

724

C.R. Acad. Sci. Paris,  
t. 319, série II,  
p. 1383 à 1389,  
1994

# Composition chimique des eaux de nappe et évolution d'un matériau ferrallitique en présence du système muscovite-kaolinite-quartz

Catherine Grimaldi, Emmanuel Fritsch et René Boulet

C. G. : INRA, Science du Sol,  
65, route de Saint-Brieuc, 35042  
Rennes Cedex, France;

E. F. : ORSTOM, CSIRO, Division of  
Soils, PB 2,  
Glen Osmond SA 5064, Australie;

R. B. : ORSTOM, Instituto de  
Geociencias DGG USP,  
CP 20899, CEP 01498.970, Sao Paulo  
SP, Brésil.

**Résumé** Le matériau pédologique étudié est une allotérite schisteuse ferrallitique qui se transforme, en conditions hydromorphes, en un matériau déferruginisé et blanchi où se produit une intense kaolinisation de muscovite, par transformation topotactique et progressive. La composition chimique des eaux de nappe correspondantes confirme l'absence de précipitation de kaolinite à l'équilibre avec la solution et rend compte des conditions géochimiques favorables à cette transformation : eaux acides et très diluées en potassium, silice et aluminium. Cette réaction libérant les cations interfoliaires mais pas la silice, la dissolution du quartz se poursuit indépendamment de l'altération de la muscovite.

**Mots-clés** : Milieu tropical humide, Eau de nappe, Altération, Kaolinite, Muscovite, Guyane, France.

## **Abstract** Chemical composition of groundwater and evolution of ferrallitic material in presence of muscovite, kaolinite and quartz in ferrallitic soils

The studied alteritic schist material changes under hydromorphic conditions into an iron-impooverished and bleached material where topotactic and gradual kaolinitization of muscovite was identified. Chemical composition of groundwater confirmed that kaolinite does not precipitate at equilibrium with solution, and specified the conditions which favour this transformation: acid water with very low concentrations of potassium, silica and aluminium. This transformation releases interfoliar cations but not silica, and dissolution of quartz occurs at the same time.

**Keywords** : Tropical rain forest, Groundwater, Weathering, Kaolinite, Muscovite, Guyane, France.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 43163  
Cote : B ex 1.

**Abridged  
English  
Version**

**K**AOLINITE is a very common mineral in soils. Many workers postulated that kaolinite precipitates at equilibrium with natural waters. However, some mineralogical studies have described topotactic transformation of muscovite into kaolinite (Stoch and Sikora, 1976; Fritsch, 1984; Banfield and Eggleton, 1990; Jiang and Peacor, 1991; Robertson and Eggleton, 1991; Singh and Gilkes, 1991 etc.). The present Note specifies the hydrochemical conditions which favour this reaction and describes the effect on the chemical composition of solution.

The studied area is located in French Guiana under tropical rainforest. The geological substratum is made up of Precambrian

schist, rich in muscovite and quartz. The annual rainfall varies from 2,500 to 4,000 mm with a dry season in which the monthly rainfall is often below 50 mm. A large geochemical export now affects the ferrallitic soils and the schist alteritic material appears near the soil surface (Boulet *et al.*, 1984). This alteritic material is generally red and made up of quartz, muscovite, kaolinite and ferric oxy-hydroxides. In the lower part of the landscape (**figure 1**) this material is bleached under the influence of the groundwater table where hematite and goethite dissolve (Fritsch, 1984). Only then is muscovite gradually kaolinitized. Detailed optical and scanning electron microscopy examination showed topotactic replacement of mus-

### Note

présentée par  
Georges Pédro.  
remise le 28 mars 1994,  
acceptée après révision  
le 3 octobre 1994.

ORSTOM Documentation



010003907

covite layers by kaolinite layers. The neoformed kaolinite phase is highly crystalline. This transformation minimizes chemical change: the ratio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  is slightly lower in kaolinite than in muscovite, octahedral iron is preserved, but interlayer cations ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ) are removed (Fritsch, 1984).

Groundwater was sampled through piezometers in the red and in the bleached lateritic materials during dry season or after a long time without rainfall. This was done in order to avoid mixing with surface water and to favour a prolonged contact of water with minerals.

Sampled waters are very diluted (table) and their conductivity is below  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Sodium and chloride are the most abundant ions. pH varies between 4 and 4.6 in the groundwater originating from red alteritic material and between 4.5 and 6 in the groundwater from the bleached alteritic material. Potassium and calcium contents show correlative increase with pH (figure 2). Other chemical concentrations do not vary notably.

( $\text{Na}^+$ ) and ( $\text{Cl}^-$ ) are good indices of water residence time in soil. Indeed both ions orig-

inate from rainfall, are removed only very little by roots and not released from minerals. But they are concentrated during evaporation or evapotranspiration either side of periods of rain. In the sampled groundwater ( $\text{Na}^+$ ) and ( $\text{Cl}^-$ ) are at least twice as concentrated as in surface water (Grimaldi, 1988); ( $\text{NO}_3^-$ ) and ( $\text{SO}_4^{--}$ ), originally from organic source, are very low. This indicates that the origin of potassium and calcium is only mineral. Their concentrations, which increase in the bleached lateritic material water, result from muscovite weathering. At the same time no correlative increase of ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (figure 3) and (Al) is noted. These concentrations are almost constant even though pH varies from 4 to 6 (figure 4). This fact is at variance with the hypothesis of kaolinite precipitation, but it is in agreement with topotactic kaolinitization of muscovite.

This transformation occurs after removal of iron in the lateritic material and in contact with acid and very dilute waters: ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) is lower than quartz solubility, (Al) and ( $\text{K}^+$ ) represent a few micromol/l. The low ( $\text{K}^+$ )/( $\text{H}^+$ ) ratio in water is explained by a high  $\text{K}^+$  uptake by the rain forest which releases  $\text{H}^+$  in return.

## I. INTRODUCTION

La kaolinite est l'un des minéraux secondaires les plus communs dans les sols et les altérations. De nombreux travaux se sont attachés à préciser ses conditions de néoformation ou de stabilité dans le milieu naturel: l'approche la plus courante cherche à mettre en évidence un équilibre thermodynamique entre ce minéral et la solution (Tan *et al.*, 1973; Weaver et Bloom, 1977; Sarazin *et al.*, 1982; Karathanasis *et al.*, 1983; Conyers, 1990...). Plus généralement, les modèles décrivant la composition chimique des solutions aqueuses au cours de l'altération des minéraux supposent un enrichissement de la solution en éléments chimiques par des réactions de dissolution, jusqu'à un certain seuil de concentration où la précipitation du minéral secondaire devient thermodynamiquement possible (Helgeson, 1968; Fritz, 1975; Fouillac *et al.*, 1977...).

Cependant, des études minéralogiques fines montrent que certaines néoformations minérales se produisent par transformation progressive de la structure d'un minéral primaire, sans qu'un passage en solution de tous les éléments chimiques ne soit apparemment nécessaire. Stoch et Sikora (1976), Fritsch (1984), Banfield et Eggleton (1990), Jiang et Peacor (1991), Robertson et Eggleton (1991), Singh et Gilkes (1991)... ont ainsi clairement mis en évidence l'altération topotactique de muscovite en kaolinite. Les conditions dans lesquelles se produit cette transformation sont cependant mal connues, d'où l'étude réalisée en Guyane française.

En Guyane, en effet, dans une altérite schisteuse, la kaolinisation de la muscovite est réalisée sous les conditions d'altération actuelles. Ce matériau pédologique, qui constitue le magasin d'une nappe phréatique, s'est avéré adapté à l'étude des interactions entre la composition chimique des eaux naturelles

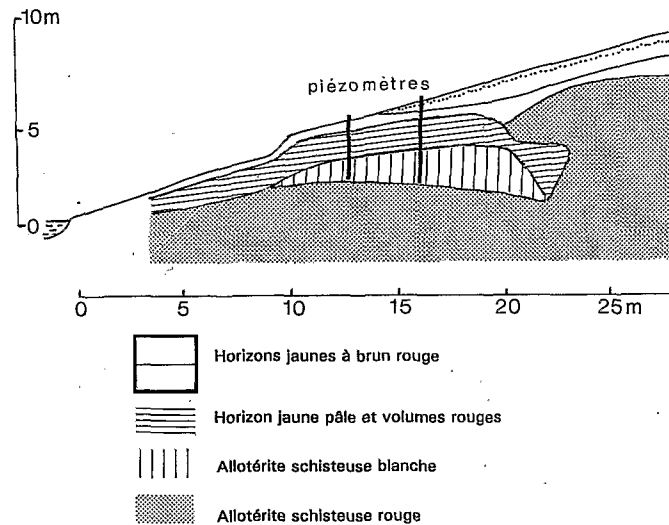
et cette transformation minérale. En effet, la composition minéralogique y est peu diversifiée et, parmi les minéraux présents, seule la muscovite libère des cations alcalins et alcalinoterreux au cours de son altération qui est ainsi aisément identifiable.

## II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1. Cadre pédologique de l'étude

Le site correspond à l'un des dix bassins versants (bassin F) étudiés dans le cadre du programme ECEREX (Sarrailh, 1990), en Guyane. Il est recouvert par la forêt primaire. Les sols sont développés sur la formation Bonidoro, constituée de schistes fins et d'intrusions pegmatitiques, où dominent le quartz et la muscovite. Ils sont soumis à un climat tropical humide (2,5 à 4 m de pluviométrie), avec deux saisons des pluies.

Les sols de cette région subissent actuellement de profondes transformations dues à la mise en déséquilibre d'une couverture ferrallitique initiale (Boulet *et al.*, 1984). Une érosion intense, mécanique mais aussi chimique, a pour conséquence l'apparition à faible profondeur du matériau d'altération du schiste. Dans certaines situations à l'aval du paysage, cette altération du schiste, initialement rouge, évolue en conditions hydromorphes sous l'action d'une nappe. Elle se transforme alors en un matériau largement déferrifié que Fritsch (1984) a étudié sous le nom d'« allotérite schisteuse blanche ». Sa localisation et sa forme s'expliquent par les conditions de circulation de l'eau : à l'amont du versant, au cours des épisodes pluvieux, une nappe d'eau superficielle s'écoule latéralement au-dessus de l'allotérite schisteuse rouge peu profonde et peu perméable (Boulet *et al.*, 1984; Grimaldi et Boulet, 1989) (figure 1). Cette nappe superficielle suralimente vers l'aval la nappe profonde à écoulement plus lent, créant des conditions d'engorgement et favorisant la réduction et la mobilité du fer. A proximité du talweg, par contre, la nappe est « rabattue » et les conditions d'engorgement sont moins importantes et plus éphémères.



### 2. Transformations minérales observées

L'allotérite schisteuse rouge est composée de quartz (30 à 40 %), de muscovite (autour de 10 %), de kaolinite (35 à 50 %), d'oxyhydroxydes de fer (autour de 10 % d'hématite et de goéthite) et de minéraux accessoires (tourmaline surtout, mais aussi staurotite et zircon) (Fritsch, 1984). Au cours de sa transformation en allotérite blanche, l'hématite puis la goéthite sont dissoutes, ce qui se traduit par un jaunissement puis un blanchiment des matrices ferrallitiques (Fritsch *et al.*, 1989). De nombreux volumes rouges à structure lithorelictuelle subsistent cependant; leur bordure subit parfois une ferruginisation accentuée, avant de s'appauvrir également en fer et de s'incorporer au plasma blanchi. La kaolinisation de la muscovite suit de peu ce processus de déferruginisation, dans les fonds matriciels comme à la bordure des lithoreliques, et se généralise dans les matrices blanches, entraînant la disparition des particules micacées. Dans les deux types d'allotérites, les grains de quartz sont marqués par de nombreuses figures de dissolution (Fritsch, 1988).

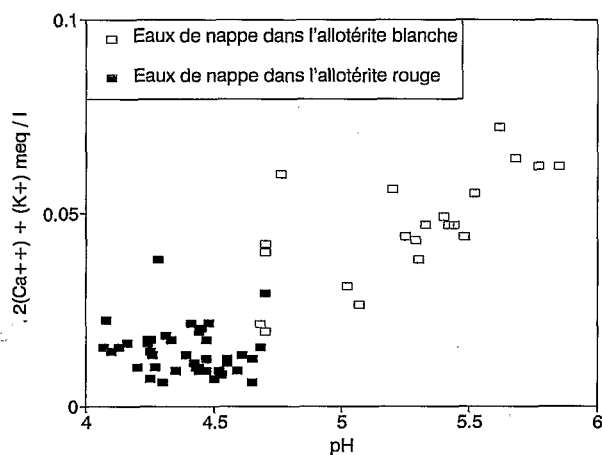
La kaolinisation de la muscovite apparaît comme une transformation topotactique sans passage par une forme intermédiaire. Les observations microscopiques et ultramicroscopiques révèlent une continuité dans un même cristallite entre les deux phases minéralogiques. Les cristaux de kaolinite peuvent se développer à l'intérieur du minéral pri-

Figure 1 Toposéquence à l'aval du bassin F.

Soil sequence on the F watershed.

**Tableau** Composition chimique moyenne des eaux de nappe (conductivité,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; concentrations,  $\mu\text{mole}/\text{l}$ ).  
Mean chemical composition of groundwater.

		Cond.	(Al)	(Ca <sup>++</sup> )	(Mg <sup>++</sup> )	(K <sup>+</sup> )	(Na <sup>+</sup> )	(Cl <sup>-</sup> )	(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Alc.	(H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> )
Eaux de nappe :												
dans l'allotérite rouge ....	Moyenne n=50	35,3	5,5	4,4	17,9	4,9	165,3	222,7	3,4	7,2	-6,1	49,7
l.....	Ecart-type	4,4	4,6	2,1	5,4	3,2	34,8	42,7	3,9	7,5	12,8	13,1
dans l'allotérite blanche...	Moyenne n=27	38,0	2,1	8,5	15,2	25,7	150,1	213,5	5,2	7,2	7,6	45,8
l.....	Ecart-type	10,7	1,2	5,7	4,2	9,3	28,0	37,6	6,4	5,7	6,1	9,1



**Figure 2** Comparaison des teneurs en potassium et calcium, et du pH dans les eaux de nappe des deux altérites.

Comparison of potassium, calcium contents and pH in groundwater from both alteritic materials.

maire et s'individualisent sous forme de grands vermicules (50-500  $\mu\text{m}$ ); ou bien la kaolinisation affecte les extrémités des particules micacées et conduit à la formation d'éventails, avec parfois dans ce dernier cas, présence de cales de kaolinite entre les feuillets. Les analyses chimiques ponctuelles de cristaux de muscovite en voie de transformation montrent une diminution progressive du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (de 2,15 dans le pôle micacé à 2 dans le pôle kaolinitique) avec, simultanément, départ des cations interfoliaires, du potassium, mais aussi du sodium ou du calcium selon leur présence occasionnelle (entre 1 et 2 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{CaO}$  dans la muscovite) (Fritsch, 1984). Le fer des cavités octaédriques de la muscovite (1 % de  $\text{Fe}^{3+}$ ) subsiste dans la kaolinite, ce qui va dans le sens d'une déstabilisation seulement partielle du réseau cristallographique du minéral primaire. En spectrométrie infrarouge, la kaolinite directement issue de la muscovite apparaît bien cristallisée (Fritsch, 1984).

### 3. Prélèvements et analyses de la nappe phréatique

La nappe phréatique a été prélevée en saison sèche ou après une période sans pluie, afin de limiter l'influence des eaux superficielles et afin de favoriser d'éventuelles réactions d'équilibre avec les minéraux, en conditions de contact prolongé. Elle est pompée en profondeur, à partir de neuf tubes piézométriques: deux sont installés sur la toposéquence étudiée, au niveau de l'allotérite blanche (figure 1); tous les autres prélèvements correspondent à l'allotérite rouge.

Le pH des eaux est mesuré immédiatement après leur prélèvement. Une aliquote, filtrée sur le terrain sous azote N48 à 0,01  $\mu\text{m}$  et acidifiée par HCl Suprapur, est utilisée pour les analyses de l'aluminium et du fer à la torche à plasma. Le reste de l'échantillon est filtré à 0,45  $\mu\text{m}$ . Le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium sont dosés par absorption atomique sur un spectromètre de flamme, les ions chlorure, nitrate, sulfate et la silice par colorimétrie. L'alcalinité totale est titrée par potentiométrie.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les eaux de nappe prélevées au cours de cette étude ont une conductivité très faible, inférieure à 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (tableau). Les ions dominants sont le sodium et le chlorure.

Le pH est compris entre 4 et 4,6 pour les eaux de nappe recueillies dans l'allotérite rouge, et entre 4,5 et 6 pour les eaux de nappe recueillies dans l'allotérite blanche. Entre ces deux groupes de prélèvements, lorsque le pH augmente, les concentrations en

potassium et calcium augmentent aussi (figure 2), alors que les autres éléments ne varient pas de façon significative.

### 1. Origine du potassium et du calcium

Les teneurs en sodium et chlorure des eaux de nappe sont un indicateur du temps de résidence de l'eau dans le sol. En effet, ces ions, apportés par les pluies et peu absorbés par la végétation, se concentrent progressivement dans la solution du sol par évaporation et absorption racinaire d'eau, entre les épisodes pluvieux. Les eaux de cette étude ont des teneurs au moins deux fois plus élevées en sodium et chlorure (tableau) que celles des écoulements superficiels au cours des crues (Grimaldi, 1988). Les teneurs en nitrate et sulfate sont également très faibles. Tout ceci confirme l'hypothèse d'un contact prolongé des eaux de nappe avec les minéraux du sol, sans mélange récent avec des eaux superficielles. Une origine végétale (pluviolévitants et litière) pour  $K^+$  et  $Ca^{++}$  est en particulier exclue. Dans ces conditions, l'augmentation des concentrations en potassium et calcium dans les eaux baignant l'allotérite blanche ne peut être liée qu'à l'altération de la muscovite, où ces deux cations sont présents en position interfoliaire. Les concentrations en sodium ne peuvent être interprétées de la même manière à cause des apports météoriques prédominants pour cet élément.

Dans l'allotérite rouge, par contre, les eaux recueillies ne mettent pas en évidence l'altération de la muscovite: en effet, les teneurs en potassium et calcium restent très faibles.

### 2. Devenir de la silice et de l'aluminium

L'hydrolyse totale d'une muscovite moyenne sur le site, dont la formule est calculée à partir d'analyses à la microsonde (Fritsch, 1984), libère en solution, pour 1 équivalent de cations interfoliaires, 3 moles de silice et 2,7 moles d'aluminium.

Or, les eaux de nappe de l'allotérite blanche où le potassium et le calcium sont mis en solution ne montrent pas corrélativement d'augmentation des teneurs en silice (fi-

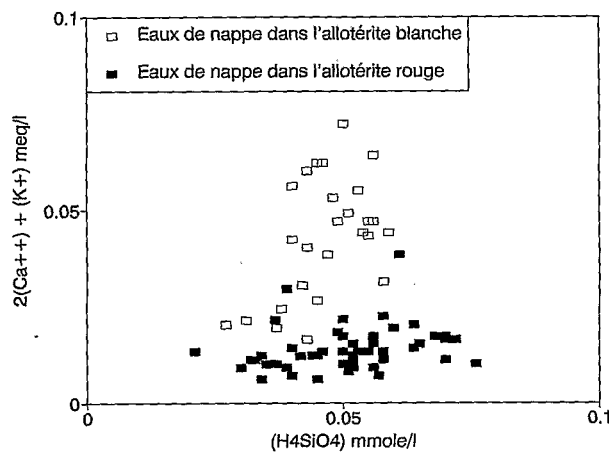


Figure 3

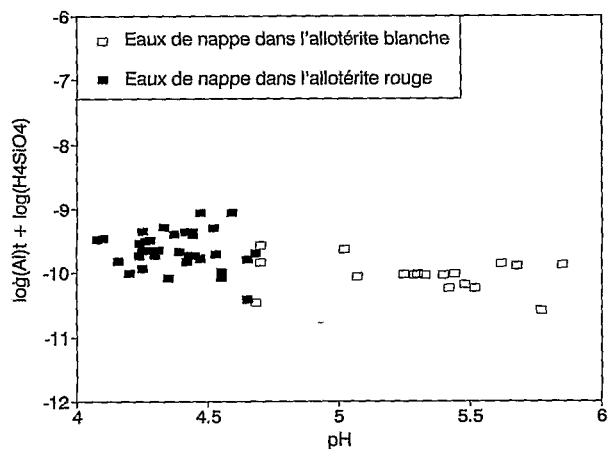


Figure 4

gure 3) et en aluminium. On est donc loin d'une dissolution congruente de la muscovite.

Une précipitation de kaolinite à l'équilibre avec la solution et immobilisant toute la silice et l'aluminium issus de la dissolution de la muscovite est peu probable. En effet, toute précipitation minérale à l'équilibre augmente le pouvoir tampon de la solution et introduit une relation entre les concentrations de silice, d'aluminium et le pH. Ici, une variation de pH de plus d'une unité, lorsque les cations interfoliaires sont libérés dans la solution, ne semble pas influencer en retour les concentrations en silice. Celles en aluminium diminuent très faiblement sans relation avec le pH (figure 4). Ainsi, dans l'allotérite blanche où la muscovite se transforme massivement en kaolinite, l'évolution de la composition chimique des eaux de nappe corres-

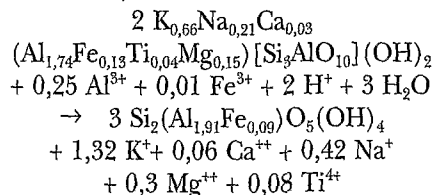
Figure 3 Comparaison des teneurs en potassium et calcium, et de la silice dans les eaux de nappe des deux allotérites.

Comparison of potassium, calcium contents and silica in groundwater from both alteritic materials.

Figure 4 Evolution de  $\log(AI)_{total} + \log(H_4SiO_4)$  en fonction du pH.

Evolution of  $\log(AI)_{total} + \log(H_4SiO_4)$  versus pH in groundwater.

pond bien à l'extraction sélective des cations interfoliaires, sans mise en solution de silice et d'aluminium. Pour la muscovite moyenne du site étudié, elle est conforme à la réaction :



La consommation d'eau et de protons sert à former les groupements OH nécessaires au changement de coordination de l'aluminium.

### 3. Conditions géochimiques de la transformation de muscovite

A l'échelle macroscopique dans l'allotérite blanche, comme aux échelles microscopiques sur la lisière des lithoreliques, la réduction du fer semble être un préalable à la kaolinisation de la muscovite. Celle-ci se produit alors au contact d'eaux très diluées, où la concentration en aluminium ne dépasse pas quelques micromoles par litre. Le rapport  $a \text{K}^+ / a \text{H}^+$  y est également très faible, ce qui favorise vraisemblablement le départ du potassium (Stoch et Sichora, 1976; Rausell-Colom *et al.*, 1965, *in* Banfield et Eggleton, 1990; Jiang et Peacor, 1991). Ceci est d'ailleurs généralement le cas dans les eaux des sols ferrallitiques, où le potassium est fortement recyclé par la végétation et les pH plutôt acides. Le rapport  $a \text{K}^+ / a \text{H}^+$  augmente ensuite faiblement au cours de la kaolinisa-

tion de la muscovite par libération de potassium et consommation des protons.

### CONCLUSION

L'analyse des eaux de nappe en milieu ferrallitique met en évidence leur extrême dilution et leur acidité liées à l'absence de minéraux facilement altérables et à un recyclage efficace des éléments nutritifs par la végétation. Les conditions de notre étude excluent toute influence de réactifs organiques. Dans ce domaine de la géochimie minérale, les réactions de néoformation dépendent généralement du pH et des concentrations en cations et silice de la solution. Cependant, toutes les transformations minérales ne passent pas par ce schéma classique d'une précipitation du minéral secondaire à l'équilibre : dans l'allotérite blanche où la kaolinite se forme massivement à partir de la muscovite, le réseau cristallin du minéral primaire est partiellement conservé. Dans les eaux de nappe correspondantes, il n'existe pas de relation d'équilibre entre les concentrations de silice, d'aluminium et le pH. Seule se produit une mise en solution des cations interfoliaires de la muscovite, associée à une augmentation du pH, qui garantit la stabilité de la kaolinite néoformée. La silice n'étant pas libérée au cours de cette transformation, le quartz continue à se dissoudre simultanément.

Dans une prochaine Note, l'évolution de ces matériaux ferrallitiques, toujours soumis à l'action de la nappe, mais après disparition totale de la muscovite, sera considérée.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BANFIELD, J. F. et EGGLETON, R. A., 1990. Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite, and K-feldspar weathering, *Clays Clay Minerals*, 38, 1, p. 77-89.
- BOULET, R., CHAUVEL, A. et LUCAS, Y., 1984. Les systèmes de transformation en pédologie. In *Livre jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES*, Paris-Grignon, p. 167-179.
- CONYERS, M., 1990. The control of aluminium solubility in some acidic Australian soils, *J. Soil Sci.*, 41, p. 147-156.
- FOUILLAC, C., MICHARD, G. et BOCQUIER, G., 1977. Une méthode de simulation de l'évolution des profils d'altération, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, p. 207-213.
- FRITSCH, E., 1984. Les transformations d'une couverture ferrallitique : analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane française, *Thèse 3<sup>e</sup> cycle*, Univ. Paris-VII, ORSTOM, Paris, 190 p.
- FRITSCH, E., BOCQUIER, G., BOULET, R., DOSSO, M. et HUMBEL, F. X., 1986. Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane française. Analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXII, 4, p. 361-395.
- FRITSCH, E., 1988. Morphologie des quartz d'une couverture ferrallitique dégradée par hydromorphie, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXIV, 1, p. 3-15.

- FRITSCH, E., HERBILLON, A. J., JEANROY, E., PILLON, P. et BARRES, O., 1989. Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage « sols rouges-sols jaunes » dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt savane de l'Afrique occidentale (Booro Borotou, Côte-d'Ivoire), *Sci. Géol. Bull., Strasbourg*, 42, 2, p. 65-89.
- FRITZ, B., 1975. Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales, *Thèse Doct. Ing.*, Univ. Strasbourg, 150 p. et *Sci. Géol. Mém.*, 41, 152 p.
- GRIMALDI, C., 1988. Origine de la composition chimique des eaux superficielles en milieu tropical humide : exemple de deux petits bassins versants sous forêt en Guyane française, *Sci. Géol. Bull., Strasbourg*, 41, 3-4, p. 247-262.
- GRIMALDI, M. et BOULET, R., 1989. Relation entre l'espace poral et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle en Guyane française, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXV, 3, p. 263-275.
- HELGESON, H. C., 1968. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions. I. Thermodynamical relations, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 455-480.
- KARATHANASIS, A. D., FRED ADAMS et HAJEK, B. F., 1983. Stability relationships in kaolinite, gibbsite and Al-hydroxyinterlayered vermiculite soil systems, *SSSAJ*, 47, p. 1247-1251.
- JIANG, W. T. et PEACOR, D. R., 1991. Transmission electron microscopic study of the kaolinitization of muscovite, *Clays Clay Minerals*, 39, 1, p. 1-13.
- ROBERTSON, I. D. M. et EGGLETON, R. A., 1991. Weathering of granitic muscovite to kaolinite and halloysite and of plagioclase-derived kaolinite to halloysite, *Clays Clay Minerals*, 39, 2, p. 113-126.
- SARAZIN, G., ILDEFONSE, P. et MULLER, J. P., 1982. Contrôle de la solubilité du fer et de l'aluminium en milieu ferrallitique, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, p. 1267-1279.
- SARRAILH, J. M., 1990. *Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX*, INRA, Paris, 273 p.
- SINGH, B. et GILKES, R. J., 1991. Weathering of a chromian muscovite to kaolinite, *Clays Clay Minerals*, 39, 6, p. 571-579.
- STOCH, L. et SIKORA, W., 1976. Transformations of micas in the process of kaolinitization of granites and gneisses, *Clays Clay Minerals*, 24, p. 156-162.
- TAN, K. H., PERKINS, H. F. et McCREERY, R. A., 1973. Kaolinite-gibbsite thermodynamic relationship in Ultisols, *Soil Sci.*, 116, p. 8-12.
- WEAVER, R. M. et BLOOM, P. R., 1977. Solution activities of aluminium and silicon in highly weathered soils that contain gibbsite and kaolinite, *SSSAJ*, 41, p. 814-817.