

Altération du granite en zones tropicales

Exemple de deux séquences étudiées au Cameroun (Afrique Centrale)

J.-P. Nguetkam⁽¹⁾, R. Kamga⁽³⁾, F. Villieras⁽²⁾, G.-E. Ekodeck⁽⁴⁾ et J. Yvon⁽²⁾

- (1) Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Ngaoundéré, BP 454, Ngaoundéré, Cameroun
- (2) Laboratoire Environnement et Minéralurgie, ENSG-INPL, 15, avenue du Charmois BP40, 545001 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
- (3) Département de chimie Appliquée, Ecole Nationale Supérieure des Sciences agro-industrielles, Université de Ngaoundéré, BP 455, Ngaoundéré, Cameroun
- (4) Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, BP 812, Yaoundé, Cameroun

RÉSUMÉ

Deux séquences d'altérations 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. Au sud Cameroun, en zone forestière tropicale humide, à collines en demi-orange, à pentes moyennes à fortes et à drainage efficace, 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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 3$. A 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 et confirment une fois de plus l'influence du climat et des facteurs de station dans la néoformation des minéraux argileux et dans la différenciation des sols en régions intertropicales.

Mots clés

Granite, altération, zone tropicale humide, zone tropicale sèche, sol ferrallitique, vertisol chromique, Cameroun.

SUMMARY**WEATHERING RESPONSE OF GRANITE IN TROPICAL ZONES****Example of two sequences studied in Cameroon (Central Africa)**

Two weathering sequence of granite, developed in two bioclimatic zones of Cameroon (figure 1), 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 (table 1), the weathering of granite leads to the neoformation of kaolinite and the formation of ferrallitic soil (figures 2 and 3), made up of four horizons which display an acid pH and a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio < 3 (table 2). In the savannah tropical dry climate of extreme north, with less grade slopes and slow water-flow conditions (Table 1), the weathering of granite leads to the neoformation of beidellite and the formation of chromic vertisol made up of three horizons (figures 4 and 5) which display a basic pH and a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio > 3 (table 3). These results emphasize the influence of climate and local factors on clay minerals and soil formation in the intertropical regions.

Key-words

Granite, weathering, tropical wet zone, tropical dry zone, ferrallitic soil, chromic vertisol, Cameroon

RESUMEN**ALTERACIÓN DEL GRANITO EN ZONAS TROPICALES. Ejemplo de dos secuencias estudiadas en Camerún (África central)**

Dos secuencias de alteración del granito, desarrolladas en dos zonas bioclimáticas de Camerún, fueron estudiadas por medio del análisis macroscópico y microscópico, de la difracción de los rayos X (DRX), de los análisis químicos, así que de las observaciones al MEB y al MET. Al sur de Camerún, en zona forestal tropical húmeda, con colinas en medionaranja, con pendientes medias a fuertes y con drenaje eficaz, la alteración del granito lleva a la neoformación de kaolinita y a la formación de suelo ferralítico, constituido de cuatro horizontes con pH ácido y con relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 3$. En el extremo norte, en zona tropical seca, con vegetación de sabana, con pendientes ligeras y con drenaje limitado, la alteración del granito lleva a la neoformación de beidelite y a la formación de un vertisol crómico, constituido de tres horizontes con pH básico y con relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$. Estos resultados subrayan y confirman una vez más la influencia del clima y de los factores de estación en la neoformación de los minerales arcillosos y en la diferenciación de los suelos en las regiones intertropicales.

Palabras clave

Alteración, zona tropical húmeda, zona tropical seca, suelo ferralítico, vertisol crómico, Camerún

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'interactions eau/roche, qui dépendent du climat et des facteurs de station (Nahon, 2003 ; Bühman et Schoeman, 1995 ; Velde, 1995 ; Delvigne, 1965 ; Millot, 1964 ; Lacroix, 1913). En régions intertropicales par exemple, la variabilité des précipitations annuelles, couplée au gradient de pente et à la perméabilité, orientent de façon significative l'altération et la pédogenèse et contribuent à la différenciation, entre autres, des sols ferrallitiques, des sols ferrugineux et des sols fersiallitiques (Tardy, 1993 ; Bocquier *et al.*, 1984 ; Segalen, 1966).

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 (Suchel, 1987). Deux séquences d'altération du granite ont été caractérisées dans ces deux zones bioclimatiques extrêmes. Le présent article rapporte les résultats obtenus, en confirmant l'influence du climat et des facteurs de station sur la nature des minéraux secondaires et des types de sols formés.

OBJET ET MÉTHODES

L'analyse des deux séquences d'altération du granite a été menée dans les régions de Mvangan (latitude : 2°18'-2°55' Nord, longitude : 11°38'-12°10') et de Garey (latitude : 10°-10°15' Nord, longitude : 14°10'-14°35'), situées respectivement au Sud et dans l'extrême Nord Cameroun (*figure 1*). Ces deux régions ont été

choisies comme zones d'étude, en raison du contraste morphoclimatique et hydrologique qui existe entre elles (*tableau 1*).

La région de Mvangan, située dans le plateau sud-camerounais, est soumise à un climat de type équatorial (Suchel, 1987), caractérisé par deux saisons sèches, alternant avec deux saisons humides d'inégales intensités, une température moyenne annuelle d'environ 23°C et un total 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" (Letouzey, 1979). 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 (Suchel, 1987), caractérisé par une longue saison sèche (7 à 8 mois) alternant avec une courte saison de pluies (4 à 5 mois), une température de 28°C et les 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 (2 685 mm). La végétation est une savane arborée et arbustive (Letouzey, 1979). 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.

Tableau 1 - Caractéristiques des deux zones bioclimatiques du Cameroun.

Table 1 - Characteristics of the two bioclimatic zones of Cameroon.

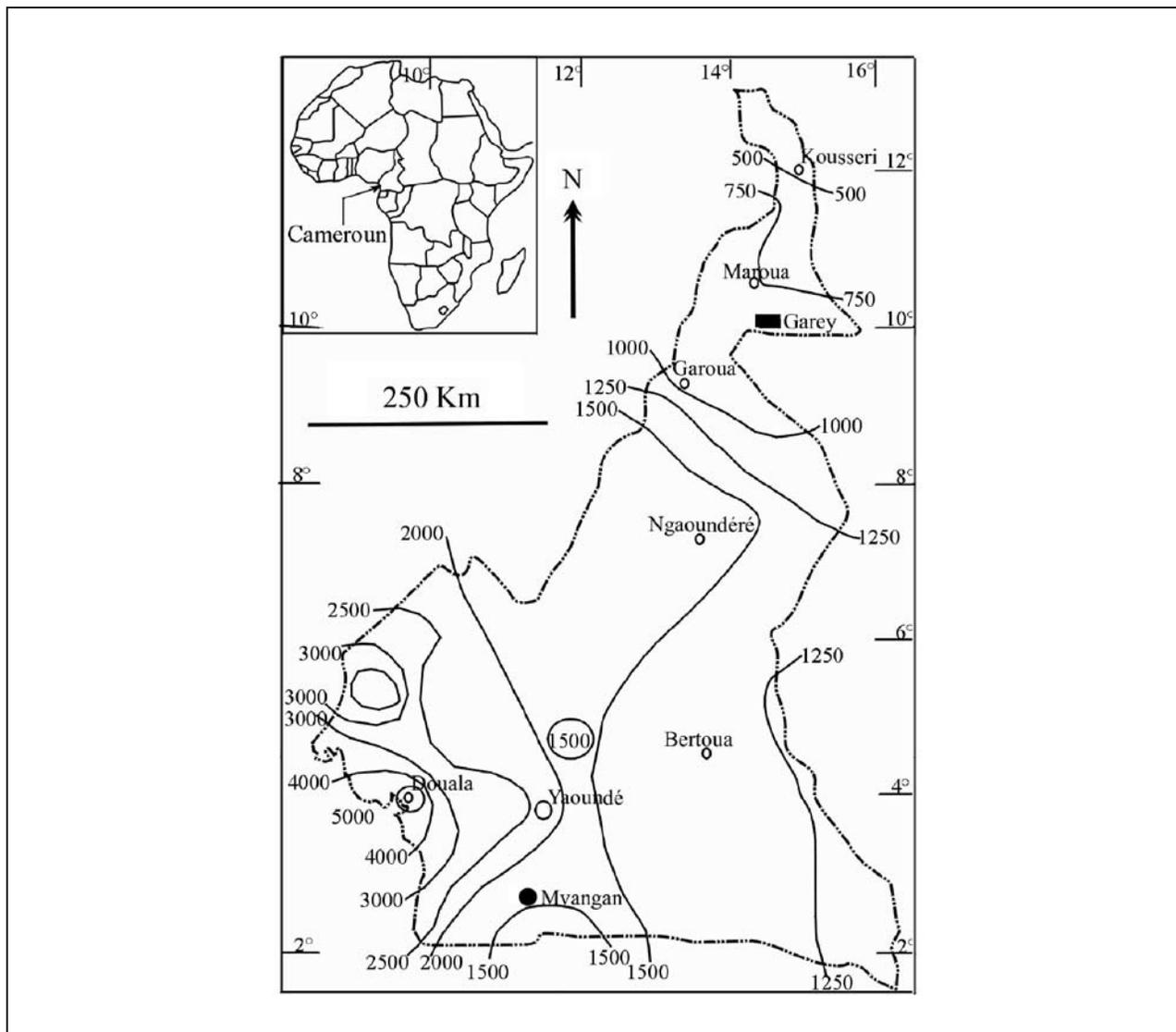
Caractéristiques	Zones bioclimatiques	
	Mvangan	Garey
Localisation	Sud Cameroun	Extrême Nord Cameroun
Latitude	2°18' – 2°55'	10° - 10°15'
Longitude	11°38' – 12°10'	14°10' – 14°35'
Altitude moyenne	750m	380m
Climat	Tropical humide	Tropical sec
Moyenne des précipitations annuelles	1700mm	800mm
Moyenne 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	Degradé et aréique

Figure 1 - Localisation des zones d'étude dans le Cameroun : (d'après JB Suchel, 1987, simplifié).

— Isohyètes en mm de pluie ● Zone tropicale humide (Mvangan) ; ■ Zone tropicale sèche (Garey).

Figure 1 - Localisation of study areas in Cameroon: Isoprecipitations in mm (after JB Suchel, 1987, simplified).

— Isoprecipitations in mm ● Tropical wet zone (Mvangan) ; ■ Tropical dry zone (Garey).



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 colline ; en effet, chacun de ces puits regroupe l'ensemble des horizons identifiés dans leur zone bioclimatique respective. 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 des 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 réalisées par spectrométrie à torche à plasma et par spectrométrie d'émission de flamme et d'absorption atomique. Le pH 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 Minéralurgie de l'INPL de Nancy et au CRPG de Nancy (France).

RÉSULTATS

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

Les sols de la séquence ont 6 mètres d'épaisseur et sont constitués de 5 horizons qui surmontent le granite sous jacent (*figure 2*) : une altérite, 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.

Le granite

Le granite a été atteint dans le puits à 6 mètres de profondeur, il a une texture grenue équante (*figure 3a*) et est constitué de feldspaths (orthose, plagioclase) de quartz bleutés, de pyroxènes, de rares biotites et des opaques. Du point de vue chimique, la silice est l'oxyde le plus dominant (72,69 %), suivi de l'alumine (13,80 %), du Na_2O (4,11 %), du K_2O (2,83 %), du fer (2,79 %) et du CaO (2,32) ; les autres éléments sont en quantités négligeables (*Tableau. 2*). Le passage du granite à l'altérite est brutal.

L'altérite (270 cm)

L'altérite est jaune orangé, à texture sableuse et à structure du granite conservée (*figure 3b*). Cependant, les transformations minéralogiques sont importantes : les pyroxènes sont altérés et pseudomorphosés par des cloisons essentiellement goethitiques. Les feldspaths s'altèrent après microdivision et donnent, par l'intermédiaire d'une phase halloysitique, des microcristaux de gibbsite et de kaolinite ; les opaques et les quartz sont fissurés (*figure 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 une lixiviation quasi totale des bases (*tableau 2*).

Dans sa partie supérieure, l'altérite est rougeâtre, fine, à texture limono-argileuse ; les plages altéritiques 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 les formes sub-hexagonales à hexagonales (*figure 3c*), et une diminution relative des proportions de gibbsite et d'halloysite (*tableau 1*). La goethite 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.

L'horizon à argiles tachetées (130 cm)

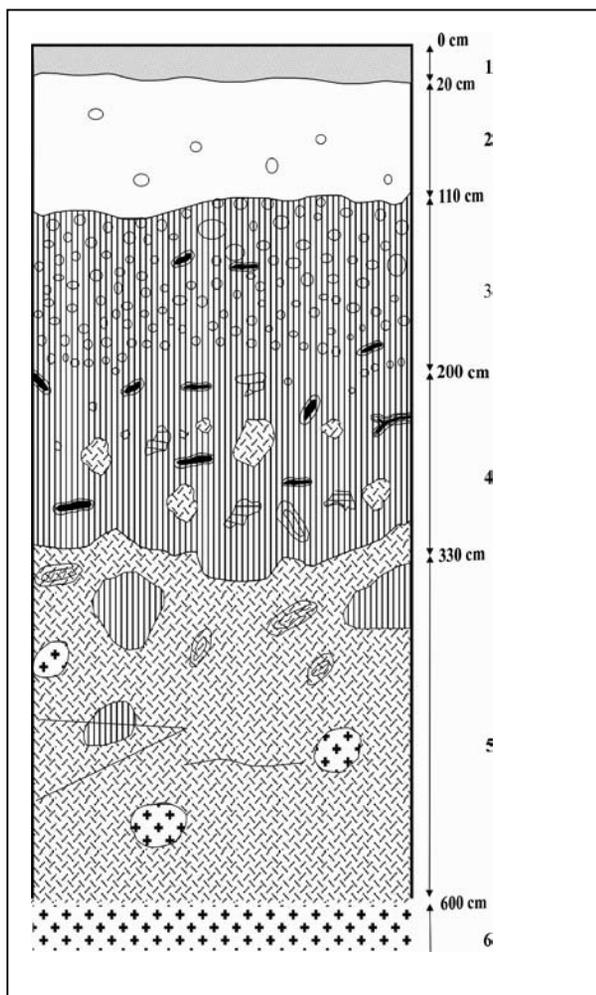
Les argiles tachetées sont massives et vacuolaires, formées de taches jaunes à kaolinite, gibbsite, halloysite et goethite, et de taches rouges qui contiennent de l'hématite en plus ; elles renfer-

Figure 2 - Profil de sols 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. Altérite ; 6. Granite

Figure 2 - Profile of soil on granite in the tropical wet zone of Cameroon.

1. Dark brown-yellow organo mineral horizon ; 2. Soft yellow clay horizon ; 3. Nodular horizon ; 4. Mottled clay horizon ; 5. Alterite ; 6. Granite



ment de rares plages saprolitiques et de nombreux pédotubules. Cet horizon est carapacé à son sommet. Par rapport à la saprolite (altérite), on note globalement une augmentation des proportions de fer et d'alumine, et une diminution de la silice. Les argiles rouges sont plus riches en fer que les argiles jaunes (*tableau 2*). Les proportions de la kaolinite microcristalline augmentent alors que celles de l'halloysite et de la gibbsite diminuent.

Tableau 2 - Données géochimiques et minéralogiques des horizons de sols sur granite en zone tropicale humide du Cameroun
Table 2 - Geochemical and mineralogical data of horizons of soil developed on granite under tropical wet zone of Cameroon

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

G:Goethite ; gi:gibbsite ; K:kaolinite ; h:halloysite ; H:hématite ; Q:quartz ; Ft:feldspaths ; Py:pyroxènes ; Bi:biotite ; Op:opaques
 nd : non déterminé

Grosse lettre : très abondant ; Lettre moyenne : abondant ; Petite lettre : peu abondant

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

L'horizon nodulaire (110 cm)

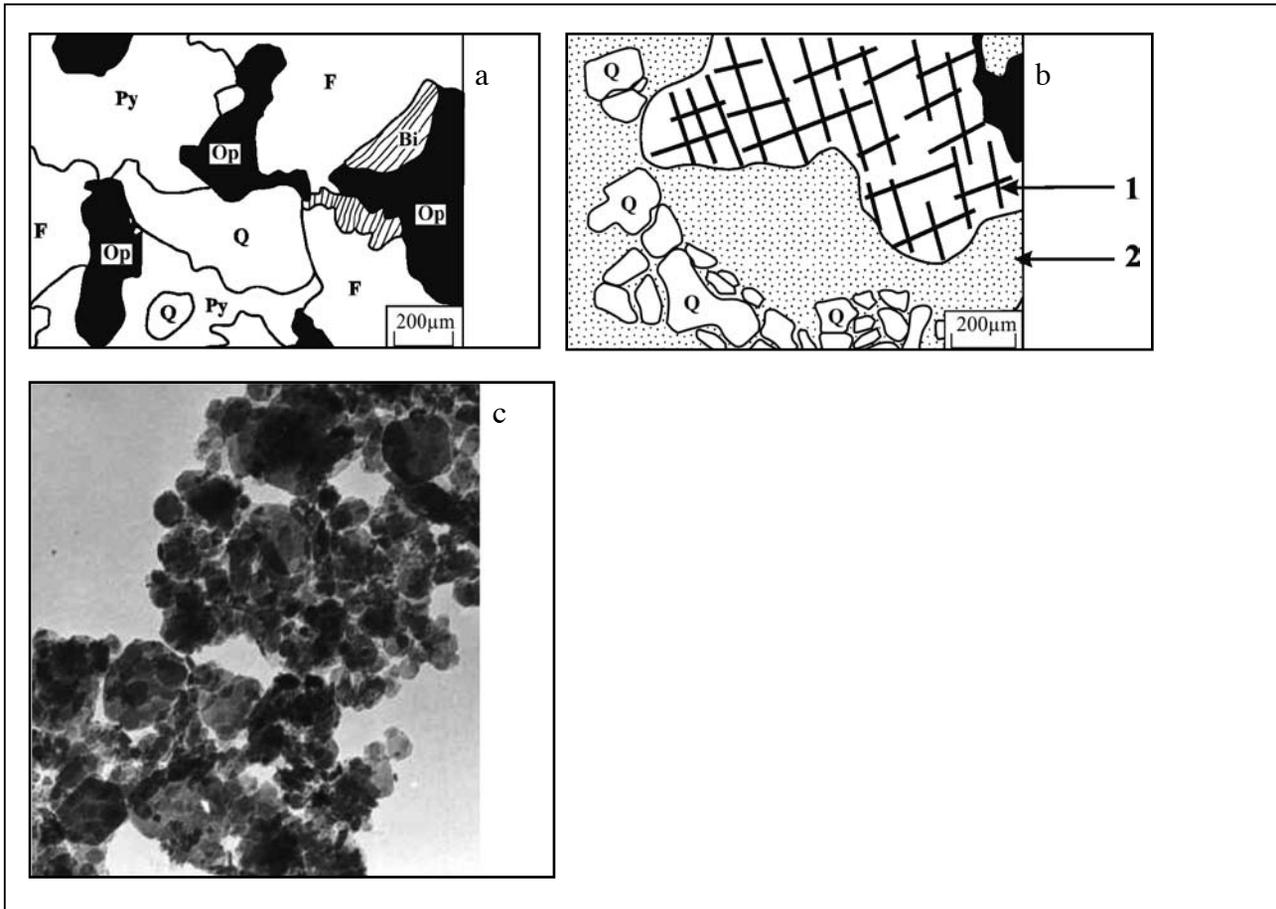
L'horizon nodulaire est constitué d'un matériau argileux cohérent et rouge, à taches jaunes, qui emboîte des nodules brun rouge sombre et brun clair, de 1 à 2 cm de diamètre, très indurés. La matrice internodulaire rouge tachetée est constituée de kaolinite, de gibbsite, d'halloysite, de goéthite et 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 y est absente (tableau 2). Le passage à l'horizon sus-jacent est marqué par la disparition brutale des nodules.

L'horizon argileux meuble supérieur (100 cm)

L'horizon argileux meuble supérieur est jaune, finement structuré, composé principalement de kaolinite, de gibbsite, de goéthite 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).

En résumé, en zone tropicale humide du Sud Cameroun, la séquence d'altération sur granite est épaisse de 6 m, rouge à jaune, et comporte 5 horizons qui sont constitués majoritairement de kaolinite associée à de faibles teneurs de gibbsite, d'halloysite, d'hématite et de goéthite. Leur pH est acide et leur rapport SiO₂/Al₂O₃ 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.

Figure 3 - (a) Texture grenue hétérogranulaire du granite. F : Feldspaths, Py : Pyroxène, Q: Quartz, Op: Opaques, Bi: Biotite
 (b) Organisation microscopique de l'altérite : 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
Figure 3 - (a) Heterogranular texture of granite. F: Feldspars, Py: Pyroxene, Q: Quartz, Op: Opaques, Bi: Biotite- (b) Microscopic organization of alterite: conserved texture of granite - 1: pseudomorphic ferruginous of pyroxenes; 2: grey-white micro crystals of kaolinite and gibbsite within a gel. (c) Subhexagonal plaques of kaolinite



Caractères morphologiques, minéralogiques et géochimiques de la séquence d'altération sur granite en zone tropicale sèche de l'extrême Nord Cameroun

Les sols de la séquence ont 3,5 mètres d'épaisseur et sont caractérisés par la présence des fentes de dessiccation, des micro-reliefs (gilgai) en surface. Ils sont constitués de 3 horizons qui surmontent le granite sous jacent (figure 4) : une altérite, un horizon intermédiaire BC, et un horizon B verticale.

Le granite

Le granite, atteint dans le puits à 3,5 mètres, a une texture grenue équante et est constitué de feldspaths (orthose, plagioclase)

de quartz, d'amphiboles, de biotites et des opaques. Du point de vue chimique, la silice est l'oxyde le plus dominant (73,78 %), suivi de l'alumine (14,73 %), du Na₂O (4,09 %), du CaO (3,57 %) et du fer (1,73 %) ; les autres éléments sont en quantités négligeables (tableau 3). Le passage du granite à l'altérite est brutal.

L'altérite (205 cm)

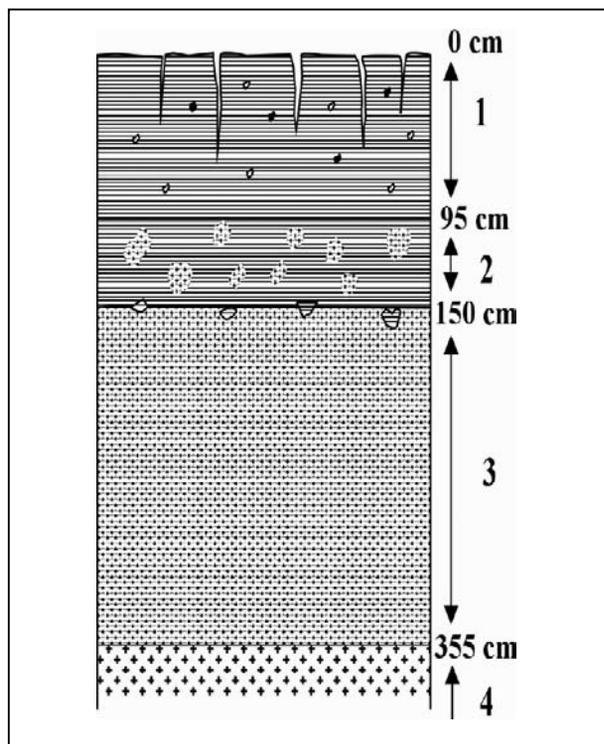
L'altérite est de couleur dominante claire (blanc à gris très clair), à texture sableuse et à structure du granite conservée. Les feldspaths s'altèrent et donnent essentiellement une smectite dioctaédrique relativement bien cristallisée. Le test de Greene-Kelly montre que cette smectite est une beidellite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

Figure 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 matériaux gris sombre ; 3. Altérite ; 4. Granite

Figure 4 - Profile of soil on granite in the tropical dry zone of Cameroon.

1. Dark grey clayey horizon (Vertic horizon) ; 2. Intermediate horizon (BC) constituted of a melting of dark grey clayey materials and relics of alterite domains ; 3. Alterite ; 4. Granite



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.

L'horizon intermédiaire BC (55 cm)

Il est constitué de volumes clairs altéritiques et de volumes argileux gris sombre. Ces deux types de volumes forment un ensemble consolidé. Ils sont constitués majoritairement de beidellite, associée à 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 millimétriques à centimétriques (5 à 10 %).

Par rapport à l'altérite, on note une diminution de la silice, de Na, du Mg, et une augmentation relative du 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.

L'horizon B verticale (95 cm)

Il est gris sombre, argileux, compact, dur à sec, et très plastique en humide, à structure polyédrique grossière et à macrostructure prismatique 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).

En résumé, en zone tropicale sèche de l'extrême Nord 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 gilgaï 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).

Discussion et conclusion

L'analyse comparée des séquences d'altération sur granite, en zones tropicale humide et tropicale sèche du Cameroun, confirme 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. Les deux granites étudiés ont des compositions chimiques proches, mais sont légèrement différents sur le plan minéralogique (présence de pyroxènes dans le granite du sud, et d'amphiboles dans le granite de l'extrême nord). Cette différence minéralogique peut influencer sur la nature des produits formés (Blot, 1980 ; Blot et Leprun (1973).

Au 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 (Pedro, 1966 ; Delvigne, 1965 ; Millot, 1964). La néoformation de la kaolinite et de la gibbsite est favorisée par l'environnement morphoclimatique et hydrologique du sud 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 (Tardy et Roquin, 1998 ; Velde, 1995 ; Nahon,

Tableau 3 - Données géochimiques et minéralogiques des horizons de sols sur granite en zone tropicale sèche du Cameroun
Table 3 - Geochemical and mineralogical data of horizons of soil developed on granite under tropical dry zone of Cameroon

Horizon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Total	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	pH eau	Minéralogie
Horizon gris sombre	Sommet	69.05	4.16	0.09	0.8	4.22	0.86	1.38	0.55	0.15	8.41	96.64	6,92	8,8	Be M K Fd Q Dol G H Cal
	Base	66.36	5.24	0.09	0.88	3.15	0.77	1.27	0.72	0.07	9.07	99.97	5,37	8,8	Be M K Fd Q Dol G H Cal
Horizon intermédiaire	Sommet	49.56	5.36	0.09	1.36	12.00	1.82	1.24	0.74	0.17	13.77	99.89	3,59	8,8	Be M K Fd Q G H Cal
	Base	55.08	17.54	0.11	1.9	4.91	2.99	1.17	0.96	0.37	7.37	99.94	3,14	8,6	Be M K Fd Q G H Cal
Altérite	Sommet	60.45	6.38	0.08	2.68	5.29	3.35	1.18	0.71	0.26	3.56	99.94	3,77	9,1	Be Fd Q G H
	Milieu	53.4	17.77	0.11	2.72	6.23	3.49	1.2	1.13	0.42	5.03	99.97	3,00	9,1	Be Fd Q G
Granite	Base	58.84	16.92	0.11	2.86	5.79	3.51	1.12	0.91	0.31	3.31	100.13	3,47	9,2	Be Fd Q G
		73.78	14.73	0.01	0.3	3.57	4.09	0.48	0.08	0.01	1.3	99.88	5,00	nd	Fd Q Bi Amp Op

Be : bedellite ; M : Montmorillonite ; K : kaolinite ; G : Goethite ; H : hémattite ; Q : quartz ; Fd : feldspaths ; Amp : Amphiboles ; Bi : biotite ; Op : opaqués ; 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: abundant ; small size letter: poorly represented ; nd: not determined

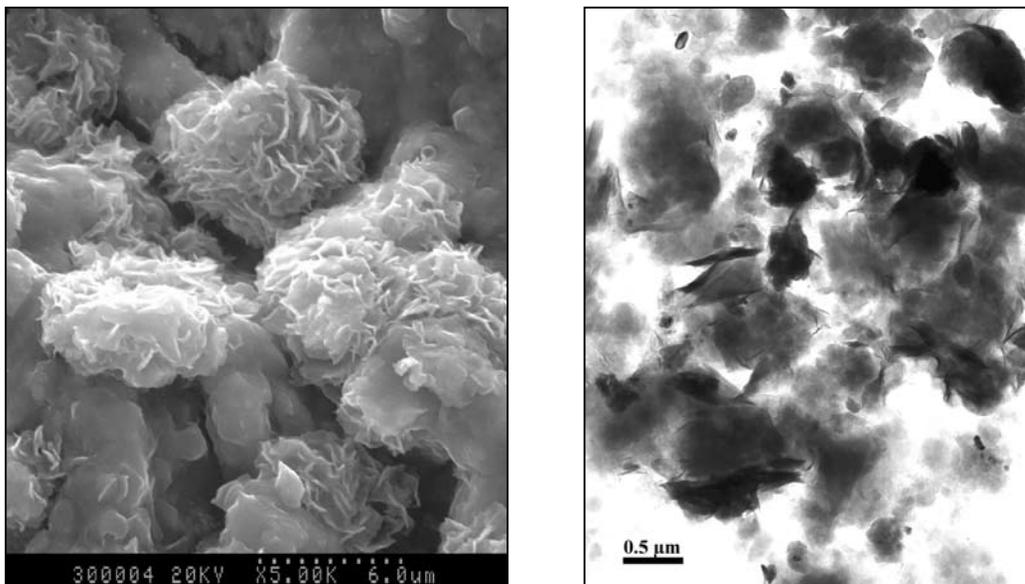
1991 ; Pedro, 1966 ; Delvigne, 1965 ; Millot, 1964).

La séquence d'altération, qui se développe au dessus du granite, est constituée de quatre horizons bien différenciés : une altérite, un horizon à argiles tachetées, un horizon nodulaire et un horizon argileux meuble supérieur. Leur pH est acide et leur rapport SiO₂/Al₂O₃, 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 (Bitom *et al.*, 2004 ; Muller, 1987 ; Yongue-Fouateu, 1986 ; Bocquier *et al.*, 1984 ; Boulet, 1974). La différenciation des horizons se fait essentiellement par altération, pédoplasation, ferruginisation et déferruginisation (Nahon, 2003 ; Bitom *et al.*, 2003 ; Tardy, 1993 ; Bocquier *et al.*, 1984 ; Leprun, 1979 ; Boulet, 1974). En outre, la succession et la morphologie des horizons, ainsi que leurs compositions minéralogiques et géochimiques sont caractéristiques des sols ferrallitiques (Nguetnkam, 1994 ; Muller, 1987 ; Yongue-Fouateu, 1986 ; Bocquier *et al.*, 1984 ; Siefferman, 1969 ; Segalen, 1967).

A 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 (Pedro, 1966), elle est induite par les conditions morphoclimatique et hydrologique 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 (Ngounou Ngatcha *et al.*, 2005). 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 (Paquet et Clauer, 1997 ; Boulet *et al.*, 1997 ;

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

Figure 5 - Morphology of smectites formed by weathering of feldspars. (a) SEM and (b) TEM.



Velde, 1995 ; Nahon, 1991 ; Pedro, 1966 ; Delvigne, 1965 ; Millot, 1964). Dans les horizons supérieurs, la beidellite se transformerait et donne de la montmorillonite et de la kaolinite, avec lesquelles elle coexiste. De telles transformations sont signalées dans la littérature (Meunier, 2003 ; Amouric et Olives, 1998) et se réalisent par l'intermédiaire des interstratifiés beidellite - montmorillonite et beidellite – montmorillonite - kaolinite.

La séquence d'altération, constituée d'une altérite, d'un horizon intermédiaire BC et d'un horizon B vertique, et marquée par la présence majoritaire d'argiles gonflantes, est caractéristique des vertisols chromiques (Nguetnkam, 2004 ; Bühman et Schoeman, 1995 ; Dudal et Eswaran, 1988 ; Brabant et Gavaud, 1985 ; Segalen, 1967 ; Dudal, 1967). 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 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 Cameroun, la plus 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. Cela confirme que la monosiallisation et la ferrallitisation prépondérantes dans le sud Cameroun d'une part, et d'autre part la bisiallisation et la vertisolisation fonctionnelles dans l'extrême Nord Cameroun, 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 JPN au Laboratoire Environnement et Minéralurgie de Nancy (France). Ils remercient en outre le Professeur Georges Pedro et le reviewer anonyme pour leurs judicieux commentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Amouric M., and Olives J. 1998 - Transformation mechanisms and interstratification in conversion of smectite to kaolinite: an HRTEM study. *Clays and Clay Miner.* 46, pp. 521-527.
- Bitom D., Volkoff B., Beauvais A., Seyler F. et Ndjigui P.D. 2004 - Rôle des héritages latéritiques et du niveau des nappes dans l'évolution des modelés et des sols en zone intertropicale forestière humide. *C. R. Géoscience de surface* 336, pp. 1161-1170.
- Bitom D., Volkoff B. et Aboosolo-Angue M. 2003 - Evolution and alteration in situ of a massive iron duricrust in Central Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 89-101.
- Blot A., 1980 - L'altération climatique des massifs de granite au Sénégal, Paris : Travaux et Documents de l'ORSTOM, 114, 442 p.
- Blot A., et Leprun, J.C. 1973 - Influence de deux roches mères de composition voisine sur les altérations et les sols. Un exemple sur le socle cristallin au Sénégal oriental. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, 5, 1, pp. 45-57.
- Bocquier G., Muller J.P. et Boulange B. 1984 - Les latérites : connaissances actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. *Sci. du sol*, livre jubilaire du cinquanteenaire de l'AFES, pp. 123-138.
- Boulet R., 1974 - Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatiques. Thèse Sci, Mém ORSTOM, 85, 1978, 272 p.
- Boulet R. Lucas Y., Fritsch E., Paquet H. 1997 - Geochemical processes in tropical landscapes : Role of the soil covers. *In: soils and sediments. Soils and sediments, Mineralogy and geochemistry*, (eds) Paquet and Clauer (eds), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 67-96.
- Brabant P. et gavaud M., 1985 - les sols et les ressources en terre du nord Cameroun (Provinces du nord et de l'extrême Nord) ORSTOM-MESURES-IRA. Coll. N° 103, 285 p.
- Bühman C. and Schoeman J.L., 1995 - A mineralogical characterization of vertisols from the northern regions of the Republic of South Africa. *Geoderma*, 66, pp. 239-257.
- Delvigne, J. 1965-. Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. ORSTOM*, 13, 177p.
- Driese S. G., Mora C., Stiles C. A., Joeckel R.M. et Nordt L. C., 2000 - Mass-balance reconstruction of a modern vertisol: implications for interpreting the geochemistry and burial alteration of paleo-vertisols. *Geoderma*, 95, pp. 179-204.
- Dudal R., 1967- Sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales. Collection FAO : progrès et mise en valeur - Agriculture, cahier 83, 172 p.
- Dudal R. and Eswaran H., 1988 - Distribution, properties and classification of vertisols. *In: Wilding, L.P., Puentes, R. (eds), Their distribution, properties, classification and Management.* Texas A&M University Printing Center, College Station, pp. 1-22.
- Fitzpatrick E.A., 1980 - Soils: Their formation, classification and distribution. Longman, London, 352 p.
- Lacroix A., 1913 - les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Nouv. Arch. Museum*, 5, pp. 255-356.
- Leprun J.C., 1979 - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Thèse sci, Univ strasbourg, 1979. *Scigeol Mem (Strasb)* 59: 224 p.
- Letouzey R., 1979 - Carte phytogéographique du Cameroun au 1/32 500 000. *In: Atlas Jeune Afrique du Cameroun, Jeune Afrique*, Paris, p. 45.
- Meunier A., 2003 - Les argiles. Collection géosciences. GB Science Publisher, 433 p.
- Millot G., 1964 - Géologie des argiles. Masson édit., Paris, 499 p.
- Muller J.P., 1987 - Analyse pétrologique d'une formation latéritique meuble du Cameroun. Essai de traçage d'une différenciation supergène par les paragenèses minérales secondaires. Thèse d'Etat Univ. Paris VII, 188 p.
- Nahon D., 2003 - Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *C.R. Géosciences*, 335, pp. 1109-1119.
- Nahon D., 1991 - Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. John Wiley and Sons ed., New York, 297 p.
- Ngounou Ngatcha B., Mudry J., Sigha Nkamdjou L., Njitchoua R. et Naah E., 2005 - Climate variability and impacts on an alluvial aquifer in a semi-arid climate, the Logone-Chari plain (South of Lake Chad) IAHS publ. 295, pp. 94-100.
- Nguetnkam J.P., 2004 - Les argiles des vertisols et des sols fersiallitiques de l'Extrême nord Cameroun : Genèse, propriétés cristallichimiques et texturales, typologie et applications à la décoloration des huiles végétales. Thèse Doct. Etat. Univ. Yaoundé I, 218 p.
- Nguetnkam J.P., 1994 - Etude d'une toposéquence de sols sur granite dans la région de Mvangan (Sud - Cameroun): caractérisation de domaines de pédogenèse différenciés. Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Univ. Yaoundé, 165 p.
- Paquet H., 1969 - Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saison contrastées. Thèse d'Etat, mém. Serv. Cart. Geol ; d'Alsace Lorraine.
- Paquet H. and Clauer N., 1997 - Soils and sediments, Mineralogy and geochemistry, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 369 p.
- Pedro G., 1966 - Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C. R. Acad. Sci.*, 262, pp. 1828-1831.
- Siefferman G., 1969 - Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. *Mém. ORSTOM*, 66, 183 p.
- Suchel J.B., 1987 - Les climats du Cameroun. Tome III. Thèse Univ. St. Etienne, 1186 p.
- Tardy Y., 1993 - Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson, Paris, 459 p.
- Tardy Y., Bocquier G., Paquet H. and Millot G., 1973 - Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. *Geoderma*, 10, pp. 271-284.
- Tardy Y. et Roquin C., 1998 - Dérive des continents. Paléoclimats et altérations tropicales. BRGM, Orléans, France, 431 p.
- Velde B., 1995 - Origin and mineralogy of clays. *Clays and the environment.* Springer, Berlin, 334 p.
- Yongue-Fouateu R., 1986 - Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse 3^e cycle, Univ. Yaoundé, 214 p.

