

Géosciences de surface

# Altération différentielle du granite en zone tropicale. Exemple de deux séquences étudiées au Cameroun (Afrique centrale)

Jean Pierre Nguetnkam <sup>a,\*</sup>, Richard Kamga <sup>c</sup>, Frédéric Villiéras <sup>b</sup>,  
Georges Emmanuel Ekodeck <sup>d</sup>, Jacques Yvon <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Département des sciences de la Terre, faculté des sciences, université de Ngaoundéré,  
B.P. 454, Ngaoundéré, Cameroun*

<sup>b</sup> *Laboratoire « environnement et minéralurgie », ENSG-INPL, 15, avenue du Charmois,  
B.P. 40, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France*

<sup>c</sup> *Département de chimie appliquée, École nationale supérieure des sciences agro-industrielles,  
université de Ngaoundéré, B.P. 455, Ngaoundéré, Cameroun*

<sup>d</sup> *Département des sciences de la Terre, faculté des sciences, université Yaoundé-1,  
B.P. 812, Yaoundé, Cameroun*

Reçu le 15 décembre 2006 ; accepté après révision le 8 février 2008

Disponible sur Internet le 27 juin 2008

Présenté par Georges Pédro

## Résumé

Deux séquences d'altération du granite, développées dans deux zones bioclimatiques du Cameroun, ont été étudiées au moyen de l'analyse macroscopique et microscopique, de la diffraction des rayons X (DRX), des analyses chimiques, ainsi que des observations au MEB et au MET. Dans le Sud du Cameroun, en zone forestière tropicale humide, à collines en demi-orange, à pentes moyennes à fortes et à drainage excellent, l'altération du granite conduit à la néoformation de la kaolinite et à la formation d'un sol ferrallitique, constitué de quatre horizons à pH acide et à rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 3$ . À l'extrême-nord, en zone tropicale sèche, à végétation de savane, à pentes faibles et à drainage limité, l'altération du granite conduit à la néoformation de la beidellite et à la formation d'un vertisol chromique, constitué de trois horizons à pH basique et à rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$ . Ces résultats soulignent l'influence du climat et des facteurs de station dans la néoformation des minéraux argileux et dans la différenciation des sols en régions intertropicales. **Pour citer cet article : J.P. Nguetnkam et al., C. R. Geoscience 340 (2008).**

© 2008 Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences.

## Abstract

**Variable weathering response of granite in tropical zones. Example of two sequences studied in Cameroon (Central Africa).** Two weathering sequences of granite, developed in two bioclimatic zones of Cameroon, have been studied by means of macroscopic and microscopic analyses, X-ray diffraction (XRD), chemical analyses, along with SEM and TEM observations. In the tropical rainforest of South Cameroon, characterized by half-orange hills, steep slopes, and good drainage, the weathering of granite leads to the neoformation of kaolinite and the formation of ferrallitic soil, made up of four horizons that display an acid pH and a  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $< 3$ . In the savannah tropical dry climate of the Extreme North, with lesser-grade slopes and slow water-flow

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [jpnguet@yahoo.fr](mailto:jpnguet@yahoo.fr) (J.P. Nguetnkam).

conditions, the weathering of granite leads to the neoformation of beidellite and the formation of chromic vertisol made up of three horizons that display a basic pH and a  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $> 3$ . These results emphasize the influence of climate and local factors on clay minerals and soil formation in the intertropical regions. **To cite this article: J.P. Nguetkam et al., C. R. Geoscience 340 (2008).**

© 2008 Publié par Elsevier Masson SAS pour l'Académie des sciences.

*Mots clés* : Granite ; Altération ; Zone tropicale humide ; Zone tropicale sèche ; Sol ferrallitique ; Vertisol chromique ; Cameroun

*Keywords*: Granite; Weathering; Tropical wet zone; Tropical dry zone; Ferrallitic soil; Chromic vertisol; Cameroon

## Abridged English version

### Introduction

Weathering of rocks and pedogenesis are major processes for soil formation at the earth's surface; they are controlled by climate and local factors [5,23,13]. In intertropical regions, for example, the variability of rainfall, combined with gradient slopes and permeability, leads to the differentiation of ferrallitic, ferruginous and fersiallitic soils [4,20]. In Cameroon, climate varies from tropical rainforest in the South to tropical dry savannah in the Extreme North [19]. Two profiles of soils developed on granite have been studied in these two different bioclimatic zones. The present paper reports the results obtained and emphasizes the influence of climate and local factors on clay minerals and soil formation.

### Environmental settings and methods

The two profiles of soils investigated in the present study are located in the Mvangan and Garey regions, in the South and in the Extreme North of Cameroon, respectively (Fig. 1).

The Mvangan region is located in the South Cameroon plateau, under tropical wet climate, with an average annual rainfall of 1700 mm and an average annual temperature of 23 °C. Its physiography is characterized by half-orange hills, steep slopes, good drainage and dendritic hydrographic network.

The Garey region is located within the Kaele-Mindif pediplain, under tropical dry climate, with an annual rainfall of 800 mm and an average temperature of 28 °C, and is characterized by less grade slopes, slow water-flow conditions, and degraded hydrographic network.

After field descriptions, soil samples of different horizons were collected and characterized by means of optical microscopy after impregnation with resin, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), along with

chemical analyses and pH measurement of water. All the analyses were performed by the department "Formations superficielles" (IRD, Bondy, France), by the department "Environnement et métallurgie" (INPL, Nancy, France) and by the "Centre de recherches pétrographiques et géochimiques" (CRPG, Nancy, France).

### Results

The weathering sequence developed on granite in the tropical wet climate of South Cameroon is made up of five horizons (Fig. 2): a saprolite, a mottled clay horizon, a nodular horizon, an upper soft clayey horizon, and an organo-mineral one, which has not been characterized.

The original rock is calc-alkaline granite, rich in silica, which displays an inequigranular structure (Fig. 3a); its main constituents are potassium feldspar, plagioclase, quartz, biotite, and pyroxene (Table 1).

In saprolite, the granite architecture is preserved (Fig. 3b), but pyroxenes are pseudomorphologically altered into goethite, and feldspars are altered into kaolinite and gibbsite through a halloysitic phase. Kaolinite displays the classical subhexagonal to hexagonal plates (Fig. 3c). Hematite appears at the top of the horizon. When compared with the underlying granite, most basic cations are leached (Table 1).

The mottled clay horizon is little indurated at the top. It is composed of yellow patches, with kaolinite, gibbsite, halloysite, and goethite, and purple reddish patches that contain hematite in addition. It also contains residual saprolitic domains. Geochemically, the mottled horizon is relatively richer in iron and alumina than the underlying saprolite (Table 1).

The nodular horizon shows nodules embedded in a mottled matrix that displays a mineralogical and geochemical composition similar to that of the underlying mottled clay horizon. Nodules consist of hematite, goethite, kaolinite, and little gibbsite. Halloysite is absent.

The upper horizon, yellow coloured, clayey and soft, is composed mainly by kaolinite with quartz, gibbsite

and goethite (Table 1), and exhibits a mineralogical and geochemical composition similar to that of the internodular matrix of the nodular horizon.

The water pH of the four horizons is acid and their  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $< 3$  (Table 1). These four horizons are genetically continuous, because each horizon contains structures and organisations that recall the underlying horizon.

The weathering sequence developed on granite in tropical dry climate of the Extreme North of Cameroon is made up of three horizons (Fig. 4): a saprolite, an intermediate horizon, and an upper dark grey horizon.

The bed rock is also calc-alkaline granite rich in silica, and is constituted of potassium feldspar, plagioclase, quartz, biotite and amphibole (Table 2).

In the saprolite, the granite architecture is well conserved, and it is composed mainly of beidellite, which exhibits in SEM the typical honeycomb fabric of smectites and shows curved laminae in TEM (Fig. 5a and b). Primary minerals are still present. When compared to granite, the saprolite shows depletion in Si, and Na, and a relative enrichment in Al, Ca, Mg, and K.

The intermediate horizon is composed of a melt of dark grey clay materials, and relics of saprolitic domains as well as calcareous nodules are also present. Mineralogically, beidellite is associated with few amounts of montmorillonite, kaolinite, calcite, and relics of primary minerals (Table 2).

The upper horizon is dark grey, clay, and exhibits strong coarse angular blocky structure. It contains calcareous nodules, and is composed of beidellite, montmorillonite, kaolinite, quartz, calcite, dolomite, and feldspar.

These three horizons display a basic pH and  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $> 3$  (Table 2).

### Discussion and conclusion

The analysis of two sequences of soil developed on granite, under tropical rainforest and tropical dry savannah, emphasizes the influence of climate and local factors on clay minerals and soil formation in Cameroon.

In the tropical wet climate of South Cameroon, weathering of granite leads to neof ormation of kaolinite associated with few amounts of gibbsite, through a halloysitic intermediate phase, suggesting that the crystallochemical processes acting at the bottom of profile, in the south, are monosiallisation and allitisation [18]. The neof ormation of kaolinite is generated by the morphoclimatic and hydrological conditions prevailing in the South: high rainfall

regularly distributed throughout the year, combined to steep slopes, induces soil solutions with low concentrations of silica and basic cations; this favours the formation of kaolinite [12,18,22,23]. The studied sequence is made up of four horizons, which display acid pH and  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $< 3$ , which is consistent with the presence of kaolinite. These four horizons are genetically continuous, as observed by many authors in intertropical regions [3,4,11,24]. As is known, the differentiation of these horizons proceeds by weathering, pedoplasmation, ferruginisation, and deferruginisation [2,4,13,20]. The morphology and the ordered succession of the four horizons, as well as their mineralogical and geochemical compositions, characterize ferrallitic soils [4,8,11,15,24].

In the tropical dry savannah of the Extreme North of Cameroon, the weathering of granite leads to the exclusive neof ormation of beidellite, suggesting that the chemical process acting at the bottom of the profile in this area is a bisiallisation [18]. This process is favoured by the following morphoclimatic and hydrological conditions in this bioclimatic zone [14]: low rainfall, followed by dry periods that include evaporation, induce soil solutions concentrated in silica and basic cations; thus smectite clays are formed [12,17,18,23]. In the upper horizons, beidellite evolves and transforms into montmorillonite and kaolinite [1,10]. The studied sequence in this bioclimatic zone is made up of three horizons that display basic pH and  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio  $> 3$ , which is consistent with the presence of smectites, clay minerals found in vertisols [5,7,16].

In conclusion, the present study is an example of major effects of climate and local factors on clay minerals and soil formations within the intertropical regions.

### 1. Introduction

L'altération et la pédogenèse sont d'importants processus de surface qui conduisent à la formation et au développement des sols ; ce sont essentiellement des processus d'interaction eau/roche, qui dépendent du climat et des facteurs de station [5,13,22,23]. En régions intertropicales, par exemple, la variabilité des précipitations annuelles, couplée au gradient de pente et à la perméabilité, oriente de façon significative l'altération et la pédogenèse et contribue à la différenciation, entre autres, des sols ferrallitiques, des sols ferrugineux et des sols fersiallitiques [4,20].

Le Cameroun, situé en zone intertropicale, présente une variation latitudinale des climats, qui va du climat équatorial, au sud, jusqu'au climat soudano-sahélien, à

l'extrême-nord [19]. Deux séquences d'altération du granite ont été caractérisées dans ces deux zones bioclimatiques extrêmes. Le présent papier rapporte les résultats obtenus et souligne l'influence du climat et des facteurs de station sur la nature des minéraux secondaires et des types de sols formés.

## 2. Objet et méthodes

L'analyse des deux séquences d'altération du granite a été menée dans les régions de Mvangan (latitude :  $2^{\circ}18' - 2^{\circ}55'$  nord, longitude :  $11^{\circ}38' - 12^{\circ}10'$  est) et de Garey (latitude :  $10^{\circ} - 10^{\circ}15'$  nord, longitude :  $14^{\circ}10' - 14^{\circ}35'$  est), situées respectivement dans le Sud et dans l'Extrême-Nord du Cameroun (Fig. 1). Ces deux régions ont été choisies comme zones d'étude, en raison du contraste morphoclimatique et hydrologique qui existe entre elles (Tableau 1).

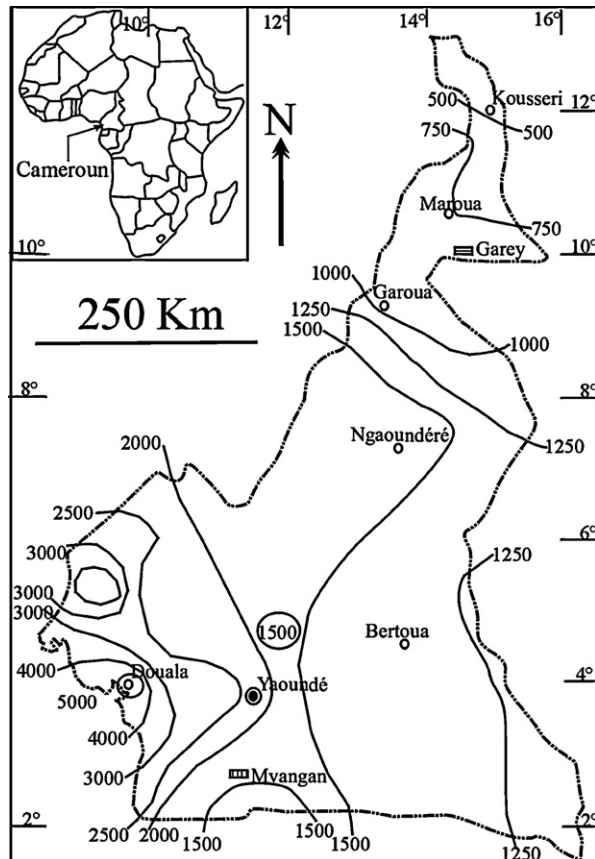


Fig. 1. Localisation des zones d'étude dans le Cameroun : (d'après [19], simplifié). (---) Isohyètes en mm de pluie ; (▨) zone tropicale humide (Mvangan) ; (▩) zone tropicale sèche (Garey).

Localisation of study areas in Cameroon: Isoprecipitations in mm (after [19], simplified). (---) Isoprecipitations in mm; (▨) tropical wet zone (Mvangan); (▩) tropical dry zone (Garey).

La région de Mvangan, située dans le plateau sud-camerounais, est soumise à un climat de type équatorial [19], caractérisé par deux saisons sèches, alternant avec deux saisons humides d'inégales intensités, une température moyenne annuelle d'environ  $23^{\circ}\text{C}$  et un module pluviométrique annuel de 1700 mm (Tableau 1). Le degré hygrométrique moyen annuel est de 80 %. La végétation est une forêt dense, de type « semi-décidue congolaise localement remplacée par des raphiales dans les vallées marécageuses » [9]. Le réseau hydrographique, dense et persillé, isole des collines granitiques et gneissiques, d'altitude moyenne 750 m, séparées par des vallées. Ces collines ont en général une forme en demi-orange, avec des pentes moyennes à fortes (25–35 %), qui assurent un bon drainage.

La région de Garey, située dans la pédiplaine de Kaélé-Mindif, est soumise à un climat de type soudano-sahélien [19] caractérisé par une longue saison sèche (sept à huit mois) alternant avec une courte saison de pluies (quatre à cinq mois), une température de  $28^{\circ}\text{C}$  et des précipitations moyennes annuelles de 800 mm (Tableau 1). L'humidité relative de l'air, faible durant toute la saison sèche (26 %) augmente considérablement pendant la saison des pluies (80 %) ; l'évaporation est intense (2685 mm). La végétation est une savane arborée et arbustive [9]. D'altitude moyenne 380 m, la topographie y est pratiquement plane, avec des pentes très faibles ( $< 5\%$ ), ce qui limite le drainage externe. Le réseau hydrographique, très dégradé et aréique, est caractérisé par l'existence des rivières saisonnières, ou mayos.

Les sols et les altérations du granite ont été étudiés en détail au moyen d'un puits représentatif dans chaque zone, et ouvert au sommet de la colline. L'étude a consisté en une caractérisation macroscopique et microscopique des principaux horizons pédologiques, d'abord sur le terrain, puis au laboratoire, par observation des lames minces au microscope polarisant. L'analyse minéralogique des échantillons a été faite par diffraction de rayons X. Des observations au MET et au MEB ont été effectuées sur la fraction argileuse et sur roche, pour apprécier la cristallinité et la morphologie des minéraux, et suivre les premiers stades d'altération. Les analyses chimiques ont été effectuées par spectrométrie à torche à plasma et par spectrométrie d'émission de flamme et d'absorption atomique. Le pH de l'eau a été déterminé dans un rapport sol/eau de 1/2,5. Toutes ces analyses ont été réalisées au laboratoire des formations superficielles de l'IRD à Bondy (France), au laboratoire « Environnement et minéralogie » de l'INPL de Nancy et au CRPG de Nancy (France).

Tableau 1  
Caractéristiques des deux zones bioclimatiques du Cameroun  
*Characteristics of the two bioclimatic zones of Cameroon*

Caractéristiques	Zones bioclimatiques	
	Mvangan	Garey
Localisation	Sud du Cameroun	Extrême-Nord du Cameroun
Latitude	2°18'–2°55' nord	10°–10°15' nord
Longitude	11°38'–12°10' est	14°10'–14°35' est
Altitude moyenne	750 m	380 m
Climat	Tropical humide	Tropical sec
Moyenne des précipitations annuelles	1700 mm	800 mm
Moyenne des températures annuelles	23 °C	28 °C
Végétation	Forêt dense	Savane arborée et arbustive
Physiographie	Collines en demi-orange	pédiplaine
Pente	25–35 %	< 5 %
Réseau hydrographique	Dense et persillé	Dégradé et aréique

### 3. Résultats

#### 3.1. Caractères morphologiques, minéralogiques et géochimiques de la séquence d'altération sur granite en zone tropicale humide du Sud du Cameroun

Les sols de la séquence ont 6 m d'épaisseur et sont constitués de cinq horizons, qui surmontent le granite sous-jacent (Fig. 2) : une saprolite, un horizon à argiles tachetées, un horizon nodulaire, un horizon argileux meuble supérieur et un horizon organo-minéral. L'horizon organo-minéral n'a pas été caractérisé ; il ne sera donc pas décrit.

##### 3.1.1. Le granite

Le granite a été atteint dans le puits à 6 m de profondeur ; il a une texture grenue équante (Fig. 3a) et est constitué de feldspaths (orthose, plagioclase), de quartz bleutés, de pyroxènes, de rares biotites et d'opacques. Du point de vue chimique, la silice est l'oxyde dominant (72,69 %), suivi de l'alumine (13,80 %), du Na<sub>2</sub>O (4,11 %), du K<sub>2</sub>O (2,83 %), des oxydes de fer (2,79 %) et du CaO (2,32) ; les autres éléments sont en quantités négligeables (Tableau 2). Le passage du granite à la saprolite est brutal.

##### 3.1.2. La saprolite

La saprolite est de couleur jaune orangé, à texture sableuse et à structure du granite conservée (Fig. 3b). Cependant, les transformations minéralogiques sont importantes : les pyroxènes sont altérés et pseudomorphosés par des cloisons essentiellement gœthitiques. Les feldspaths s'altèrent après microdivision et don-

nent, par l'intermédiaire d'une phase halloysitique, des microcristaux de gibbsite et de kaolinite ; les opaques et les quartz sont fissurés (Fig. 3b).

Par rapport au granite sous-jacent, on note une diminution de la silice et une augmentation relative de l'alumine et du fer. En outre, on note un lessivage quasi total des bases (Tableau 2).

Dans sa partie supérieure, la saprolite est rougeâtre, fine, à texture limono-argileuse ; les plages saprolitiques sont associées très localement à des taches argileuses rouges et jaunes. Par rapport à la base, on note l'apparition de l'hématite, une augmentation relative des proportions de kaolinite qui présente au MET des formes subhexagonales à hexagonales (Fig. 3c), et une diminution relative des proportions de gibbsite et d'halloysite (Tableau 1). Tout se passe comme si la gibbsite et l'halloysite se déstabilisaient au profit de la kaolinite. La gœthite est toujours présente, ainsi que des reliques de feldspaths. Cependant, les variations géochimiques sont peu marquées (Tableau 2). Le passage à l'horizon à argiles tachetées est progressif.

##### 3.1.3. L'horizon à argiles tachetées

Les argiles tachetées sont massives et vacuolaires, formées de taches jaunes à kaolinite, gibbsite, halloysite et gœthite, et de taches rouges, qui contiennent de l'hématite en plus ; elles renferment de rares plages saprolitiques et de nombreux pédotubules. Cet horizon est carapacé à son sommet. Par rapport à la saprolite, on note globalement une augmentation des proportions de fer et d'alumine, ainsi qu'une diminution de la silice. Les argiles rouges sont plus riches en fer que les argiles jaunes (Tableau 2). Les proportions de la kaolinite

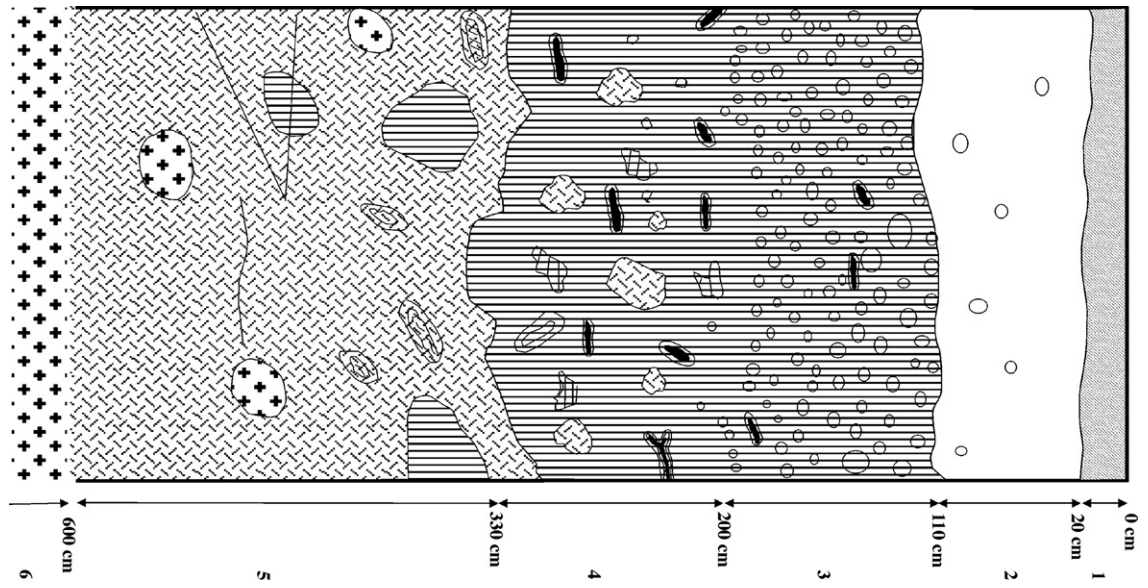


Fig. 2. Profil de sol sur granite en zone tropicale humide du Cameroun. **1** : Horizon organo-minéral brun jaune sombre ; **2** : horizon argileux meuble jaune ; **3** : horizon nodulaire ; **4** : horizon à argiles tachetées ; **5** : saprolite ; **6** : granite.

*Profile of soil on granite in the tropical wet zone of Cameroon.*  
**1**: Dark brown–yellow organic mineral horizon; **2**: soft yellow clay horizon; **3**: nodular horizon; **4**: mottled clay horizon; **5**: saprolite; **6**: granite.

microcristalline augmentent, alors que celles de l'halloysite et de la gibbsite diminuent corrélativement.

### 3.1.4. L'horizon nodulaire

L'horizon nodulaire est constitué d'un matériau argileux cohérent et rouge, à taches jaunes, qui emballe des nodules brun rouge sombre et brun clair, de 1 à 2 cm

Tableau 2

Données géochimiques et minéralogiques des horizons de sols sur granite en zone tropicale humide du Cameroun

*Geochemical and mineralogical data of horizons of soil developed on granite under the tropical wet zone of Cameroon*

Horizons	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	MnO	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pH <sub>cau</sub>	Minéralogie	
Horizon argileux jaune	53,76	21,55	6,48	1,01	0,23	0,00	0,00	0,17	0,03	6,76	9,93	0,14	100,05	2,49	4,6	<b>Q K gi G</b>	
Horizon nodulaire	Nodules	36,11	20,00	26,90	0,37	0,03	0,00	0,00	0,04	0,02	5,45	10,72	0,18	99,82	1,80	nd	<b>Q K gi G H</b>
	Terre fine	50,26	21,58	8,84	0,79	0,17	0,00	0,00	0,14	0,03	9,15	9,81	0,13	100,03	2,32	4,8	<b>Q K h gi G H</b>
Horizons à argiles tachetées	Argiles jaunes	55,48	21,90	8,41	0,74	0,17	0,00	0,00	0,14	0,00	2,11	10,22	0,13	99,30	2,53	nd	<b>Q K h gi G H</b>
	Argiles rouges	49,50	20,52	14,56	0,52	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	1,72	11,72	0,26	98,86	2,41	nd	<b>Q K h gi G H</b>
	Échantillon total	46,72	21,59	11,93	0,56	0,13	0,00	0,00	0,11	0,02	6,46	10,36	0,14	98,04	2,16	5,2	<b>Q K h gi G H</b>
Saprolite	Sommet	55,00	19,09	7,55	0,56	0,12	0,00	0,10	0,04	5,10	9,24	0,09	96,39	2,88	5,9	<b>Q K h gi G H</b>	
	Base	58,81	20,18	6,06	0,50	0,71	0,00	0,16	0,04	3,76	8,96	0,11	99,29	2,91	5,9	<b>Q K h gi G</b>	
Granite	72,69	13,80	2,79	0,36	2,83	4,11	2,32	0,84	0,06	0,08	0,03	0,10	100,00	5,26	nd	<b>Fd Q Py Bi Op</b>	

G : Goëthite ; gi : gibbsite ; K : kaolinite ; h : halloysite ; H : hématite ; Q : quartz ; Fd : feldspaths ; Py : pyroxènes ; Bi : biotite ; Op : opaques.

Grosse lettre : très abondant ; lettre moyenne : abondant ; petite lettre : peu abondant ; nd : non déterminé.

Big-size letter: very abundant; average-size letter: abundant; small-size letter: poorly represented; nd: not determined.

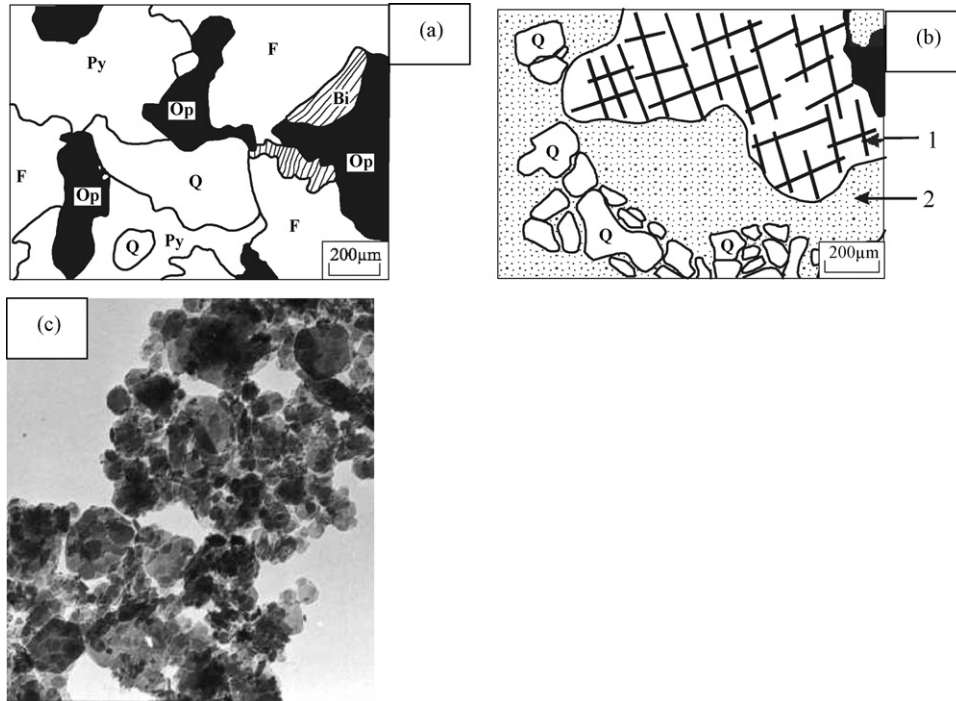


Fig. 3. (a) : Texture grenue hétérogranulaire du granite ; F : feldspaths ; Py : pyroxène ; Q : quartz ; Op : opaques ; Bi : biotite. (b) : Organisation microscopique de la saprolite : texture du granite conservée ; 1 : cloisons ferrugineuses de pseudomorphoses de pyroxènes ; 2 : microcristaux gris blanc de kaolinite et de gibbsite au sein d'un gel. (c) : plaques subhexagonales de kaolinite.

(a): Heterogranular texture of granite; F: feldspars; Py: pyroxene; Q: quartz; Op: opaques; Bi: biotite. (b): Microscopic organization of saprolite: conserved texture of granite; 1: ferruginous walls of pyroxene pseudomorphoses; 2: grey–white microcrystals of kaolinite and gibbsite within a gel. (c): Subhexagonal plaques of kaolinite.

de diamètre, très indurés. La matrice internodulaire rouge tachetée est constituée de kaolinite, de gibbsite, d'halloysite, de goëthite et d'hématite, et présente une composition géochimique similaire à celle des argiles tachetées de l'horizon sous-jacent. Les nodules sont plus riches en fer et contiennent moins de silice. L'halloysite en est absente (Tableau 2).

### 3.1.5. L'horizon argileux meuble supérieur

L'horizon argileux meuble supérieur est jaune, finement structuré, composé principalement de kaolinite, de gibbsite, de goëthite et de quartz. Sa composition géochimique est similaire à celle de la matrice internodulaire rouge tachetée, avec cependant des teneurs élevées en titane (Tableau 2).

Au total, en zone tropicale humide du Sud du Cameroun, la séquence d'altération sur granite est épaisse de 6 m, rouge à jaune, et comporte cinq horizons, qui sont constitués majoritairement de kaolinite, associée à de faibles teneurs de gibbsite, d'halloysite, d'hématite et de goëthite. Leur pH est acide et leur rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est inférieur à 3 (Tableau 2). Ces horizons sont en continuité génétique ; en effet,

chaque horizon renferme des organisations et des structures qui rappellent celles de l'horizon sous-jacent.

### 3.2. Caractères morphologiques, minéralogiques et géochimiques de la séquence d'altération sur granite en zone tropicale sèche de l'Extrême-Nord du Cameroun

Les sols de la séquence ont 3,5 m d'épaisseur et sont caractérisés par la présence de fentes de dessiccation, de microreliefs (gilgai) en surface, de type vertisolique [6,7]. Ils sont constitués de trois horizons qui surmontent le granite sous-jacent (Fig. 4) : une saprolite, un horizon intermédiaire et un horizon argileux meuble supérieur.

#### 3.2.1. Le granite

Le granite, atteint dans le puits à 3,5 m, présente une texture grenue équante et est constitué de feldspaths (orthose, plagioclase) de quartz, d'amphiboles, de biotites et d'opaques. Du point de vue chimique, la silice est l'oxyde dominant (73,78 %), suivi de l'alumine (14,73 %), du  $\text{Na}_2\text{O}$  (4,09 %), du  $\text{CaO}$

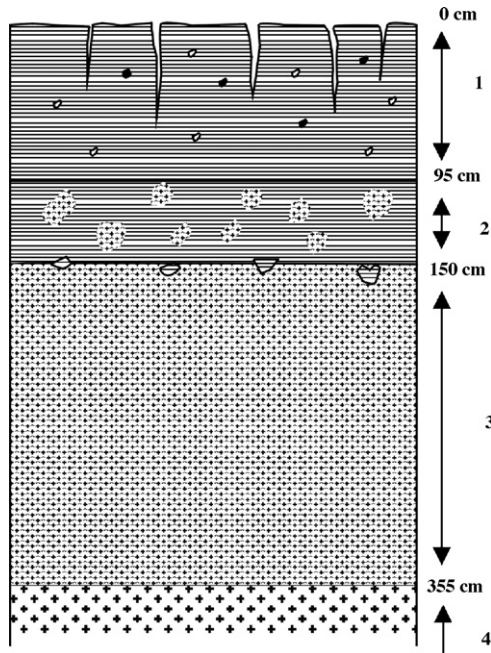


Fig. 4. Profil de sols sur granite en zone tropicale sèche du Cameroun. 1 : Horizon argileux gris sombre ; 2 : horizon intermédiaire constitué de volumes de saprolite et de volumes matériels gris sombre ; 3 : saprolite ; 4 : granite.

*Profile of soil on granite in the tropical dry zone of Cameroon. 1: Dark grey clayey horizon; 2: intermediate horizon constituted of a melting of dark grey clayey materials and relics of saprolite domains; 3: saprolite; 4: granite.*

(3,57 %) et du fer (1,73 %) ; les autres éléments sont en quantités négligeables (Tableau 3). Le passage du granite à la saprolite est brutal.

### 3.2.2. La saprolite

La saprolite est de couleur dominante claire (blanc à gris très clair), à texture sableuse et à structure du granite conservée. Les feldspaths s'altèrent et donnent essentiellement une smectite dioctaédrique relativement bien cristallisée. Le test de Greene–Kelly montre que cette smectite est une beidellite ; elle en présente au MEB la morphologie caractéristique en « nids d'abeille » et, au MET, la forme caractéristique en voiles (Fig. 5a et b). Tous les minéraux primaires du granite y sont encore présents.

Sur le plan géochimique, on note une diminution de la silice et du Na, et une augmentation relative de l'alumine, du fer, du Ca, du Mg et du K (Tableau 3). Le passage à l'horizon intermédiaire est progressif.

### 3.2.3. L'horizon intermédiaire

Il est constitué de volumes clairs saprolitiques et de volumes argileux gris sombre. Ces deux types de

Tableau 3

Données géochimiques et minéralogiques des horizons de sols sur granite en zone tropicale sèche du Cameroun  
*Geochemical and mineralogical data of horizons of soil developed on granite under tropical dry zone of Cameroon*

Horizons	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pH <sub>cau</sub>	Minéralogie
Horizon gris sombre	Sommet Base	69,05 66,36	9,97 12,35	4,16 5,24	0,09 0,09	0,88 1,36	0,86 0,77	1,38 1,27	0,55 0,72	0,15 0,07	8,41 9,07	96,64 99,97	6,92 5,37	8,8 8,8	Be M K Fd Q G H Cal Dol
Horizon intermédiaire	Sommet Base	49,56 55,08	13,78 17,54	5,36 7,54	0,09 0,11	1,36 1,9	1,82 2,99	1,24 1,17	0,74 0,96	0,17 0,37	13,77 7,37	99,89 99,94	3,59 3,14	8,8 8,6	Be M K Fd Q G H Cal
Saprolite	Sommet Milieu Base	60,45 53,4 58,84	16 17,77 16,92	6,38 8,47 6,45	0,08 0,11 0,11	2,68 2,72 2,86	3,35 3,49 3,51	1,18 1,2 1,12	0,71 1,13 0,91	0,26 0,42 0,31	3,56 5,03 3,31	99,94 99,97 100,13	3,77 3,00 3,47	9,1 9,1 9,2	Be M K Fd Q G H Be Fd Q G Be Fd Q G
Granite		73,78	14,73	1,53	0,01	0,3	4,09	0,48	0,08	0,01	1,3	99,88	5,00	nd	Fd Q Bi Amp Op

Be : beidellite ; M : montmorillonite ; K : kaolinite ; G : grethite ; H : hémattite ; Q : quartz ; Fd : feldspaths ; Amp : amphiboles ; Bi : biotite ; Op : opaques ; Cal : calcite ; Dol : dolomie.  
Grosse lettre : très abondant ; lettre moyenne : abondant ; petite lettre : peu abondant ; nd : non déterminé.

Big-size letter: very abundant; average-size letter: poorly represented; nd: not determined.



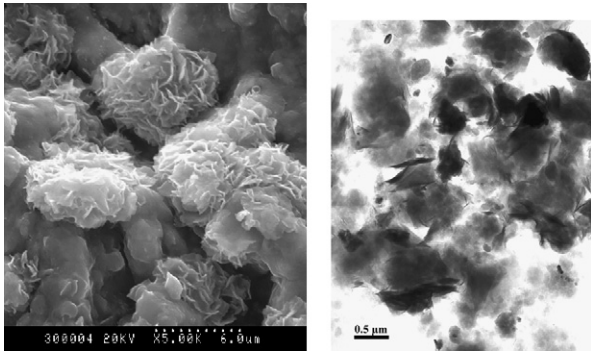


Fig. 5. Morphologie des smectites résultant de l'altération des feldspaths (a) au MEB et (b) au MET.

*Morphology of smectites formed by feldspar weathering. (a): SEM; (b): TEM.*

volumes forment un ensemble consolidé. Ils sont constitués majoritairement de beidellite, associée à de la montmorillonite, à de faibles quantités de kaolinite, et à de la calcite. Tout se passe comme si la beidellite se transformait pour donner la montmorillonite et la kaolinite. Les reliques de minéraux primaires, et notamment les feldspaths et les biotites, sont encore présents. On note la présence des nodules calcaires.

Par rapport à la saprolite, on note une diminution de la silice, de Na, du Mg, et une augmentation relative de K, très forte du Ca ; les teneurs en alumine et en fer sont relativement constantes (Tableau 3). Le passage à l'horizon argileux gris supérieur est progressif.

#### 3.2.4. L'horizon argileux gris supérieur

Il est gris sombre, argileux, compact, dur à sec, et très plastique en humide, à structure polyédrique grossière et à macrostructure bien développée par des fentes de retrait qui disparaissent vers la base, et l'horizon devient massif. On y observe des nodules calcaires. Il est composé de beidellite, de montmorillonite, de kaolinite, de calcite et de dolomie ; le feldspath est toujours présent.

Par rapport à l'horizon intermédiaire, la silice et le  $K_2O$  augmentent relativement, alors que les autres éléments diminuent (Tableau 3).

Au total, en zone tropicale sèche de l'Extrême-Nord du Cameroun, la séquence d'altération sur granite a 3,5 m d'épaisseur et est caractérisée par la présence des fentes de retrait et des gilgai en surface. Elle comporte trois horizons, qui sont constitués majoritairement de smectites, associées à de faibles teneurs de kaolinite. Leur pH est basique et leur rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  est supérieur à 3 (Tableau 3).

## 4. Discussion et conclusion

L'analyse comparée des séquences d'altération sur granite, en zones tropicale humide et tropicale sèche du Cameroun, révèle que l'altération du granite conduit à la formation de minéraux argileux et de sols différents, qui sont le reflet des conditions climatiques et des facteurs de station actifs dans chaque zone.

Dans le Sud du Cameroun, en zone forestière tropicale humide, l'altération du granite conduit à la néoformation de kaolinite majoritaire, associée à de faibles quantités de gibbsite, par l'intermédiaire d'une phase halloysitique. Ces faits suggèrent que l'altération qui règne à la base est essentiellement monosiallitique et allitique [18]. La néoformation de la kaolinite et de la gibbsite est favorisée par l'environnement morphoclimatique et hydrologique du Sud du Cameroun : les pluies sont abondantes, le réseau hydrographique, dense et persillé, traduit un bon drainage, favorisé par la forte pente et une bonne perméabilité. Dans ce contexte, les solutions sont diluées et renouvelées régulièrement, ce qui permet une mise en solution et une lixiviation quasi totale des bases et partielle de la silice, comme l'attestent du reste les résultats de l'analyse chimique. De ce fait, les conditions de formation de la kaolinite sont réunies [12,18,21,23].

La séquence d'altération qui se développe au-dessus du granite est constituée de quatre horizons bien différenciés : une saprolite, un horizon à argiles tachetées, un horizon nodulaire et un horizon argileux meuble supérieur. Leur pH est acide et leur rapport  $SiO_2/Al_2O_3$ , inférieur à 3, souligne la nette dominance de la kaolinite. L'ensemble des données met en évidence une étroite continuité structurale, minéralogique et géochimique entre ces différents horizons ; en effet, chaque horizon renferme des organisations et des structures qui rappellent celles de l'horizon sous-jacent. Ces observations rejoignent celles de nombreux autres travaux réalisés en milieu intertropical [3,4,11,24]. La différenciation des horizons se fait essentiellement par altération, pédoplasation, ferruginisation et déferruginisation [2,4,13,23]. En outre, la succession et la morphologie des horizons, ainsi que leurs compositions minéralogiques et géochimiques, sont caractéristiques des sols ferrallitiques [4,8,11,15,24].

Dans l'Extrême-Nord du Cameroun, en zone tropicale sèche, l'altération du granite conduit à la néoformation exclusive de la beidellite. Ainsi, l'altération qui règne à la base est une bisiallisation [18] ; elle est induite par les conditions morphoclimatiques et hydrologiques qui règnent dans l'Extrême-Nord : les pluies sont peu abondantes et peu distribuées au cours de l'année, la température élevée induit une forte

évaporation, le faible gradient des pentes limite considérablement le drainage externe [14]. La combinaison de ces facteurs entraîne la concentration relative des bases et de la silice, comme le montrent les résultats de l'analyse chimique, et crée les conditions favorables à la genèse des smectites [12,17,18,23]. Dans les horizons supérieurs, la beidellite donnerait naissance à la montmorillonite et à la kaolinite, avec qui elle coexiste. De telles séquences minérales sont signalées dans la littérature [1,10] et se réalisent par l'intermédiaire des interstratifiés beidellite–montmorillonite et beidellite–montmorillonite–kaolinite.

La séquence d'altération, constituée d'une saprolite, d'un horizon intermédiaire et d'un horizon gris argileux sombre, et marquée par la présence majoritaire d'argiles gonflantes, est caractéristique des vertisols chromiques [5,7,16]. Ces trois horizons ont un pH basique et présentent un rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  qui est supérieur à 3, ce qui confirme la nette dominance des smectites. Les données morphologiques, minéralogiques et géochimiques de ces trois horizons montrent une continuité et traduiraient, de ce fait, la filiation génétique qui existe entre eux.

En conclusion, la présente étude est un exemple d'influences majeures des facteurs morphoclimatiques sur l'argilogenèse et la différenciation des sols en régions intertropicales. Les deux séquences étudiées se forment in situ à partir du granite ; cependant, elles présentent, chacune, des caractéristiques morphologiques, minéralogiques et géochimiques spécifiques, en relation avec les conditions qui règnent dans leur milieu de formation. En zone tropicale humide du Sud du Cameroun, les pluies abondantes, couplées aux fortes pentes et à un réseau hydrographique dense, orientent l'altération du granite vers la formation de la kaolinite et la formation des sols ferrallitiques. En zone tropicale sèche de l'Extrême-Nord du Cameroun, la faible pluviosité, combinée à la forte évaporation ainsi qu'au faible gradient de pente et à un réseau hydrographique dégradé, induit la néoformation de la beidellite et la différenciation des vertisols chromiques. Il apparaît ainsi que la monosiallisation et la ferrallitisation prépondérantes dans le Sud du Cameroun, d'une part, et la bisiallisation et la vertisolisation fonctionnelles dans l'Extrême-Nord du Cameroun, d'autre part, sont sous le contrôle du climat et des facteurs de station actifs dans ces deux zones bioclimatiques.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Institut de recherche pour le développement (IRD) pour sa participation au

financement des travaux de J.-P. N. au laboratoire « Environnement et minéralurgie » de Nancy (France).

## Références

- [1] M. Amouric, J. Olives, Transformation mechanisms and interstratification in conversion of smectite to kaolinite: an HRTEM study, *Clays Clay Miner.* 46 (1998) 521–527.
- [2] D. Bitom, B. Volkoff, M. Abossolo-Angue, Evolution and alteration in situ of a massive iron duricrust in Central Africa, *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 89–101.
- [3] D. Bitom, B. Volkoff, A. Beauvais, F. Seyler, P.D. Ndjigui, Rôle des héritages latéritiques et du niveau des nappes dans l'évolution des modelés et des sols en zone intertropicale forestière humide, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 1161–1170.
- [4] G. Bocquier, J.-P. Muller, B. Boulangé, Les latérites : connaissances actuelles sur les mécanismes de leur différenciation, in: *Livre jubilaire du cinquantenaire de l'Afes*, Paris, 1984, pp. 123–138.
- [5] C. Bühman, J.-L. Schoeman, A mineralogical characterization of vertisols from the northern regions of the Republic of South Africa, *Geoderma* 66 (1995) 239–257.
- [6] S.G. Driese, C. Mora, C.A. Stiles, R.M. Joeckel, L.C. Nordt, Mass-balance reconstruction of a modern vertisol: implications for interpreting the geochemistry and burial alteration of paleovertisols, *Geoderma* 95 (2000) 179–204.
- [7] R. Dudal, H. Eswaran, Distribution, properties and classification of vertisols, in: L.P. Wilding, R. Puentes (Eds.), *Their distribution, properties, classification and Management*, Texas A & M University Printing Center, College Station, TX, USA, 1988, pp. 1–22.
- [8] E.A. Fitzpatrick, *Soils. Their formation, classification and distribution*, Longman, London, 1980.
- [9] R. Letouzey, Carte phytogéographique du Cameroun au 1/32 500 000, in: *Atlas jeune Afrique du Cameroun, jeune Afrique*, Paris, 1979, p. 45.
- [10] A. Meunier, *Les argiles*. Collection Géosciences, GB Science Publisher, 2003.
- [11] J.-P. Muller, Analyse pétrologique d'une formation latéritique meuble du Cameroun. Essai de traçage d'une différenciation supergène par les paragenèses minérales secondaires, thèse d'État, université Paris-7, 1987.
- [12] D. Nahon, *Introduction to the petrology of soils and chemical weathering*, John Wiley and Sons ed, New York, 1991.
- [13] D. Nahon, Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 1109–1119.
- [14] B. Ngounou Ngatcha, J. Mudry, L. Sigha Nkamdjou, R. Njit-choua, E. Naah, Climate variability and impacts on an alluvial aquifer in a semi-arid climate, the Logone–Chari plain (South of Lake Chad), *IAHS Publ.* 295 (2005) 94–100.
- [15] J.-P. Nguetkam, Étude d'une toposéquence de sols sur granite dans la région de Mvangan (Sud Cameroun) : caractérisation de domaines de pédogenèse différenciés, thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université de Yaoundé, 1994.
- [16] J.-P. Nguetkam, Les argiles des vertisols et des sols fersiallitiques de l'Extrême-Nord Cameroun : genèse, propriétés cristallographiques et texturales, typologie et applications à la décoloration des huiles végétales, thèse d'État, université Yaoundé-1, 2004.
- [17] H. Paquet, N. Clauer, *Soils and sediments, Mineralogy and geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.

- [18] G. Pédro, Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino-silicique), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 262 (1966) 1828–1831.
- [19] J.-B. Suchel, Les climats du Cameroun, tome III, thèse, université de Saint-Étienne, 1987.
- [20] Y. Tardy, Pétrologie des latérites et des sols tropicaux, Masson, Paris, 1993.
- [22] Y. Tardy, G. Bocquier, H. Paquet, G. Millot, Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography, *Geoderma* 10 (1973) 271–284.
- [21] Y. Tardy, C. Roquin, Dérive des continents. Paléoclimats et altérations tropicales, BRGM, Orléans, France, 1998.
- [23] B. Velde, Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment, Springer, Berlin, 1995.
- [24] R. Yongue-Fouateu, Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé, thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université de Yaoundé, 1986.