2,58	2,06		2,10	2,11	2,14		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																		

A : % en poids, B : formules structurales calculées sur la base de 22 oxygènes (biotite) et de 14 oxygènes (kaolinite).

Groupe 1 : biotite saine ; groupe 2 : biotite altérée (2 à 12), produits ferrugineux interlamellaires (13), kaolinite (14 à 15) ; groupe 3 : produits allochtones interlamellaires tels que Kaolinite (16), cryptomélane (17).

A : % in weight ; B : structural formula calculated on the basis of 22 oxygens (biotite) and 14 oxygens (kaolinite).

Group 1 : fresh biotite ; group II : altered biotite (2 to 12), interlayer ferruginous products (13), kaolinite (14 to 15) ; group III : allochthonous interlayer products : kaolinite (16), cryptomelane (17).

diatre entre la « biotite altérée » et la kaolinite ; la smectite résulterait d'une altération directe de la biotite sans même passer par des stades intermédiaires de l'association 1 (vermiculite ou biotite altérée), ce qui implique un changement au cours du temps dans les conditions d'altération. Le même diagramme indique aussi qu'il n'existe pratiquement pas de produits intermédiaires entre la smectite et la kaolinite, la transformation de l'une à l'autre intervenant de manière brusque.

### Association 3 : smectite

Ce cas est le moins fréquent ; il se réfère à la formation de pseudomorphoses de la biotite constituées uniquement de smectite et qui se trouve de manière sporadique dans des échantillons très altérés.

### Étude morphologique et minéralogique

Les diffractogrammes de rayons X pour la fraction micacée de ce matériel montrent l'existence d'une

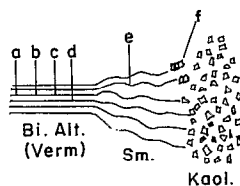


Fig. 7. Représentation schématique des minéraux de l'association 2 ; a à f représentent les analyses 1 à 6 du tableau II.

*Schematic description of minerals in association 2 ; a to f represent data 1 to 6 in table II.*

Tableau II

Association 2 : analyses ponctuelles de produits d'altération de biotites

*Association 2 : electron microprobe analyses of weathering products of biotites*

Groupes		1				2	3
Analyses		1	2	3	4	5	6
A	SiO <sub>2</sub>	33,40	38,07	33,03	38,43	44,63	43,66
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,49	26,66	26,84	15,46	12,52	32,96
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,54	15,61	4,93	25,12	22,85	5,19
	CaO	0,11	0,13	0,05	0,39	0,57	0,06
	Na <sub>2</sub> O	0,05	0,07	0,17	0,00	0,12	0,00
	K <sub>2</sub> O	7,21	2,51	0,63	0,14	1,32	0,72
	MgO	2,57	1,73	0,56	1,82	0,73	0,50
	MnO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,11	0,00
	TiO <sub>2</sub>	0,67	0,47	0,12	0,16	0,24	0,28
	CuO	0,24	3,26	1,19	0,88	1,02	0,16
	Total	85,18	88,53	67,52	82,40	84,11	83,53
B	Si	6,05	5,74	6,02	6,22	7,00	3,99
	Al	1,95	2,26	1,98	1,78	1,00	0,01
	Def.te.	-1,95	-2,26	-1,98	-1,78	-1,00	-0,01
	Al	0,50	2,47	3,79	1,17	1,31	3,54
	Mg	0,69	0,39	0,15	0,44	0,17	0,07
	Fe <sup>3+</sup>	4,48	1,77	0,68	3,06	2,70	0,36
	Ti	0,09	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02
	Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
	Oc. oct.	5,76	4,68	4,64	4,69	4,22	3,99
	Def. oct.	0,20	1,70	1,79	1,65	0,51	-0,08
	Ca <sub>1</sub>	0,02	0,02	0,01	0,07	0,10	0,01
	Na	0,02	0,02	0,06	0,00	0,04	0,00
	K	1,67	0,48	0,15	0,03	0,26	0,09
	Cat. int.	1,71	0,52	0,22	0,10	0,40	0,11
	Ch. int.	1,73	0,54	0,23	0,17	0,50	0,11
	Ch. total	-0,02	-0,02	0,04	0,04	0,01	0,02
	SiO <sub>2</sub> mol	4,94	2,42	2,09	4,22	6,05	2,25
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						

A : % en poids, B : formules structurales calculées sur la base de 22 oxygènes (biotite altérée, 1 à 4), 24 oxygènes (smectite, 5) et 14 oxygènes (kaolinite, 6).

*A : % in weight ; B : number of ions calculated on the basis of 22 oxygens (altered biotite, 1 to 4), 24 oxygens (smectite, 5) and 14 oxygens (kaolinite, 6).*

seule phase minéralogique à 14-15 Å (fig. 2), expansible. Ces pseudomorphoses, observées au microscope optique, paraissent passablement déformées, avec ondulation des lamelles et ouvertures d'espaces

interlamellaires dans lesquels se déposent des hydroxydes de fer (ph. 7).

### Étude géochimique

Les microanalyses révèlent une certaine homogénéité de composition pour ces smectites (tabl. III). Les teneurs en cuivre sont partiellement dues à la contamination par la malachite. Les formules structurales (tabl. III), comme les diagrammes triangulaires (fig. 9) montrent qu'il s'agit d'une smectite type nontronite (DEER *et al.*, 1971).

Tableau III

Association 3 : analyses ponctuelles de produits d'altération de biotites

*Association 3 : electron microprobe analyses of weathering products of biotites*

Analyses		1	2	3	4	5	6	7
A	SiO <sub>2</sub>	42,57	50,64	41,67	48,91	35,14	50,30	46,81
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,95	11,61	6,82	8,64	5,90	8,98	8,83
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,09	23,41	27,26	23,11	20,00	23,25	21,64
	CaO	1,18	1,54	1,44	1,54	1,19	1,19	1,36
	Na <sub>2</sub> O	0,07	0,06	0,10	0,00	0,01	0,00	0,06
	K <sub>2</sub> O	0,07	0,23	0,23	0,14	0,15	0,56	0,26
	MgO	0,54	0,52	0,34	0,57	0,32	0,23	0,44
	MnO	0,00	0,07	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CuO	1,05	1,24	1,71	5,63	5,62	4,34	3,26
	Total	74,52	89,32	79,48	88,54	68,33	88,85	82,66
B	Si	7,67	7,38	7,12	7,59	7,35	7,65	7,41
	Al	0,63	0,62	0,88	0,41	0,65	0,35	0,59
	Def.te.	-0,63	-0,62	-0,88	-0,41	-0,65	-0,35	-0,59
	Al	1,60	1,38	0,50	1,17	0,81	1,26	1,06
	Mg	0,14	0,11	0,09	0,13	0,10	0,05	0,10
	Fe <sup>3+</sup>	2,36	2,57	3,52	2,70	3,15	2,66	2,88
	Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Mn	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Oc. oct.	4,10	4,07	4,13	4,00	4,06	3,97	4,04
	Def. oct.	0,16	0,09	0,28	-0,13	0,08	-0,14	0,02
	Ca	0,22	0,24	0,26	0,26	0,27	0,19	0,25
	Na	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02
	K	0,02	0,04	0,05	0,03	0,04	0,11	0,05
	Cat. int.	0,26	0,30	0,34	0,29	0,31	0,30	0,32
	Ch. int.	0,48	0,54	0,60	0,55	0,58	0,49	0,57
	Ch. total	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
	SiO <sub>2</sub> mol	6,52	7,32	10,20	9,50	9,99	9,40	8,90
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							

A : % en poids, B : formules structurales calculées sur la base de 24 oxygènes (smectite type nontronite).

*A : % in weigh, B : structural formula calculated on the basis of 24 oxygens (smectite : type nontronite).*

### DISCUSSION

L'altération météorique des biotites, tant au laboratoire qu'en milieu naturel, a déjà été étudiée par de nombreux auteurs qui ont développé les aspects minéralogiques, morphologiques, géochimiques et cristallographiques des évolutions observées suivant différentes lithologies et différentes conditions climatiques.

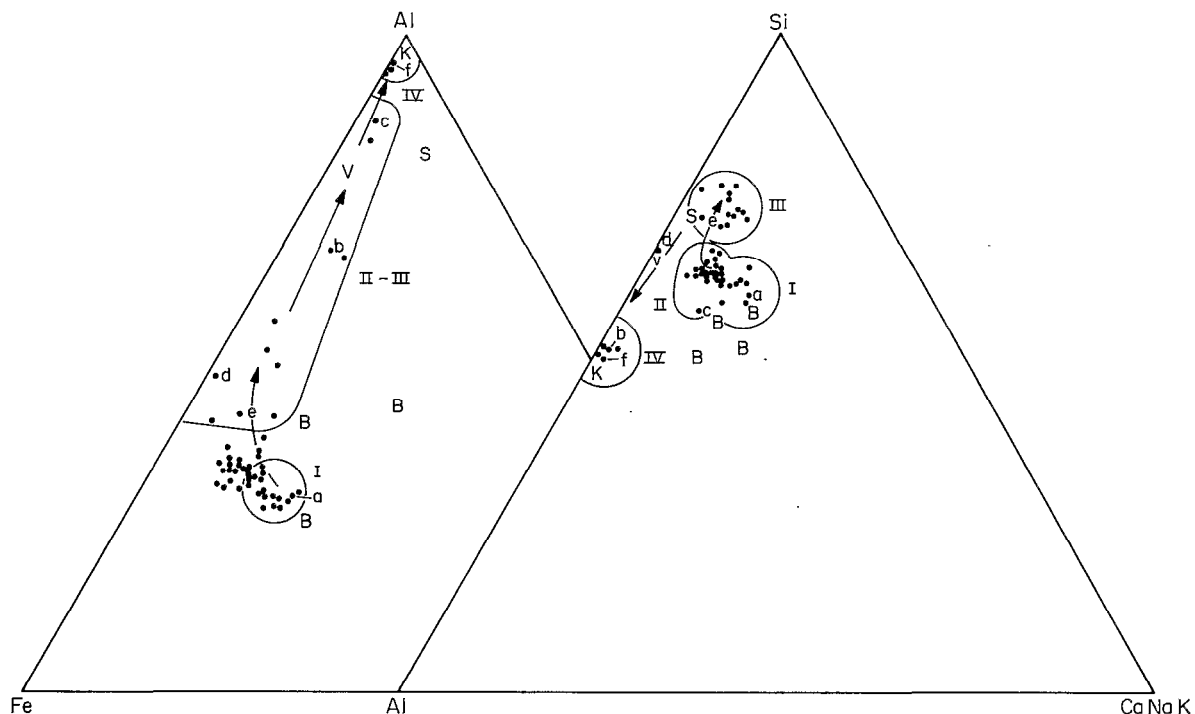


Fig. 8. — Distribution des analyses ponctuelles des minéraux pseudomorphes de la biotite, de l'association 2 sur diagrammes triangulaires Al/Fe/Ca - Na - K et Si/Al/Ca - Na - K. I — domaine des biotites saines ; II — domaines des biotites altérées ; III — domaine des smectites ; IV — domaine des kaolinites. a à f représentent les analyses 1 à 6 du tableau II. B, V, S et K représentent respectivement biotite, vermiculite, smectite et kaolinite de référence selon DEER *et al.* (1971).

*Ternary diagram Al/Fe/Ca - Na - K and Si/Al/Ca - Na - K representing microprobe results obtained for biotite pseudomorphs from association 2. Fields I, IV — correspond to : I — fresh biotites ; II — altered biotites ; III — smectites ; IV — kaolinites. a to f represent data 1 to 6 in table II. Points B, V, S and K correspond to biotite, vermiculite, smectite and kaolinite, respectively (after DEER *et al.*, 1971).*

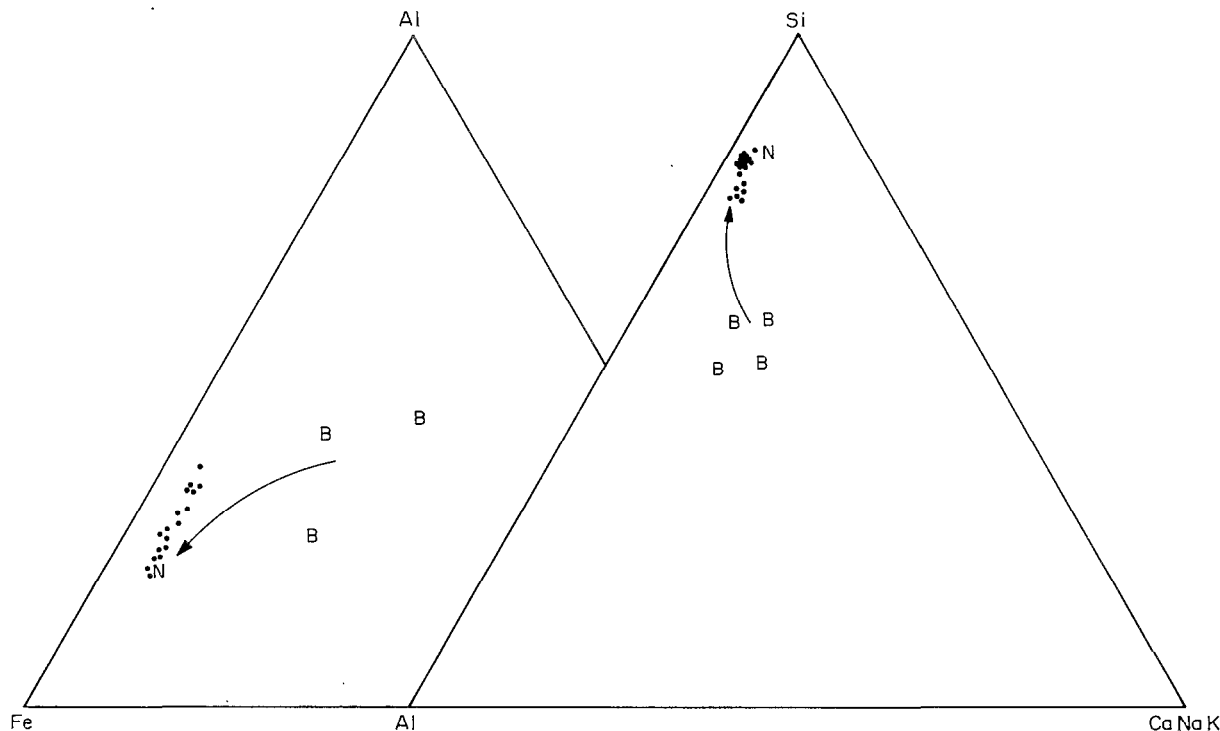


Fig 9. — Distribution des analyses ponctuelles de minéraux pseudomorphes de la biotite de l'association 3 sur diagrammes triangulaires Al/Fe/Ca - Na - K et Si/Al/Ca - Na - K : N = nontronite ; B = biotite de référence selon DEER *et al.* (1971).

*Ternary diagram Al/Fe/Ca - Na - K and Si/Al/Ca - Na - K representing microprobe results obtained for biotite pseudomorphs from association 3. Points N and B correspond to nontronite and biotite, respectively (DEER *et al.*, 1971).*

L'analyse de ces travaux antérieurs conduit à considérer diverses possibilités de filiations minéralogiques déterminées par le contrôle des facteurs géodynamiques externes (climat, topographie, drainage) :

- biotite → smectite (BARSHAD, 1966 ; NOVIKOFF *et al.*, 1972 ; ROBERT et BARSHAD, 1973) ;
- biotite → minéraux interstratifiés du type B-V, vermiculite intergrade, vermiculite (COLEMAN *et al.*, 1963 ; BARSHAD, 1966 ; BOETTCHER, 1966 ; RHOADES et COLEMAN, 1967 ; SEDDOH *et al.*, 1969 ; FARMER et WILSON, 1970 ; WILSON, 1970 ; ROBERT et BARSHAD, 1973 ; ROUSSEAU, 1972 ; WEY et LE DRED, 1973 ; PENVEN *et al.*, 1981) ;
- biotite → kaolinite, avec produits intermédiaires type vermiculite et interstratifiés (NOVIKOFF *et al.*, 1972 ; KITTRICK, 1973 ; SEDDOH et PEDRO, 1974 ; STOCH et SIKORA, 1976 ; MEUNIER et VELDE, 1979 ; GILKES et SUDDIPRAKARN, 1979) ;
- biotite → halloysite avec ou sans produits intermédiaires vermiculitiques (ESWARAN et HENG, 1976 ; PENVEN *et al.*, 1981) ;
- biotite → kaolinite en filiation directe (DE KIMPE et TARDY, 1967 ; OJANUGA, 1973) ;
- biotite → interstratifiés B-V → kaolinite → gibbsite (BOULANGÉ, 1984) ;
- biotite → goethite et hématite (SOUZA et ESWARAN, 1975 ; PENVEN *et al.*, 1981 ; SIGOLO, 1988).

Les observations effectuées dans ce travail indiquent que dans un même niveau d'altération, dans un même échantillon, voire dans un même cristal de biotite en voie d'altération, on peut trouver diverses associations de produits secondaires n'appartenant pas nécessairement à une même filiation :

- 1 - biotite, biotite altérée et kaolinite,
- 2 - biotite altérée, smectite et kaolinite,
- 3 - smectite du type nontronite.

D'un point de vue structural, la « biotite altérée » et la kaolinite liées à l'association 1 conservent la structure micacée de la biotite, formant des pseudomorphoses quasi parfaites. Au contraire, dans l'association 2, les lamelles de smectites présentent des déformations et des ondulations accentuées ; la kaolinite liée à cette association ne conserve pas les caractéristiques structurales de la biotite initiale. La smectite type nontronite de l'association 3 présente des pseudomorphes très imparfaits avec une porosité importante et des déformations accentuées.

Ces variations structurales des produits phyllosilicatés de l'altération des biotites indiquent que la kaolinite provient, soit de la transformation de la « biotite altérée » avec conservation des structures, soit de la transformation des smectites, les structures sont alors mal conservées.

Les analyses chimiques indiquent que le caractère di-octaédrique est croissant pour les produits phyllosilicatés de transformation des biotites. Cette constatation concorde avec les observations de divers auteurs (WILSON, 1970 ; FARMER *et al.*, 1971 ; RIMSAITE, 1967 ; ROBERT et PEDRO, 1969) ; elle serait le signal de

l'oxydation de  $\text{Fe}^{+2}$  en  $\text{Fe}^{+3}$  dans cette couche (GILKES *et al.*, 1972). Cette oxydation produit une augmentation de la charge octaédrique et des mécanismes de compensation sont donc nécessaires. Des études cristallographiques (WILSON, 1970 ; FARMER *et al.*, 1971) ont montré que l'équilibre des charges après oxydation du fer octaédrique intervient probablement par perte de protons des hydroxyles et certainement par expulsion d'une partie des cations octaédriques (Fe et Mg), justifiant ainsi la tendance au caractère di-octaédrique des produits d'altération des biotites.

Mais les modifications de la couche octaédrique peuvent aller au-delà d'une simple diminution des occupations cationiques. En relation à la biotite initiale, les smectites sont plus riches en aluminium hexacoordonné, provenant partiellement, sinon totalement, de la perte en aluminium des couches tétraédriques. Cet aluminium en position octaédrique est accompagné de quantités variables de fer et de magnésium, déterminant toujours une structure di-octaédrique. Durant la transformation en kaolinite de ces smectites, la couche octaédrique perd fer et magnésium, tandis que la désilicification intervient avec perte d'une couche tétraédrique.

Durant la formation de la « biotite altérée », il se produit aussi une entrée d'aluminium en positions octaédriques qui, additionnée à la perte partielle de fer et de magnésium de ces positions, conduit à des minéraux di-trioctaédriques. Dans ce cas, l'aluminium doit provenir d'une migration externe et autre que la courte migration des tétraèdres aux octaèdres ; au reste, par rapport à la biotite saine, la composition tétraédrique de la « biotite altérée » ne présente pratiquement aucune modification. Durant la transformation de cette phase en kaolinite, le fer et le magnésium sont ôtés des positions octaédriques où il ne reste que l'aluminium ; c'est alors qu'il y a réarrangement dans la composition tétraédrique : l'aluminium tétracoordonné passe à l'état hexacoordonné, ce qui s'accompagne probablement d'une occupation concomitante par le silicium des positions tétraédriques ainsi laissées vacantes et d'une transformation de la structure Te-Oc-Te en Te-Oc au travers d'une désilicification ordonnée avec perte d'une couche tétraédrique.

Cependant, certains auteurs ont considéré que la formation de la kaolinite pouvait intervenir par le développement d'une nouvelle couche octaédrique (STOCH et SIKORA, 1976), ce qui impliquerait la rétention de toute la silice initiale, l'apport d'une certaine quantité de silice pour substituer l'aluminium ôté des tétraèdres et un apport substantiel d'aluminium pour former la nouvelle couche octaédrique. Cette possibilité paraît improbable en milieu latéritique de tendance très désilicifiante.

Dans les minéraux formés à partir de l'altération des biotites, le potassium des couches interfoliaires se maintient de manière quantifiable ; sa lixiviation est peu intense. Cette permanence est due à la force de

la liaison des cations interfoliaires dans les couches octaédriques à caractère di-octaédrique (SARRATOSA et BRADLEY, 1958 ; BASSET, 1960 ; BARSHAD et KISHK, 1968 ; LEONARD et WEED, 1970 ; WILSON, 1970 ; GILKES, 1973 ; WILSON, 1975). L'expansion latérale des cristaux est liée à la dynamique des éléments dans les espaces interfoliaires où le potassium est progressivement remplacé par des cations hydratés (BARSHAD, 1948 ; RICH et COOK, 1961 ; SCOTT et SMITH, 1966). Finalement, lors de la kaolinisation tous les cations interfoliaires sont perdus.

Il a été proposé une schématisation de la dynamique des éléments tétraédriques, octaédriques et interfoliaires au cours de la transformation des micas (fig. 10) MILLOT *et al.*, 1966 ; DUNOYER DE SEGONZAC *et al.*, 1970) qui peut être appliquée ici. Les diverses étapes de remobilisation des ions durant l'altération des biotites n'interviennent pas toujours dans le même ordre, ni avec la même intensité suivant les particularités physico-chimiques des microsystemes. C'est pourquoi on observe d'amples variations dans les composants intermédiaires entre les divers phyllosilicates secondaires, principalement dans les cas de la « biotite altérée ».

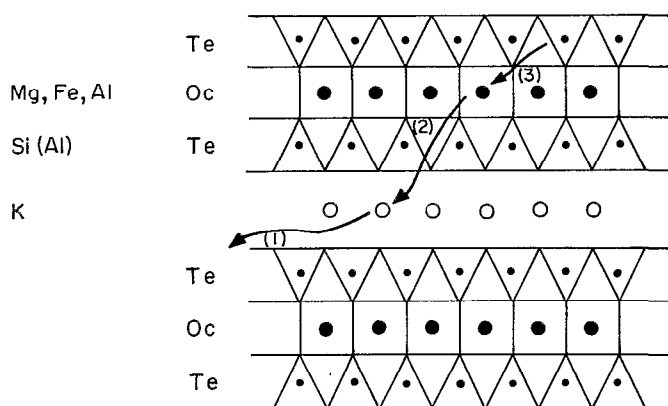


Fig. 10. — Schéma de la dynamique des cations durant la dégradation d'un phyllosilicate 2:1 selon MILLOT *et al.* (1966) : (1) lixiviation des ions interfoliaires ; (2) migration des ions octaédriques vers les positions interfoliaires ; (3) migration des ions tétraédriques vers les positions octaédriques.

Diagram showing the dynamics of cations during weathering of a phyllosilicate 2:1 according to MILLOT *et al.* (1966) : (1) lixiviation of interlayer ions, (2) migration of octahedral ions into interlayer positions, (3) migration of tetrahedral ions to octahedral sites.

C'est dans ce contexte de grande mobilité des ions dans les structures phyllosilicatées en transformation qu'intervient l'enrichissement en cuivre des « biotites altérées » et des smectites ; durant l'ultime transformation en kaolinite, le cuivre est totalement libéré de ces structures.

La diversité des phases minérales secondaires montre qu'il existe des variations au cours du temps, à l'échelle des profils, des horizons et même des microsystemes. A partir de l'observation et des résultats obtenus, il apparaît que l'ultime évolution conduit à la formation de kaolinite (fig. 4 à 8). La présence de produits intermédiaires tel que la « biotite altérée » serait due aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau entre les feuillets de biotites ; les solutions percolantes n'ont pas un temps de contact suffisant pour une kaolinisation directe.

Quant aux smectites en discontinuité géochimique par rapport à la kaolinite (fig. 8), il apparaît fort improbable qu'elles puissent se former en même temps que celle-ci en raison des différences de conditions physico-chimiques que nécessite la formation de ces deux minéraux. Selon NOVIKOFF *et al.*, (1972) les évolutions biotites → (vermiculite) → kaolinite et biotite → vermiculite → montmorillonite sont possibles, mais l'évolution biotite → montmorillonite → kaolinite, observée et étudiée dans l'association 2, est impossible car la biotite, par rapport à la montmorillonite, est déjà déficiente en silice. Ainsi les smectites type montmorillonite ne pourraient se former à partir de la biotite si elles ne sont pas soumises à une accumulation de silice, ce qui pour l'auteur est incompatible avec la formation de kaolinite. Il apparaît donc fortement probable que les smectites étudiées ici soient le résultat d'une paléo-altération et soient instables dans les conditions actuelles plus propices à la kaolinisation.

## CONCLUSION

L'altération des biotites semble donc intervenir suivant deux grands processus qui ont pu se succéder dans le temps et conduisant, tous deux, à la formation de kaolinite (fig. 11) :

- biotite → smectite → kaolinite : transformations au cours desquelles les structures initiales ne sont pas conservées ;
- biotite → biotite altérée → kaolinite : transformations au cours desquelles les structures initiales sont conservées.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à l'aide du professeur D. NAHON (laboratoire de Géosciences de l'Environnement, université Aix-Marseille III), du professeur G. CALAS et de A. MANCEAU (laboratoire de Minéralogie et Cristallographie, université de Paris VI), de J. DELVIGNE (ORSTOM) que nous remercions ici. Les analyses ont été effectuées aux laboratoires de Pétrologie de la Surface (université de Poitiers) pour la microscopie et du BRGM pour la microsonde. Nous remercions aussi la DOCEGEO pour son appui dans les réalisations de terrain, la FAPESP et le CNPq (Brésil), le CNRS et l'université de Poitiers (France) pour leur soutien financier.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 20 octobre 1989.

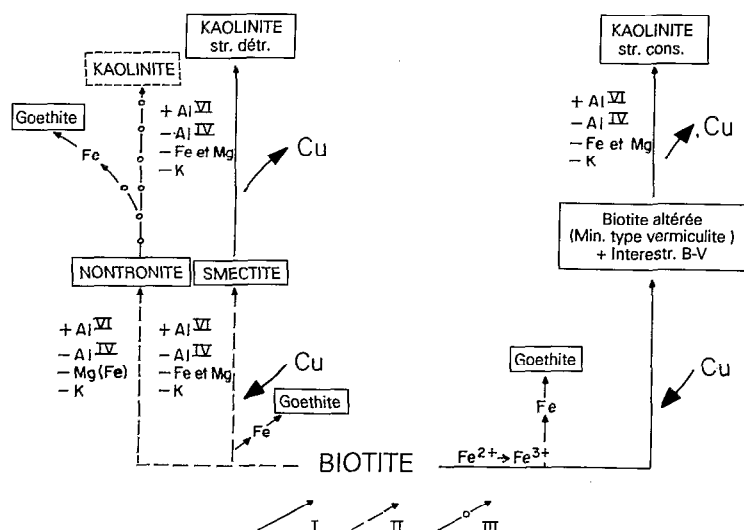


Fig. 11. — Schéma synthétique de l'évolution minéralogique et géochimique des biotites durant l'altération des roches cuprifères de Salobo 3A. Signification des flèches : I = évolution observée, actuelle ; II = évolution observée, ancienne ; III = évolution probable, non observée.

Synthetic representation of the mineralogical and geochemical evolution of biotites during weathering of cupriferous rocks from Salobo 3A. Arrows indicate evolution as follows : I = observed evolution, present ; II = observed evolution, past ; III = probable evolution, not observed.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARSHAD (I.), 1948. — Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange reactions, X-ray analysis, differential thermal curves and water content. *Amer. Miner.* 33 : 655-678.
- BARSHAD (I.), 1966. — The effect of variation in precipitation on the nature of clay minerals formation in soils from acid and basic igneous rocks. In : *Proc. Intern. Clay Conf.*, Jerusalem, 1 : 167-173.
- BARSHAD (I.) et KISHK (J.M.), 1968. — Oxydation of ferrous iron in vermiculite and biotite alters fixation and replaceability of potassium. *Science* 162 : 1401-1402.
- BASSET (W.A.), 1960. — Role of hydroxyl orientation in mica alteration. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 71 : 449-456.
- BISDOM (E.B.A.), 1967. — Micromorphology of a weathered granite near the Rio de Arosa (NW Spain). *Leidse Geol. Medelingen.* 37 : 33-67.
- BISDOM (E.B.A.), STOOPS (G.), DELVIGNE (J.), CURMI (P.) et ALTMULLER (H.J.), 1982. — Micromorphology of weathering biotite and its secondary products. *Pédologie*, 32 : 225-252.
- BOETTCHER (A.L.), 1966. — Vermiculite, hydrobiotite and biotite in the Rainy Creek igneous complex near Libby, Montana. *Clay Miner.* 6 : 283-295.
- BOULANGÉ (B.), 1984. — Les formations bauxitiques latéritiques de la Côte d'Ivoire. *Trav. Doc. ORSTOM*, 175 : 352 p.
- COLEMAN (N.T.), LE ROUX (F.H.) et CODY (J.G.), 1963. — Biotite, hydrobiotite and vermiculite in soils. *Nature*, 198 : 409-410.
- DEER (W.A.), HOWIE (R.A.) et ZUSSMAN (J.), 1971. — *Rock Forming Minerals*. Vol. 3 : Sheet Silicates. Longman, London : 270 p.
- DE KIMPE (C.) et TARDY (Y.), 1967. — Étude de l'altération d'une biotite en kaolinite par spectrométrie infra-rouge. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 19 : 81-85.
- DUNOYER DE SEGONZAC (G.), TARDY (Y.) et MILLOT (G.), 1970. — Évolutions symétriques des micas au cours de l'altération superficielle et de la diagenèse profonde. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 22 : 51-67.
- ESWARAN (H.Y.) et HENG (Y.Y.), 1976. — The weathering of biotite in a profile on gneiss in Malaysia. *Geoderma*, 16 : 9-20.
- FARIAS (N.F.) et SAUERESSIG (R.), 1982. — Jazida de cobre Salobo 3A. In : *Anais I Simp. Geol. Amaz.*, Belém : 39-45.
- FARMER (V.C.) et WILSON (M.J.), 1970. — Experimental conversion of biotite to hydrobiotite. *Nature*, 226 : 1069-1070.
- FARMER (V.C.), RUSSEL (J.D.), MCHARDY (W.J.), NEWMAN (A.C.D.), AHLRICHS (J.L.) et RIMSAITE (J.Y.H.), 1971. — Evidence for loss of protons and octahedral iron from oxidized biotites and vermiculites. *Min. Mag.* 38 : 121-137.
- GILKES (R.J.), YOUNG (R.C.) et QUIRCK (J.P.), 1972. — The oxydation of octahedral iron in biotite. *Clays Clay Miner.* 20 : 303-315.
- GILKES (R.J.), 1973. — The alteration products of potassium depleted oxybiotite. *Clays Clay Miner.* 21 : 303-313.
- GILKES (R.J.) et SUDDHIPRAKARN (A.), 1979. — Biotite alteration in deeply weathered granite. I. Morphological, mineralogical and chemical properties. — II. The oriented growth of secondary minerals. *Clays Clay Miner.* 27 : 349-367.
- GRUNER (J.W.), 1934. — The structure of vermiculites and their collapse by hydration. *Am. Miner.* 19 : 555-575.
- KITTRICK (J.A.), 1973. — Mica derived vermiculites as unstable intermediates. *Clays Clay Miner.* 21 : 479-488.
- KOUD (J.M.), 1985. — Pétrologie, minéralogie, métallogénie et géochimie des gites du cuivre du Niari au Congo. Thèse doct., Université de Strasbourg : 181 p.
- LEONARD (R.A.) et WEED (S.B.), 1970. — Mica weathering rates as related to mica type and composition. *Clays Clay Miner.* 18 : 187-195.
- MARTINS (L.P.B.), SAUERESSIG (R.) et VIEIRA (M.A.M.), 1982. — Aspectos petrográficos das principais litologias da sequência Salobo. In : *Anais I Simp. Geol. Amaz.*, Belém : 253-262.
- MEUNIER (A.), 1977. — Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystèmes. Étude des arènes du Massif granitique de Parthenay. *Mém. Soc. Géol. Fr.* 140 : 80 p.
- MEUNIER (A.) et VELDE (B.), 1979. — Biotite weathering in granites of western France. In : *VI Intern. Clay Conf.* 1978 : 405-413. Elsevier.

- MEYER (D.J.K.) et FARIAS (N.F.), 1980. — O depósito de cobre de Salobo 3A. In : 31 Congr. Bras. Geol., Baln. Camboriú 1980, *Bol. nº 2, resumos* : 382.
- MILLOT (G.), LUCAS (J.) et PAQUET (H.), 1966. — Évolution géochimique par dégradation des minéraux argileux dans l'hydrosphère. *Geol. Rundschau*, 55 : 1-20.
- NOVIKOFF (A.), TSAWLASSOU (G.), GAC (J.Y.), BOURGEAT (F.) et TARDY (Y.), 1972. — Altération des biotites dans les arènes des pays tempérés, tropicaux et équatoriaux. *Sci. Géol. Bull.* 25 : 287-305.
- OJANUGA (A.G.), 1973. — Weathering of biotite in soils of a humid tropical climate. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 37 : 644-646.
- PARISOT (J.C.), 1989. — L'altération latéritique des protares cuprifères au Brésil. Thèse doct. Université de Poitiers : 183 p.
- PENVEN (M.J.), FEDOROFF (N.) et ROBERT (M.), 1981. — Altération météorique des biotites en Algérie. *Geoderma*, 26 : 287-309.
- RHOADES (J.D.) et COLEMAN (N.T.), 1967. — Interstratification in vermiculite and biotite produced by potassium sorption. I. Evaluation by simple X-Ray diffraction pattern inspection. *Soil Sci. Amer. Proc.* 31 : 366-372.
- RICH (C.J.) et COOK (M.G.), 1961. — Formation of dioctahedral and trioctahedral micas. In : 10th Nat. Conf. Clays. Clay Miner. : 96-106.
- RIMSAITE (J.), 1967. — Biotites intermediates between dioctahedral and trioctahedral micas. In : 15th Nat. Conf. Clays Clay Miner. : 375-393.
- ROBERT (M.), 1975. — Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. Agron.* 26 : 363-399.
- ROBERT (M.) et BAZRSHAD (I), 1973. — Transformation expérimentale des micas en vermiculites ou smectites ; propriétés des smectites de transformation. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 24 : 137-151.
- ROBERT (M.) et PEDRO (G.), 1969. — Études des relations entre les phénomènes d'oxydation et de l'aptitude à l'ouverture dans les micas trioctédriques. Dans *Intern. Clay Conf.* 1969, Tokyo : 455-473.
- ROBERT (M.) et TESSIER (D.), 1974. — Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. Agron.* 25 : 859-882.
- ROUSSEAU (J.M.), 1972. — Cristallochimie et vermiculisation des micas trioctédriques. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 24 : 135-136.
- SCOTT (A.D.) et SMITH (S.J.), 1966. — Visible changes in macro-mica particles that occur with potassium depletion. In : Proc. Nat. Conf. Clays Clay. Miner. 26/69 : 357-373.
- SEDDOH (F.K.), PEDRO (G.), ROBERT (M.) et DEJOU (J.), 1969. — Sur l'évolution des biotites et la formation d'intergrades à 14 Å (vermiculite - chlorite) dans les arènes granitiques de Tazilly (Massif de Luzy, Morvan Méridional). *C.R. Acad. Sci. Paris* 268D : 1901-1904.
- SEDDOH (F.K.) et PEDRO (G.), 1974. — Caractérisation des différents stades de transformation des biotites et biotites chloritisées dans les arènes granitiques du Morvan. Conséquences minéralogiques et géochimiques sur l'évolution des micas dans les conditions de la surface du globe. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 26 : 107-125.
- SERRATOSA (J.M.) et BRADLEY (W.F.), 1958. — Determination of the orientation of OH bond axes in layer silicates by infrared absorption. *J. Phys. Chem.* 62 : 1164-1167.
- SIGOLO (J.B.), 1988. — As formações bauxíticas latériticas do Maciço Alcalino de Passo Quatro (MG). Thèse doct., Inst. Geociências, Univ. São Paulo, 186 p.
- SOUZA (E.C.) et ESWARAN (H.), 1975. — Alteration of micas in the saprolite of a profile from Angola : a morphological study. *Pédo-logie* 25 : 71-79.
- STOCH (L.) et SIKORA (W.), 1976. — Transformations of micas in the process of kaolinisation of granites and gneisses. *Clays Clay Miner.* 24 : 156-162.
- TARDY (Y.) et GAC (J.Y.), 1968. — Minéraux argileux et vermiculites Al dans quelques sols et arènes des Vosges. Hypothèse sur la néoformation des minéraux à 14 Å. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.* 21 : 285-304.
- TOLEDO-GROKE (M.C.), 1986. — Intemperismo das rochas mineralizadas em cobre do Salobo 3A, Serra dos Carajás. Mecanismo de alteração dos minerais primários e localização do cobre nos produtos secundários. Thèse de doct., Univ. de São Paulo, 172 p.
- TOLEDO-GROKE (M.C.), PROST (D.), ILDEFONSE (Ph.), MELFI (A.J.), DELVIGNE (J.) et PARISOT (J.C.), 1985. — Alteração dos minerais na formação supérgena cuprífera do Salobo 3A (Serra dos Carajás, Brasil). *Rev. Bras. Geociências* 15 : 293-299.
- TOLEDO-GROKE (M.C.), MELFI (A.J.) et PARISOT (J.C.), 1987. — Comportamento do cobre durante o intemperismo das rochas xistosas cupríferas do Salobo 3A, Serra dos Carajás. *Geoch. Bras.* 1 : 187-200.
- TOLEDO-GROKE (M.C.), PARISOT (J.C.), MELFI (A.J.) et BOULANGE (B.), 1989. — Altération des biotites dans les roches cuprifères de Salobo 3A, Serra dos Carajás (Brésil). II. Association du cuivre aux phyllosilicates secondaires. *Géodyn.* 4 (2) 1989 :
- WALKER (G.F.), 1949. — The decomposition of the biotite in the soil. *Min. Mag.* 28 : 693-703.
- WEY (R) et LE DRED (R), 1973. — vermiculite et vermiculisation. *Bull. Gr. Fr. Arg.* 24 : 11-134.
- WILSON (M.J.), 1966. — The weathering of biotite in some Aberdeenshire soils. *Min. Mag.* 35 : 1080-1093.
- WILSON (M.J.), 1970. — A study of weathering in a soil derived from a biotite hornblende rock. I. The weathering of biotite. *Clay Miner.* 8 : 291-303.
- WILSON (M.J.), 1975. — Chemical weathering of some primary rock-forming minerals. *Soil. Sci.* 119 : 349-355.