
Etude pétrologique d'une formation latéritique sur granite en milieu tropical forestier sud-camerounais (Afrique centrale)

Mise en évidence de son caractère polyphasé

J.-P. Nguetnkam⁽¹⁾, R. Yongue Fouateu⁽²⁾, D. Bitom⁽²⁾, P. Bilong⁽²⁾ et B. Volkoff⁽³⁾

(1) Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Ngaoundéré, B.P. 454 Ngaoundéré, Cameroun

(2) Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé1, B.P. 812 Yaoundé, Cameroun

(3) IRD, 2 Avenue Henri-Varagnat, 93143 Bondy Cedex, France

RÉSUMÉ

Dans la région de Mvangan au Sud Cameroun, l'analyse pétrologique d'une formation latéritique développée sur granite montre qu'elle est constituée de trois grands ensembles d'horizons, qui sont, de bas en haut :

- un ensemble inférieur à kaolinite majoritaire, associée à l'halloysite et à la gibbsite, subdivisée en une allotérite à structure du granite partiellement conservée, surmontée par un horizon argileux bariolé dans lequel cette structure s'effondre progressivement vers le haut ;
- un ensemble médian représenté par une dalle isaltéritique dure et continue, sauf à l'aval où elle est fragmentée. Cette dalle est caractérisée par la parfaite conservation de la texture du granite et par la présence quasi exclusive de gibbsite ;
- un ensemble supérieur à kaolinite, regroupant des horizons glébulaires ferrugineux et des horizons argileux meubles dont aucune de leurs organisations, ni leur composition géochimique, ne rappelle la dalle isaltéritique sous jacente.

Ces trois ensembles sont en discontinuité génétique et résultent de trois phases d'altération et de pédogenèse différentes : une phase monosiallisante couplée à un cuirassement ferrugineux pour l'ensemble supérieur, une phase allitissante pour l'ensemble médian, et une phase essentiellement monosiallisante pour l'ensemble inférieur. Seule la phase monosiallisante du niveau inférieur reste fonctionnelle et assure l'enfoncement vertical du profil dans les conditions pédoclimatiques actuelles. A l'inverse, les deux premières phases ne sont plus fonctionnelles, et les niveaux supérieur et médian sont en déséquilibre et ne se renouvellent plus, mais se transforment.

La couverture pédologique étudiée, constituée de strates superposées formées dans des conditions pédoclimatiques différentes, est donc polyphasée.

Mots clés

Zone tropicale, sud Cameroun, formation latéritique, sol polyphasé, kaolinite, gibbsite.

SUMMARY**PETROLOGICAL ANALYSIS OF A LATERITIC FORMATION ON GRANITE IN SOUTH CAMEROONIAN TROPICAL ZONE (CENTRAL AFRICA) : emphasis on its polyphased character**

In the region of Mvangan in South Cameroon (figure 1), the petrological analysis of a lateritic formation developed on granite reveals that it is made up of three sets of horizons (figure 2) which are, from bottom to top :

- a lower set mainly constituted by kaolinite, associated to small amounts of halloysite and gibbsite (table 1). This set is made up by two horizons, an alloterite characterised by a partial preservation of the granite structure (figure 3a), overlaid by a mottled clayey horizon, in which this structure has completely disappeared (figure 3b) ;
- a median set constituted by an isalteritic aluminous duricrust which is continuous, except down slope where it is fragmented. The duricrust is characterized by the conservation of the granite structure and by the predominance of gibbsite (figure 3c) ;
- an upper kaolinitic set with glaebular and loose clayey horizons. They present organisations, texture and geochemical composition which are in all points different from those of the underlying isalteritic gibbsitic duricrust (figure 4, Table 1).

These three sets are genetically discontinuous and result from three different phases of weathering and pedogenesis (figure 5) : a monosiallitic phase with ferruginous accumulations explains the upper set, an allitic phase explains the median set, and a monosiallitic phase for the lower set. Only the monosiallitic phase of the lowest level remains functional and insures the deepening of the profile in the present-day pedoclimatic conditions. On the opposite, the two first phases are no longer functional, and both the upper and the median levels are nowadays out of balance and undergo transformations.

The pedologic cover of this study, which is made up by surimposed layers formed under different pedoclimatic conditions, is therefore polyphased.

Key-words

Tropical zone, south Cameroon, laterites, polygenetic soil, kaolinite, gibbsite.

RESUMEN**ESTUDIO PETROLÓGICO DE UNA FORMACIÓN LATERÍTICA SOBRE GRANITO EN MEDIO TROPICAL FORESTAL DEL SUR DE CAMERÚN (AFRICA CENTRAL) : Puesta en evidencia de su carácter polifásico**

En la región de Mvangan al sur de Camerún, el análisis petrológico de una formación laterítica desarrollada sobre un granito muestra que está constituida de tres conjuntos de horizontes, que son, de abajo hacia arriba:

- un conjunto inferior con kaolinita parcialmente conservada, luego un horizonte arcilloso moteado en el cual esta estructura progresivamente se hunde hacia arriba;
- un conjunto mediano representado por una losa isalterítica dura y continua, salvo hacia abajo donde está fragmentada. Esta losa se caracteriza por una perfecta conservación de la textura del granito y por la presencia casi exclusiva de gibbsite.
- un conjunto superior con kaolinita, que agrupa horizontes ferruginosos y horizontes arcillosos muebles cuyo ninguna de sus organizaciones y composición geoquímica, recuerde la losa isalterítica subyacente.

Estos tres conjuntos son en discontinuidad genética y resultan de tres fases de alteración y de pedogénesis diferentes: una fase monosiallitizante acoplada con un encoirazamiento ferruginoso para el conjunto superior, una fase allitizante para el conjunto mediano, y una fase esencialmente monosiallitizante para el conjunto inferior. Solo la fase monosiallitizante del nivel inferior queda funcional y asegura el hundimiento vertical del perfil en las condiciones pedoclimáticas actuales. Al revés, las dos primeras fases no son más funcional, y los niveles superior y mediano son en desequilibrio y no renovan más, pero se transforman.

La cobertura pedológica estudiada, constituida de estratos superpuestos formados en condiciones pedoclimáticas diferentes, es entonces polifásica.

Palabras clave

Zona tropical, sur de Camerún, formación laterítica, suelo polifásico, kaolinita, gibbsite

Les formations latéritiques du plateau forestier sud-camerounais appartiennent au domaine latéritique des régions intertropicales. Elles se sont développées depuis des dizaines de millions d'années (Bocquier *et al.*, 1984 ; Eno Belinga, 1986, Tardy, 1993) à la suite d'altérations intenses qui se sont exercées sur les formations rocheuses d'un craton resté stable depuis les orogénèses libériennes et éburnéennes (Regnoul, 1986 ; Maurizot *et al.*, 1987 ; Nedelec *et al.*, 1990 ; Tchameni, 1997). Ces formations latéritiques sont épaisses et les variations climatiques qui se sont succédées au cours de cette longue période de latéritisation (Eno Belinga, 1986) rendent leur organisation complexe.

De nombreux travaux entrepris sur les formations latéritiques du plateau forestier sud-camerounais ont établi des filiations génétiques entre les différents horizons qui les constituent (Bilong, 1988 ; Bitom, 1988 ; Bilong *et al.*, 1992 ; Bitom et Volkoff, 1993 ; Bekoa, 1994 ; Etamé, 1994 ; Nguetnkam, 1994, Tématio, 1994 ; Ngo Bidjeck, 2004). D'autres, par contre moins nombreux, signalent des discontinuités génétiques au sein de ces vieilles formations pédologiques (Martin, 1966 ; Muller, 1987 ; Tardy, 1993 ; Tardy et Roquin, 1998 ; Nahon, 2003).

Ces discontinuités seraient dues, entre autres, au caractère allochtone des horizons supérieurs, par recul des versants, colluvionnement et inversion des matériaux (Segalen, 1969 ; Thomas, 1972, 1994).

Sur la base d'arguments pétrographiques, minéralogiques et géochimiques, la présente étude établit des discontinuités génétiques au sein d'une formation latéritique développée sur granite dans la région forestière de Mvangan au Sud - Cameroun.

CADRE NATUREL

La région forestière de Mvangan est localisée à l'extrême sud du pays, au sein du plateau forestier sud-camerounais (*figure 1*), d'altitude moyenne 750 m. Elle est soumise à un climat de type équatorial à caractéristiques continentales (Suchel, 1982) avec quatre saisons : deux saisons humides alternant avec deux saisons sèches. Les précipitations moyennes sont comprises entre 1500 et 2000 mm, et la température moyenne, peu variable dans l'année, est de l'ordre de 24 °C. Le réseau hydrographique, dense et persillé, isole des collines d'altitudes différentes, séparées par des bas-fonds marécageux.

Les formations géologiques de la région de Mvangan appartiennent à l'unité du Ntem qui fait partie du craton. Elles sont constituées de gneiss charnockitiques acides et basiques, de granites, de diorites, de syénites et de gabbros (Regnoul, 1986 ; Maurizot *et al.*, 1987 ; Nedelec *et al.*, 1990 ; Tchameni, 1997).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'interfluve étudié est constitué de deux parties couramment rencontrées dans les couvertures pédologiques des collines sur granite calco-alkalin de la région forestière de Mvangan : une partie haute pentue culminant à 807 m, prolongée par un replat d'altitude 600 m (*figure 2a*). La roche, qui affleure en blocs uniquement dans la partie haute, est un granite à structure grenue équante, constitué de feldspaths (orthose et plagioclases), de quartz, de pyroxènes, de biotite et de minéraux opaques.

La présente étude porte sur la couverture pédologique du replat. Elle a été étudiée au moyen de cinq fosses pédologiques, creusées suivant la ligne de plus grande pente, orientée Nord-Sud.

A la suite d'une description macroscopique détaillée des profils, des échantillons ont été prélevés et ont fait l'objet d'analyses pétrographiques, minéralogiques et chimiques en laboratoire. Des lames minces, 60 au total, de roches et de sols préalablement indurés à la résine, ont été étudiées au microscope optique.

Les déterminations minéralogiques ont été effectuées par diffractométrie des rayons X. Les analyses chimiques ont été faites par spectrométrie d'émission à torche à plasma (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et TiO_2) avec le spectromètre ICP 1500 SOPRA et par spectrométrie d'émission de flamme et d'absorption atomique (K_2O , Na_2O , CaO , MgO , et MnO) avec le spectromètre PHILIPS PU 9000. Toutes ces analyses ont été réalisées au Laboratoire des Formations Superficielles de l'IRD à Bondy (France).

Résultats

D'épaisseur maximale 11 m, les sols du replat sont marqués par l'absence de blocs de granite en surface et par la présence d'une nappe phréatique à la base de tous les profils. La roche saine n'a pas été atteinte.

Trois grands ensembles d'horizons peuvent y être distingués (*figure 2b*) :

- un ensemble inférieur qui regroupe l'allotérite et l'horizon argileux bariolé,
- un ensemble médian à dalle isaléritique gibbsitique,
- et un ensemble supérieur qui regroupe les horizons glébulaires et les horizons argileux meubles.

L'ensemble inférieur

L'allotérite

L'allotérite, caractérisée par une structure du granite partiellement conservée, est observée sur plus d'un mètre jusqu'à la nappe phréatique. Elle est rougeâtre et limoneuse à limono - sableuse. Elle présente localement de petits domaines argileux pédoturbés, rouges ou jaunes, millimétriques à centimétriques. Au microscope, elle est constituée de plages isaléritiques associées à des fonds matriciels pédoturbés rouge et jaune, qui s'organisent en assembla-

Figure 1 - Localisation de la zone d'étude. 1) Plateau sud camerounais ; 2) Zone d'étude

Figure 1 - Localisation of the studied area

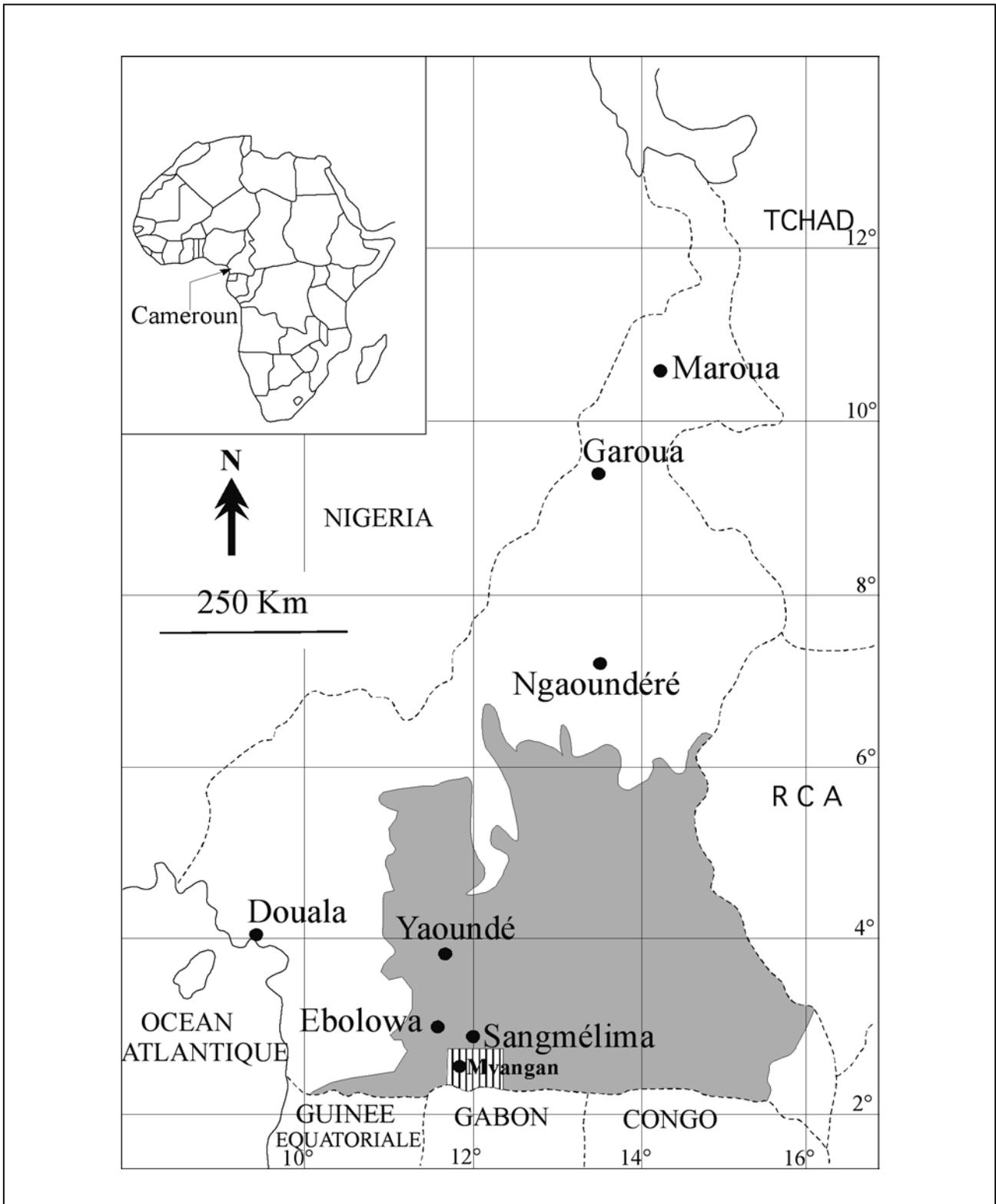
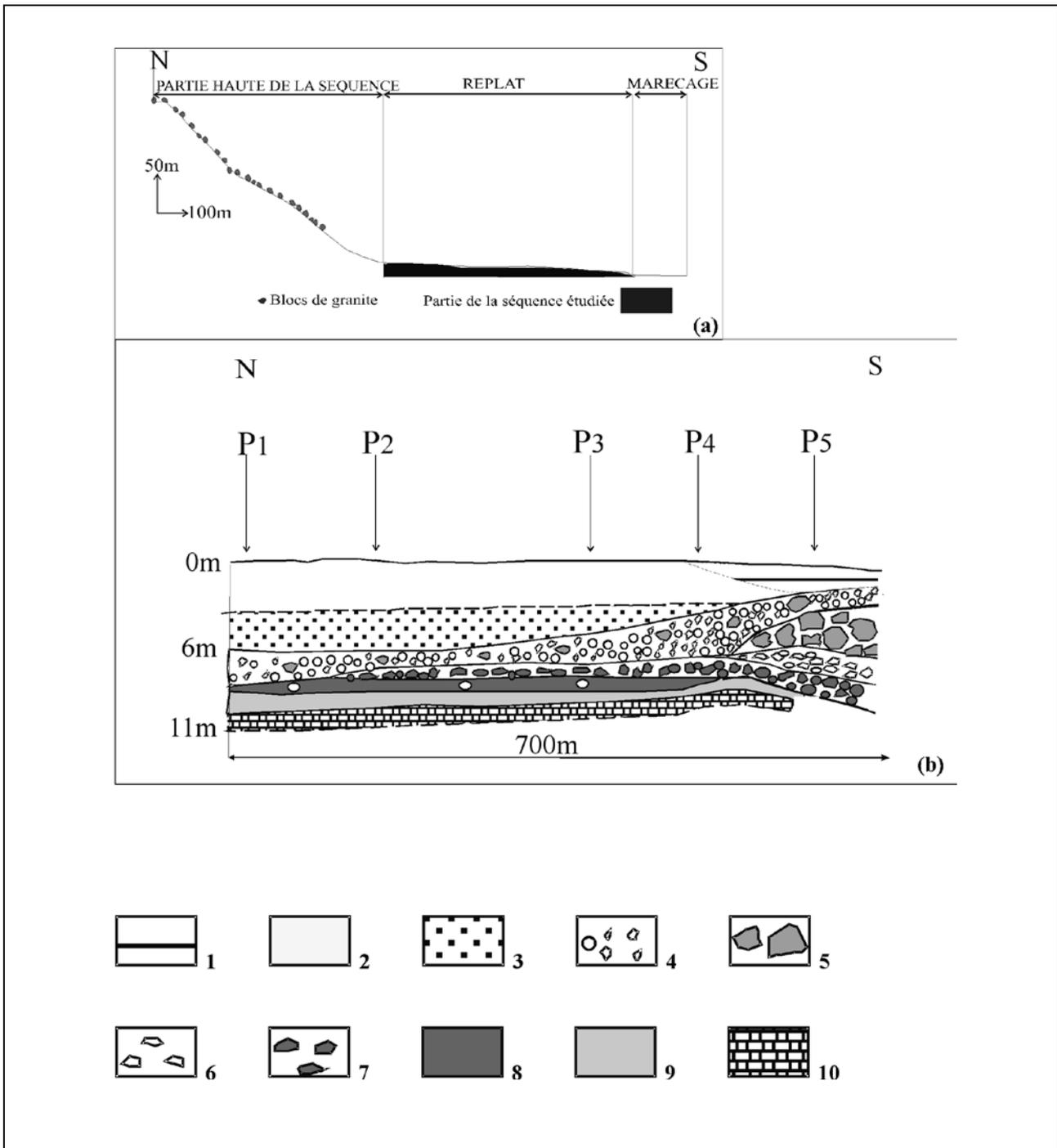


Figure 2 - Les sols du replat. (a) : Localisation dans le paysage (b) : Organisation macroscopique
Figure 2 - Soils of the fan



Ensemble supérieur : 1 : Horizon argileux brun jaune ; 2- Horizon argileux brun clair ; 3- Horizon brun rougeâtre ; 4- Horizon nodulaire ferrugineux ; 5- Horizon à blocs de cuirasse ; 6- Horizon caillouteux ferrugineux

Ensemble médian : 7- Fragments d'isaltérite dure ; 8- Dalle d'isaltérite dure

Ensemble inférieur : 9- Horizon argileux bariolé ; 10- Allotérite

P1, P2, P3, P4 et P5 : Puits

ge de type porphyroscellique (*figure 3a*). Les plages isaltéritiques sont constituées par des cloisons ferrugineuses de pseudomorphose des pyroxènes, les microcristaux de kaolinite d'altération des feldspaths et des quartz fissurés. La kaolinite est majoritaire et microcristalline, elle est associée à de l'halloysite et à de faibles proportions de gibbsite, d'hématite et de goethite (*tableau 1*). Sur le plan géochimique, elle est constituée de 50,20 % de SiO_2 , 23,13 % de Al_2O_3 et de 8,10 % de Fe_2O_3 . Les autres éléments (Ti, Mn, P) sont en quantité négligeable, tandis que les cations alcalins et alcalino-terreux sont totalement absents (*tableau 1*).

Le passage à l'horizon argileux bariolé est progressif, marqué par la généralisation des domaines pédoturbés.

L'horizon argileux bariolé

D'épaisseur maximale 1 à 1,5 m, l'horizon argileux bariolé est constitué d'un matériau bariolé jaune et rouge, pédoturbé, identique au matériau pédoturbé de l'allotérite sous-jacente. De rares petites plages isaltéritiques sont observées au sein de ce matériau (*figure 3b*). Par rapport à l'allotérite sous-jacente, les compositions minéralogique et chimique ne varient que très peu. On note en particulier la disparition de la gibbsite dans les domaines rouges, concomitamment à une légère diminution de l'alumine (de 23,13 à 21,55 % Al_2O_3) et de la silice (de 50,20 à 48,68 % SiO_2) et à une augmentation plus sensible de fer (de 8,10 à 17,10 % Fe_2O_3) ; dans les domaines jaunes par contre, on observe uniquement une très légère diminution de l'alumine (de 23,13 à 22,16 % Al_2O_3) et du fer (de 8,10 à 6,51 % Fe_2O_3) (*tableau 1*), et une augmentation plus sensible de la silice (de 50,20 à 58,38 % SiO_2) (*tableau 1*). Sur le diagramme triangulaire SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , ceci se traduit par des points représentant les trois matériaux, allotérite, domaines rouges et domaines jaunes, qui restent très voisins (*figure 4*).

La limite entre l'horizon argileux bariolé et l'ensemble à dalle isaltéritique sus-jacent est brutale.

L'ensemble médian à dalle isaltéritique gibbsitique (160 cm)

D'épaisseur maximale 1,60 m, l'ensemble médian est constitué d'une dalle isaltéritique gibbsitique très indurée, que surmonte un horizon à fragments d'isaltérite très indurés également, de dimensions centimétriques, emballés dans une matrice argileuse brun rougeâtre clair. Cet horizon subsiste seul vers l'aval (*figure 2b*).

Au microscope optique, la dalle isaltéritique est constituée de quartz fissurés, de plages de microcristaux de gibbsite de pseudomorphose des feldspaths, et d'oxydes de fer bruns à noirs de pseudomorphose de pyroxènes, disposés en cloisons et ménageant de nombreux vides de 50 à 200 μm de dimensions (*figure 3c*). La disposition des quartz et des fantômes de feldspaths et de pyroxènes rappelle la structure équante du granite.

Les analyses minéralogiques révèlent que la dalle isaltéritique

est constituée essentiellement de gibbsite ; ce minéral est associé à un peu de goethite, d'hématite et de quartz (*tableau 1*).

Sur le plan géochimique, la dalle apparaît essentiellement composée de silice (37,12 % SiO_2) et d'alumine (34,56 % Al_2O_3), avec des quantités de fer réduites (7,02 % Fe_2O_3) (*tableau 1*). Par rapport à l'ensemble inférieur sous-jacent, on note une brutale diminution de la silice, concomitante à une forte augmentation de l'alumine ; ceci est marqué sur le diagramme triangulaire SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 par un net décalage des points en direction du pôle alumineux (*figure 4*).

Dans les fragments d'isaltérite au-dessus de la dalle, la structure du granite est également conservée, et on y retrouve les mêmes caractères microscopiques que dans la dalle. Sur le plan minéralogique, on note que ces fragments contiennent, en plus des minéraux sus-mentionnés dans la dalle, une faible proportion de kaolinite (*tableau 1*), tandis que chimiquement, leur composition reste similaire à celle de la dalle (*tableau 1*).

Le matériau argileux, qui emboîte les fragments d'isaltérite, présente un fond matriciel orange faiblement structuré. La kaolinite y est le minéral argileux majoritaire ; elle est associée à de faibles proportions de gibbsite, de goethite, d'hématite et de quartz (*tableau 1*). Sur le plan géochimique, il est constitué principalement de silice (59,32 % SiO_2), d'alumine (20,09 % Al_2O_3) et plus accessoirement de fer (8,98 % Fe_2O_3) ; les autres éléments sont soit faiblement représentés comme le titane (1,01 % TiO_2), soit en quantité négligeable comme les bases, Mn ou P (*tableau 1*).

Au total, il apparaît un changement brutal, tant sur les plans pétrographiques, minéralogiques que géochimiques, quand on passe de l'ensemble inférieur à l'ensemble médian.

La limite entre l'ensemble à dalle isaltéritique gibbsitique et les horizons glébulaires sus-jacents est brutale.

L'ensemble supérieur

Les horizons glébulaires

On distingue dans la séquence, trois horizons glébulaires qui sont, de bas en haut : un horizon caillouteux, un horizon à blocs de cuirasse et un horizon nodulaire.

L'horizon caillouteux (120 cm)

D'épaisseur maximale 1,20 m, l'horizon caillouteux n'est présent qu'à l'aval du replat (*figure 2b*). Il est constitué d'éléments ferrugineux indurés de forme quelconque et de diamètre moyen de l'ordre de 5 cm (cailloux ferrugineux), emballés dans une terre fine rougeâtre, argileuse et meuble.

Les cailloux ferrugineux présentent un fond matriciel rouge sombre à plasma isotique, dans lequel on observe très localement des petits domaines rouges et biréfringents à microcristaux de gibbsite. Des quartz hétérométriques, ainsi que de très rares fantômes de pyroxènes sont également observés. Minéralogiquement, ils

Tableau 1 - Données minéralogiques et géochimiques des sols du replat

G : Goethite ; Gi : gibbsite ; K : Kaolinite ; H : Halloysite ; He : Hématite ; Q : Quartz ; F : Feldspath

Grosse lettre : très abondant ; lettre moyenne : abondant ; petite lettre : peu abondant ; très petite lettre : très peu abondant ou traces.

Big size letter : very abundant ; medium size letter : abundant ; small size letter : poorly represented ; very small size letter : trace

Table 1 - Mineralogical and geochemical data of soils of the fan

	Volumes pédologiques	Minéralogie	Géochimie (en % d'oxyde)												
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Total
Ensemble Supérieur	Horizon argileux brun jaune	K _{Gi} Q G F	58,57	19,09	7,00	1,79	0,08	0,00	0,00	,09	0,05	0,12	4,14	8,51	99,35
	Horizon argileux brun clair	K Q G F	57,07	20,48	7,94	1,40	0,13	0,00	0,00	0,08	3,26	0,14	3,26	9,03	99,60
	Horizon argileux brun rougeâtre	K Q G He	55,00	19,89	8,00	1,34	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	0,11	5,90	8,90	99,17
	Terre fine embal- lant nodules	K Q G He	50,35	23,00	8,60	1,14	0,05	0,00	0,00	0,07	0,03	0,13	7,28	9,49	100,14
	Nodules	K Q G He	20,89	18,45	47,06	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,20	1,52	11,76	100,44
	Cuirasse à faciès subnodulaire	K Q G H He	26,41	17,17	42,35	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,21	2,57	10,32	99,92
	Cuirasse à faciès alvéolaire	K Q G He	35,37	15,66	36,75	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12	1,75	9,25	99,77
	Terre fine embal- lant cailloux ferrugineux	K _{Gi} Q G H	54,80	18,40	11,69	1,20	0,17	0,00	0,00	0,06	0,04	0,10	5,02	8,19	99,66
	Cailloux ferru- gineux	K _{Gi} Q G He	42,77	17,67	26,58	0,71	0,15	0,00	0,00	0,04	0,02	0,11	2,47	9,47	99,99
	Ensemble médian à dalle gibb- sitique	Terre fine embal- lant fragments d'isaltérite	K _{Gi} Q G H	59,32	20,09	8,98	1,01	0,06	0,00	0,00	0,04	0,04	0,10	1,11	8,89
Fragments d'isal- térite		K Gi Q G He	38,14	34,29	8,36	0,93	0,05	0,00	0,00	0,00	0,03	0,21	0,48	17,59	100,10
Dalle d'isaltérite		Gi Q G He	37,12	34,56	7,02	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,22	0,03	17,68	97,47
Ensemble inférieur	Volume rouge de l'horizon bariolé	K _H Q G He	48,68	21,55	17,10	0,73	0,06	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	1,72	9,78	99,77
	Volume jaune de l'horizon bariolé	K _H Gi Q G He	58,38	22,16	6,51	1,14	0,07	0,00	0,00	0,06	0,04	0,09	1,19	9,45	99,08
	Allotérite	K _H Gi Q G He	50,20	23,13	8,10	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	7,30	9,98	99,47

sont constitués principalement de kaolinite, associée à de petites quantités de quartz, d'hématite et de goethite, et à des traces de gibbsite (*tableau 1*). Sur le plan géochimique, les cailloux ferrugineux sont composés quasi exclusivement de silice (42,77 % SiO₂), de fer (26,58 % Fe₂O₃) et d'alumine (17,67 % Al₂O₃) (*tableau 1*).

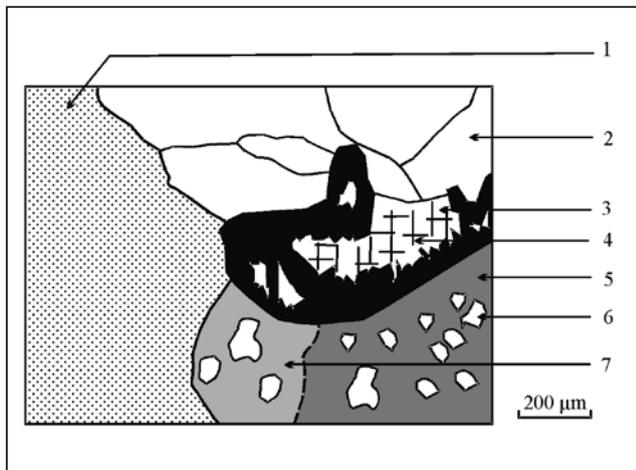
La matrice argileuse qui emballe les cailloux ferrugineux est microagrégée. Elle contient les mêmes minéraux que les cailloux

ferrugineux, avec toutefois des proportions de goethite et d'hématite plus faibles. Sur le plan géochimique, on note par rapport aux cailloux ferrugineux, des teneurs en fer plus modestes (11,69 % Fe₂O₃ contre 26,53 %), mais des teneurs en silice plus élevées (54,80 % SiO₂ contre 42,77 %), tandis que les teneurs en alumine restent similaires, de l'ordre de 18 % (*tableau 1*).

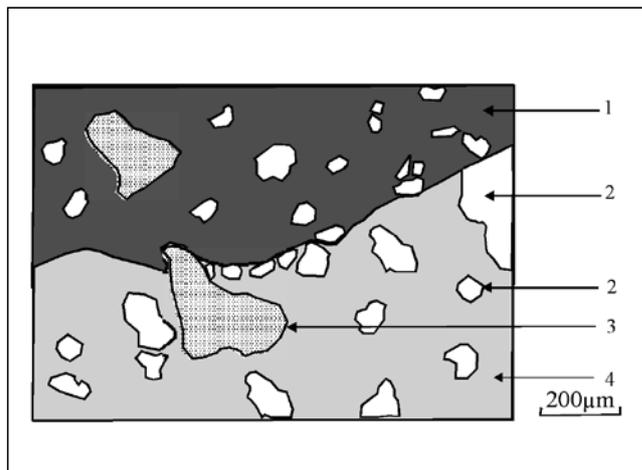
Le passage à l'horizon à blocs de cuirasse est net.

Figure 3A - Organisation microscopique de l'alloterite

- 1) Microcristaux de kaolinite de pseudomorphose des feldspaths ;
- 2) Quartz fissuré ;
- 3) Vides ;
- 4) Cloisons ferrugineuses de pseudomorphoses des pyroxènes ;
- 5) Fond matriciel rouge pédoturbé ;
- 6) Quartz ;
- 7) Fond matriciel jaune pédoturbé

Figure 3A - Microscopic organization of alloterite**Figure 3B** - Organisation microscopique de l'horizon bariolé

- 1) Fond matriciel rouge pédoturbé ;
- 2) Quartz ;
- 3) Plages isaltéritiques résiduelles à microcristaux de kaolinite ;
- 4) Fond matriciel jaune pédoturbé.

Figure 3B - Microscopic organization of mottled horizon**L'horizon à blocs de cuirasse**

Comme l'horizon sous-jacent, l'horizon à blocs de cuirasse n'est présent qu'à l'aval du replat (*figure 2b*). Il comporte des blocs de cuirasse très indurés, de 40 à 50 cm de diamètre moyen, séparés les uns des autres par une terre fine brun rougeâtre, argileuse et meuble, identique à celle de l'horizon caillouteux.

Les blocs de cuirasse présentent deux faciès, un faciès alvéolaire et un faciès subnodulaire. Les blocs à faciès alvéolaire présentent un fond matriciel rouge sombre isotopique. Ils contiennent plus de fer (36,75 % Fe_2O_3 contre 26,58 %) que les cailloux ferrugineux, mais moins de silice (35,37 % SiO_2 contre 42,77 %) et d'alumine (15,66 % Al_2O_3 contre 17,67 %). Le fer est présent sous forme de goéthite et d'hématite ; ces deux minéraux sont associés à un peu de quartz et surtout à la kaolinite, qui demeure le constituant minéral le plus abondant (*tableau 1*). La gibbsite est absente.

Les blocs de cuirasse à faciès subnodulaire sont constitués de domaines rouge sombre, de forme subarrondie ou quelconque, très indurés, cimentés par un matériau rouge, également induré. Au microscope optique, tous ces matériaux apparaissent isotopiques et pauvres en quartz. Minéralogiquement, les blocs à faciès subnodulaire présentent la même composition que les blocs à faciès alvéolaire (*tableau 1*), tandis que sur le plan géochimique, le faciès subnodulaire apparaît plus riche en fer (42,35 % Fe_2O_3 contre 36,75 %) et en alumine (17,17 % Al_2O_3 contre 15,66 %), mais moins siliceux (26,41 % SiO_2 contre 35,37 %) que le faciès alvéolaire (*tableau 1*).

Le passage à l'horizon nodulaire est net.

L'horizon nodulaire

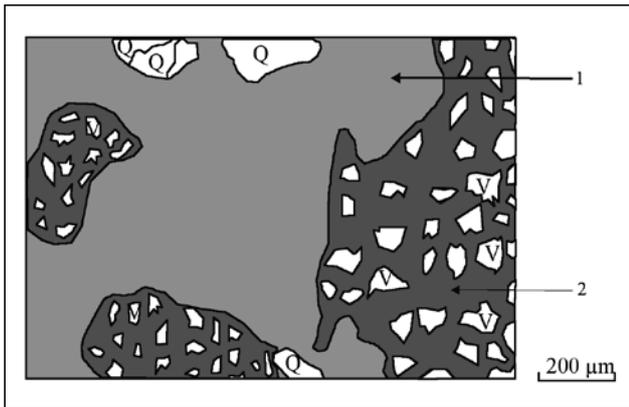
Il est présent sur tout le replat (*figure 2b*) et son épaisseur peut atteindre 2,5 m. Il est constitué d'une matrice argileuse brun rougeâtre emballant des nodules ferrugineux et quelques blocs de cuirasse, identiques à ceux de l'horizon sous-jacent.

Les nodules sont bruns à brun-rouge, de taille centimétrique, subarrondis et très indurés. Ils présentent un fond matriciel rouge sombre à plasma isotopique entourant complètement un squelette quartzueux fin peu abondant. Ils présentent la même minéralogie que les blocs de cuirasse (*tableau 1*), tandis que sur le plan géochimique, les nodules apparaissent comme les matériaux les plus riches en fer (47,06 % Fe_2O_3) et les moins siliceux (20,89 % SiO_2) de toute la séquence ; les teneurs en alumine sont de l'ordre de 18 % (*tableau 1*).

Le fond matriciel internodulaire comporte un plasma rougeâtre à structure argillasépique et de nombreux quartz fins, dont certains sont concentrés au voisinage des nodules. Sa composition minéralogique est identique à celle des nodules, avec cependant des proportions plus faibles d'hématite et de goéthite, mais plus élevées de quartz (*tableau 1*). Sur le plan géochimique, le matériau internodulaire se distingue par des teneurs importantes en silice (50,35 % SiO_2) puis en alumine (23,00 % Al_2O_3), plus modestes en fer (8,60 % Fe_2O_3), négligeables pour le TiO_2 (1,14 % TiO_2) et quasi nulles pour les bases et tous les autres éléments (*tableau 1*).

Le passage de l'horizon nodulaire aux horizons argileux meubles est net, marqué essentiellement par une disparition quasi totale des nodules.

Figure 3C - Organisation microscopique de la dalle isaléritique
 1) Microcristaux de gibbsite ; 2) Pyroxènes pseudomorphosés
 par des oxydes de fer en cloisons ; Q : Quartz ; V : Vides
Figure 3C - Microscopic organization of isaléritic duricrust



Les horizons argileux meubles

Trois horizons argileux meubles sont présents sur le replat : un horizon brun rougeâtre (5YR5/8), un horizon brun clair (7,5YR5/6) et un horizon brun-jaune (10YR5/6). L'épaisseur totale de tous ces horizons varie entre 1,5 et 6 m.

Dans la région médiane du replat, l'horizon argileux brun rougeâtre est surmonté par un horizon argileux brun clair. L'horizon argileux brun jaune n'est présent qu'à l'aval du replat, où il remplace les deux horizons meubles précédents (*figure 2b*). Microscopiquement, ces différents horizons sont caractérisés principalement par un plasma abondant à structure argillasépique, et un squelette quartzueux fin assez abondant également, noyé dans le plasma, et des vides peu abondants, principalement de type fissural et tubulaire.

Sur le plan minéralogique, ces matériaux sont constitués surtout de kaolinite, associée au quartz et à de petites quantités d'hématite et de goéthite (*tableau 1*) ; vers le sommet des profils, l'hématite disparaît, tandis que des traces de gibbsite et de feldspaths sont détectées (*tableau 1*).

Sur le plan géochimique, les horizons argileux meubles sont composés principalement de silice (55 à 58,5 % SiO_2), d'alumine (19 à 20,5 % Al_2O_3) et de fer (7 à 8 % Fe_2O_3) (*tableau 1*). Le titane est faiblement représenté (1,3 à 1,8 % TiO_2), tandis que les bases et les autres éléments sont quasi absents (*tableau 1*).

Au total, sur un plan général, le passage de l'ensemble médian à l'ensemble supérieur est marqué par un net changement des faciès pétrographiques, couplé à un net changement à la fois de la minéralogie et de la composition chimique des matériaux. On passe en effet de matériaux riches en alumine, à gibbsite prédominante, à des matériaux argilo-ferrugineux, riches en kaolinite, goéthite et hématite. Sur le diagramme triangulaire SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , ceci se traduit par un net décalage des points vers les pôles siliceux ou ferrugineux (*figure 4*).

DISCUSSIONS

Originalité de la couverture pédologique

La couverture pédologique étudiée est constituée de trois grands ensembles d'horizons : un ensemble inférieur à kaolinite majoritaire, et qui regroupe l'allotérite et l'horizon argileux bariolé ; un ensemble médian à dalle isaléritique gibbsitique dure ; un ensemble supérieur à kaolinite et à oxyhydroxydes de fer, qui regroupe les horizons glébulaires ferrugineux et les horizons argileux meubles.

Cette organisation, qui présente la succession - horizon bariolé - dalle isaléritique - horizons glébulaires, est assez originale comparativement à ce qui est généralement observé et décrit dans la zone intertropicale (Leprun, 1977 ; Bocquier *et al.*, 1984). En effet, dans les écosystèmes tropicaux, la succession des horizons, dans la majorité des profils à cuirasse ferrugineuse (comme par exemple en Afrique de l'ouest, Madagascar...) qui sont biphasés (humide ancien, sec récent), ne contient pas de dalle gibbsitique médiane. Le caractère triphasé, mis en évidence dans la couverture pédologique étudiée, sera analysé et discuté dans les lignes qui suivent.

Différenciation des sols du replat : filiations verticales - discontinuités génétiques - colluvionnements

L'allotérite : altération monosiallitique

L'horizon allotérite, à la base des profils, est constitué majoritairement de kaolinite ; les analyses microscopiques précisent qu'il s'agit d'une kaolinite microcristalline. Ce minéral est associé notamment à de faibles proportions d'hallowysite et de gibbsite. Ceci montre que l'altération qui règne à la racine des profils est une monosiallisation (Pedro, 1966). Ce type d'altération est couramment observé et décrit en milieu intertropical (Delvigne, 1965 ; Boulangé, 1984 ; Yongue-Fouateu, 1986 ; Bilong, 1988 ; Bitom, 1988). Le fait que cette kaolinite soit micro-cristalline et l'hallowysite présente, est symptomatique d'un milieu semi-confiné (Nagasawa *et al.*, 1975, Bilong, 1988 ; Trolard *et al.*, 1990). Cet environnement semi-confiné serait généré par la présence de la nappe à la base des sols du replat. La présence de la gibbsite s'expliquerait dans ces conditions par l'existence de micro-systèmes relativement plus filtrants.

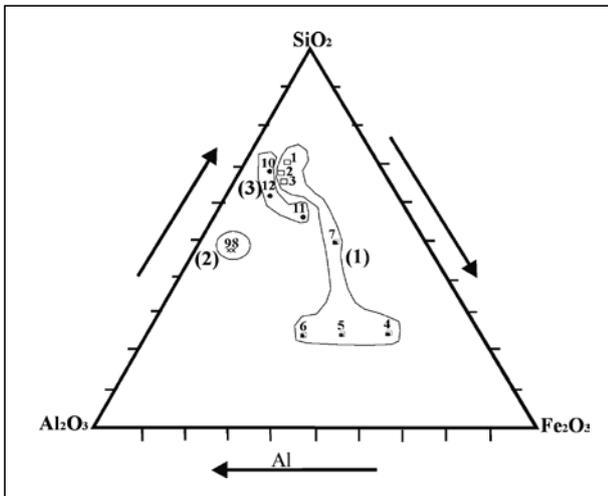
Relation allotérite - horizon argileux bariolé : continuité génétique

Le passage de l'allotérite à l'horizon argileux bariolé est marqué par :

- une généralisation des pédoplasmas rouge et jaune, identifiés dans l'allotérite, aux dépens des plages isaléritiques, dont il ne subsiste plus que des reliques,

Figure 4 -Variation des compositions chimiques des principaux volumes pédologiques des sols du replat dans le diagramme $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Figure 4 - Chemical composition of fan's soils main facies in the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ternary diagramm



(1) : Ensemble supérieur Matériaux meubles :

1- Horizon brun jaune ; 2- Horizon brun clair ; 3- Horizon brun rouge Matériaux indurés : 4- Nodules ; 5 et 6- Cuirasses ; 7- Cailloux

(2) : Ensemble médian

8- Dalle isaltéritique gibbsitique ; 9- Fragments d'isaltérite

(3) : Ensemble inférieur

10- Horizon bariolé (volume jaune) ; 11- Horizon bariolé (volume rouge) ; 12-Allotérite

- une identité du cortège minéralogique.

Tous ces faits suggèrent que l'horizon argileux bariolé dérive de l'allotérite. Le passage se fait par transformation des plasmas d'altération en plasmas à structure de sols ou pédoplasation (Lucas *et al.*, 1986). Ce type de transformation, courant à la base des sols (Bocquier *et al.*, 1984 ; Bitom, 1988 ; Lucas, 1989 ; Nahon, 1991 ; Nguetnkam, 1994) assure le passage des horizons d'altération au sol *sensu stricto*, sous l'effet des phénomènes de pédoturbation (Boulet *et al.*, 1984).

Au total, l'allotérite et l'horizon argileux bariolé jaune et rouge sont en filiation directe et se développent dans les conditions pédoclimatiques monosiallitisantes (Pedro, 1966) actuelles. Cette altération monosiallitisante active en milieu humide du sud Cameroun est différente de celle qui prévaut actuellement en milieu contrasté sec du Nord Cameroun, sous climat à pluviométrie 800-1 500 mm, où l'horizon d'altération qui s'y développe sur granite semblable est en majorité bisiallitique (Brabant, 1989 ; Nguetnkam, 2004).

Relation horizon argileux tacheté - ensemble à dalle isaltéritique gibbsitique : discontinuité génétique

Le passage de l'horizon argileux bariolé à la dalle isaltéritique

gibbsitique est marqué par des discontinuités morphologiques, minéralogiques et géochimiques.

- *Discontinuités morphologiques* : l'horizon bariolé est jaune et rouge, argileux et meuble, alors que la dalle est blanchâtre, massive et dure. De plus, la structure du granite est parfaitement conservée dans la dalle isaltéritique, alors que dans l'horizon argileux bariolé sous-jacent, celle-ci n'est guère plus reconnaissable.

- *Discontinuités minéralogiques* : l'horizon argileux bariolé est constitué majoritairement de kaolinite, alors que la dalle isaltéritique est quasi exclusivement gibbsitique.

- *Discontinuités géochimiques* : l'horizon bariolé est à dominance siliceuse, avec des teneurs en silice de l'ordre de 50 à 58 % SiO_2 , tandis que la dalle isaltéritique sus-jacente est à dominance siliceuse et alumineuse, avec surtout une brutale diminution de la silice, de 50-58 à 37 % SiO_2 , et une brutale augmentation de l'alumine, de 22-23 à 35 % Al_2O_3 . Ceci est matérialisé sur le diagramme $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ par un décalage brutal et très net des points d'un pôle à un autre, en l'occurrence du pôle SiO_2 vers le pôle Al_2O_3 , traduisant une rupture géochimique nette entre ces deux volumes pédologiques superposés.

Toutes ces discontinuités montrent clairement qu'il n'existe pas de filiation entre l'horizon argileux bariolé et la dalle isaltéritique gibbsitique sus-jacente.

La présence quasi exclusive de la gibbsite et la conservation de la texture du granite suggèrent que la dalle provient directement du granite par altération allitique (Pedro, 1966) et isovolume (Delvigne, 1965). Ces faits supposent un milieu très filtrant et un environnement chaud et humide (Tardy, 1993), couplé probablement à un brusque abaissement du niveau de base (Boulangé, 1984 ; Eno Belinga, 1986 ; Lucas, 1989).

A son sommet et vers l'aval, cette dalle se dégrade et génère un matériau argileux kaolinitique pédoturbé, emballant des fragments d'isaltérite durs.

Relation ensemble à dalle isaltéritique gibbsitique

- horizons glébulaires et horizons meubles : discontinuités génétiques - colluvionnements

Le passage de la dalle isaltéritique aux horizons glébulaires est aussi marqué par des discontinuités morphologiques, minéralogiques et géochimiques. On note en particulier : une limite brutale entre les deux horizons, une structure du granite conservée dans la dalle et absente dans les matériaux glébulaires, une composition minéralogique quasi exclusivement gibbsitique dans la dalle, mais à kaolinite et à oxyhydroxydes de fer, sans gibbsite, dans les horizons glébulaires, enfin, une composition chimique dominée par l'alumine et la silice dans la dalle, mais soit par la silice dans les matériaux meubles (50 à 58 % SiO_2), soit par la silice et le fer dans les matériaux indurés (respectivement 21 à 45 % SiO_2 et 27 à 47 % Fe_2O_3). Ces différentes discontinuités excluent toute filiation entre la dalle isaltéritique et les horizons glébulaires sus-jacents.

L'absence de gibbsite dans les horizons glébulaires incite à

penser que ces matériaux se seraient individualisés dans des conditions pédoclimatiques moins filtrantes que celles ayant régné lors de la formation de la dalle.

En admettant l'existence d'un système initialement cuirassé et continu, deux modèles d'évolution peuvent être envisagés pour expliquer l'origine de cet ensemble glébulaire : (i) la dégradation *in situ* par fonte géochimique, (ii) la dégradation et le démantèlement des cuirasses par recul des versants et colluvionnements.

Le premier modèle a été utilisé par divers auteurs (Leprun, 1977, Bocquier *et al.*, 1984 ; Lucas, 1989 ; Bitom *et al.*, 2003) pour expliquer l'évolution des modelés dans les écosystèmes forestiers. D'après ce modèle, les cuirasses, formées en climats contrastés, ont été démantelées sur place par fonte géochimique, du fait du passage à un climat plus humide, l'érosion mécanique par recul des versants restant très limitée ; ce qui conduit à un affaissement général de la surface topographique. Ainsi, les modelés ont évolué essentiellement par enfoncement vertical, suite à la fonte des cuirasses ; l'érosion des versants a été très faible, du fait de la persistance des cuirasses à l'aval des versants.

La principale objection que l'on peut formuler, en appliquant ce modèle à la couverture pédologique étudiée, c'est qu'il admet implicitement que la cuirasse reposait directement sur le granite qui aurait été altéré ultérieurement pour donner la dalle gibbsitique, ce qui est très peu probable. De plus, ce modèle n'explique pas de manière convaincante, la présence des blocs de granite sain sur le versant pentu qui surmonte le replat étudié. Par ailleurs, lorsque l'on sait que les climats ont suffisamment varié à travers l'Afrique, surtout depuis la fin du tertiaire, on ne peut logiquement ignorer d'importants mouvements de matière qui sont induits par ces oscillations, à l'échelle du versant ou de la séquence. Par conséquent ce modèle d'évolution ne peut être utilisé pour expliquer l'origine des horizons glébulaires du replat par fonte géochimique *in situ* d'un ancien système cuirassé.

Le modèle d'évolution par recul des versants, colluvionnements et inversion des matériaux a été développé par Segalen (1969) et Thomas (1972, 1994) pour expliquer les aplanissements observés en zone intertropicale. D'après ce modèle, les plateaux, initialement cuirassés, sont attaqués par l'érosion déclenchée par un abaissement du niveau de base. Cette attaque joue essentiellement sur la couronne qui ceinture le plateau. Le versant recule parallèlement à lui-même et provoque le déchaussement de la cuirasse qui est fragmentée sur place. Les fragments descendent la pente, mais aussi les versants reculent sous eux. Le matériau meuble situé sous les cuirasses, va être lui aussi dégagé ; il est déplacé le long des versants sur une faible distance, et se dépose sur les débris de cuirasse. On aboutit ainsi à une véritable inversion des matériaux : le niveau résistant de l'ancien sol est fragmenté, déplacé obliquement sur une distance relativement courte et recouvert par le matériau meuble qui se trouvait au-dessous de lui. L'évolution pédologique de ce matériau remonté en surface peut se faire alors de manière variée. Ainsi de proche en proche, et avec le temps, cette évolution conduit à un aplanissement de la surface topographique, et à la

mise en place des sols remaniés dont la principale caractéristique est la présence d'une stone line, constituée des débris de cuirasse et de quartz, surmontée par des matériaux meubles. Cette stone line présente une discontinuité nette avec les formations sous jacentes. Par ailleurs, à l'extrême, cette évolution peut conduire, en amont, à un décapage total de la couverture pédologique, laissant ainsi apparaître les blocs de roche qui correspondraient au niveau d'altération en boules.

Ce modèle d'évolution paraît être le plus plausible pour expliquer l'origine allochtone, par recul des versants et colluvionnements, des horizons glébulaires et des horizons meubles, en discontinuité, sur la dalle isaltéritique gibbsitique, dans la couverture pédologique étudiée. L'ensemble glébulaire apparaît ainsi ici comme la stone line, du fait de la discontinuité qu'elle présente avec la dalle isaltéritique gibbsitique. En outre, ce modèle permet d'expliquer aussi la présence des blocs de granite sain sur le versant pentu, par le décapage d'une ancienne couverture pédologique qui surmontait ces blocs. Ces mouvements de matière sont en accord avec les variations climatiques et les changements de niveau de base, induits probablement par les mouvements tectoniques (Eno Bellinga, 1986 ; Pedro et Chauvel, 1991).

Après leur dépôt, les débris de cuirasses auraient alors subi une dégradation par fonte géochimique, du fait du climat humide. En effet, les similitudes minéralogiques et géochimiques entre les différents matériaux ferrugineux indurés des horizons glébulaires, blocs de cuirasse et nodules ferrugineux, établissent des filiations directes entre ces derniers, leur individualisation étant en relation avec un décuirassement progressif (Leprun, 1977). En revanche, la présence de la gibbsite dans les cailloux ferrugineux et dans la terre fine qui les emballe, ainsi que la présence de rares pseudomorphoses ferrugineuses de pyroxènes, suggère que ces cailloux se formeraient à partir de l'horizon, à fragments d'isaltérite, sous jacent.

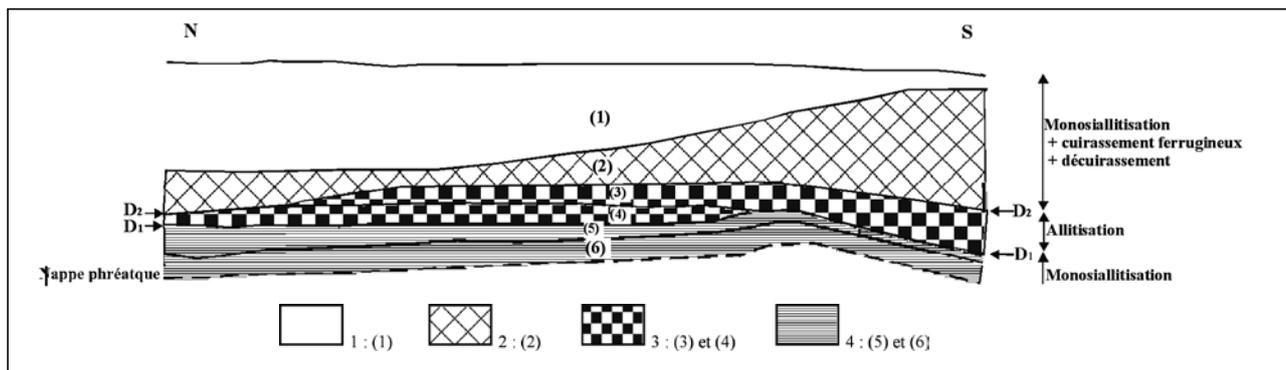
Les matériaux meubles qui recouvraient les débris de cuirasses auraient subi, après leur dépôt, une évolution sur place de type ferrallitique qui a conduit à la différenciation des horizons meubles qui surmontent actuellement les ensembles glébulaires. Cependant, il n'est pas exclu qu'une partie de ces horizons meubles provienne de la dégradation des débris de cuirasse par fonte géochimique après leur dépôt. L'identité des caractéristiques pétrographiques, minéralogiques et géochimiques entre les matériaux meubles internodulaires et ces horizons argileux meubles soutient cette hypothèse.

Au total, l'ensemble supérieur, à horizons glébulaires et horizons meubles, qui surmonte l'ensemble médian à dalle gibbsitique, a une origine colluviale et présente les caractères des sols remaniés décrits par Segalen (1969).

La discussion et l'interprétation de l'ensemble des données mettent en évidence le caractère polyphasé de la couverture pédologique du replat. La *figure 5* est une esquisse synthétique faisant ressortir les discontinuités et les trois domaines d'altération de la couverture pédologique étudiée.

Figure 5 - Représentation schématique de la couverture pédologique étudiée faisant ressortir son caractère polygénique

Figure 5 - Schematic representation of the studied pedologic cover showing its polygenic character



- 1- Domaine kaolinique supérieur : (1) : Horizons argileux meubles ;
 2- Domaine kaolinique et ferrugineux : (2) : Horizons glébulaires ;
 3- Domaine gibbsitique : (3) : Horizons à fragments d'isaltérite ; (4) : Dalle isaltéritique gibbsitique ;
 4- Domaine kaolinique inférieur : (5) : Horizon argileux bariolé ; (6) : Allotérite D1, D2 : Discontinuités génétiques

CONCLUSION

La couverture pédologique étudiée est constituée de trois grands ensembles d'horizons :

- un ensemble inférieur à kaolinite majoritaire, associée à l'halloysite et à la gibbsite. Il regroupe l'allotérite et l'horizon argileux bariolé. La texture du granite, partiellement conservée dans l'allotérite, s'effondre progressivement quand on passe à l'horizon argileux bariolé, en même temps que se généralisent les fonds matriciels pédoturbés ;

- un ensemble médian représenté par une dalle isaltéritique dure et continue, sauf à l'aval où elle est fragmentée. Cette dalle est caractérisée par la conservation de la texture du granite et par la présence quasi exclusive de gibbsite ;

- un ensemble supérieur à kaolinite et à oxyhydroxydes de fer, qui regroupe les horizons glébulaires ferrugineux et les horizons argileux meubles. Aucun des matériaux de cet ensemble ne rappelle ni l'organisation, ni la composition minéralogique et chimique de la dalle isaltéritique sous-jacente.

Ces différentes caractéristiques morphologiques, minéralogiques et géochimiques montrent que les trois ensembles de la couverture latéritique étudiée sont en discontinuité génétique et résultent de trois phases d'altération et de pédogenèse différentes : une phase monosiallittisante associée à un cuirassement ferrugineux et, couplée à un colluvionnement, par recul des versants et inversion des matériaux explique l'ensemble supérieur, une phase allittisante explique l'ensemble médian, et une phase monosiallittisante explique l'ensemble inférieur. Seule la phase monosiallittisante du niveau inférieur reste fonctionnelle et assure l'enfoncement vertical du profil dans les conditions pédoclimatiques actuelles. A l'inverse, les

deux premières phases ne sont plus fonctionnelles, et les niveaux supérieur et médian sont en déséquilibre et se transforment. Les sols du replat sont complexes, car ils présentent des organisations résultant de trois phases d'altération et de pédogenèse différentes. Ils sont donc polyphasés.

De plus, le caractère allochtone des horizons supérieurs, par recul des versants et colluvionnements, indique que dans cet environnement, sols et paysages ont évolué conjointement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Pr. G.E. Ekodeck et le Dr. A.A. Ganwa pour leurs judicieux commentaires sur la première version du manuscrit. Ils expriment également leur gratitude au Pr. A. Herbillon et au reviewer anonyme, pour leurs remarques et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Bekoa E., 1994 - Etude pétrologique et géochimique d'une couverture sur gneiss en zone forestière de l'extrême Sud - Cameroun : relation avec la dynamique du fer. Thèse de Doct. 3^e cycle, Univ. Yaoundé I, 187 p.
- Bilong P., 1988 - Genèse et développement des sols ferrallitiques sur syénite alcaline potassique en milieu forestier du Centre-Sud Cameroun. Comparaison avec les sols ferrallitiques développés sur roches basiques. Thèse d'Etat. Sci. Nat. Univ. Yaoundé, 367 p.
- Bilong P., Eno Bellinga S.M. et Volkoff B. 1992 - Séquence d'évolution des paysages cuirassés et des sols ferrallitiques en zones forestières tropicales d'Afrique centrale. Place des sols à horizons d'argile tachetée. C.R.Acad. Sci. Paris, t.314, série II, pp. 109-115.
- Bitom D., 1988 - Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone

- tropicale humide (Cameroun). Genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse Univ. Poitiers, 164 p.
- Bitom D., Volkoff B. et Abossolo-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.
- Bocquier G., Muller J.P. et Boulangé B., 1984 - Les latérites : connaissances actuelles et perspectives sur les mécanismes de leur différenciation. *Sci. du sol livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES*, pp. 123-138.
- Boulangé B., 1984 - Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire : les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. Thèse d'Etat Univ. Paris VII et Trav. et Doc. ORSTOM, 175, 362 p.
- Boulet R. Chauvel A. et Lucas Y., 1984 - Les systèmes de transformation en pédologie. *Sci. du sol livre Jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES*, pp. 167-179.
- Brabant P., 1989 - Le sol des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres. Tome I. Ed. ORSTOM, 530 p.
- Delvigne J., 1965 - Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. ORSTOM* 13, 177 p.
- Eno Belinga S.M., 1986 - Il y a 600 millions d'années... Paléoclimats et métaux non-métaux et substances minérales utiles du Cameroun. Alitaf Yaoundé, 128 p.
- Etame J., 1994 - Etude d'une séquence de sols sur gneiss en zone forestière humide du Sud Cameroun : organisation et évolution des matériaux. Thèse Doct. 3^e cycle Univ. Yaoundé I, 163 p.
- Fritsch E., 1984 - Les transformations d'une couverture ferrallitique. Analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane Française. Thèse 3^e cycle Univ., Paris VII, 188 p.
- Leprun J.C., 1979 - les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Transformations- Dégradations. *Mém. Sci. Géol. Strasbourg* 58, 224 p.
- Lucas Y., 1989 - Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Equilibres déséquilibre et transformation. Thèse Univ. Poitiers, 157 p.
- Lucas Y., Boulet R. et Andrieux P., 1986 - Un système pédologique aval en Guyane Française. Organisation et fonctionnement hydrodynamique. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie* 22 1, pp. 3-16
- Maurizot P., Feybesse J.L., Johan V. et Abessolo A., 1987 - Evolution tectonométamorphique libérienne et éburnéenne de la partie NW du craton zairois. (SW Cameroun). In : MATHEIS and SCANDELMEIR (eds), *Current research in African Earth Sciences*, pp. 9-12.
- 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.
- Nagasawa K. et Miyazaki S., 1975 - Mineralogical properties of halloysite as related to its genesis. *Proc. Int. Conf.*, pp. 257- 265.
- Nahon D., 1976 - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie structures relais et coexistences. Thèse d'Etat et Mém. Univ. Strasbourg, 232 p.
- Nahon D., 1991 - Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. John Wiley and Sons ed. New York, 297 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.
- Nedelec A., Nsifa E.N. et Martin H., 1990 - Major and trace element geochemistry of the Archaen Ntem complex (South Cameroon) : petrogenesis and crustal evolution Precambe. *Res.* 47, pp. 35-50.
- Ngo Bidjeck L.M., 2004 - L'altération des roches basiques et ultrabasiqes du Sud-ouest Cameroun et ses implications métallogéniques. Cas du complexe d'Abiéti-Yenjok. Thèse doct. Univ. Ydé I, 276 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. Univ. Yaoundé I, 165 p.
- 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. Ydé I, 218 p.
- Olivry J.C., 1986 - Fleuves et rivières du Cameroun. Coll. Monogr. Hydrol. ORSTOM 9 Paris, 733 p.
- Pedro G., 1966 - Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino - silicique). *C. R. Acad. Sci.*, 262, pp. 1828-1831.
- Pedro G. et Chauvel A., 1991 - Contributions of modern pedological analysis to the history of soils and landscapes. Application to the study of soils derived from the Continental Terminal in Casamance Sénégal. *Journal of African Earth Science*, vol. 12, n° 1/2, pp. 319-323.
- Regnault J.M., 1986 - Synthèse géologique du Cameroun. Minist. des Mines et de l'Energie Yaoundé, 119 p.
- Ségalen P., 1969 - Le remaniement des sols et la mise en place de la stone line en Afrique. *Cahiers Orstom série Pédologie* VII, pp. 105-127.
- Suchel, 1987 - les climats du Cameroun. Tome III. Thèse Univ. St. Etienne, 1186 p.
- Tardy Y., Bocquier G., Paquet H. et Millot G., 1973 - Formation of clay from granite and its distribution in relation to climate and topography. *Geoderma* 10, pp. 271-284.
- Tardy Y., 1993 - Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson Paris, 459 p.
- Tardy Y. et Roquin C., 1998 - Dérive des continents. Paléoclimats et altérations tropicales. BRGM Orléans France, 431 p.
- Tchameni R., 1997 - Géochimie et géochronologie des formations de l'archéen et du paléoproterozoïque du Sud Cameroun (Groupe du Ntem Craton du Congo). Thèse Doct. Univ. Orléans, 396 p.
- Tématio P., 1994 - Etude d'une toposéquence de sols sur gneiss dans l'écosystème forestier humide de Mvangan (Sud - Cameroun) : Différenciation de trois domaines de pédogenèse sur un interfluve. Thèse Doct. 3^e cycle Univ. Yaoundé I, 234 p.
- Thomas M.F., 1972 - Tropical Geomorphology. The Macmillan Press Ltd London, 332 pages.
- Thomas M.F., 1994 - Geomorphology in the Tropics. Wiley, 492 pages
- Trolard F., Bilong P., Guillet B. et Herbillon A.J., 1990 - Halloysite-kaolinite-gibbsite-boehmite : A thermodynamical modelisation of equilibria as function of water and dissolved silica activities. *Chemical geology*, pp. 294-297.
- 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.

