

Etude de sols ferrallitiques à caractères andiques sur trachytes en zone de montagne humide tropicale (Mont Bambouto - Ouest Cameroun)

O. Leumbe Leumbe⁽¹⁾, D. Bitom⁽²⁾, P. Tematio⁽³⁾, E. Temgoua⁽⁴⁾ et Y. Lucas⁽⁵⁾

- (1) Institut National de Cartographie (INC). BP. 157 Yaoundé, Cameroun.
- (2) Université de Yaoundé I, Département des Sciences de la Terre. BP. 812 Yaoundé, Cameroun.
- (3) Université de Dschang, Département des Sciences de la Terre. BP. 67 Dschang, Cameroun.
- (4) Université de Dschang, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles. BP. 222 Dschang, Cameroun.
- (5) Université de Toulon et du Var. BP. 20132 - 83957 La Garde Cedex, France.

RÉSUMÉ

Des Sols Serrallitiques à caractères andiques développés sur trachytes alcalins dans le massif des Bambouto (Ouest-Cameroun) ont été étudiés sur le plan morphologique, minéralogique et géochimique. Ces sols, localisés dans la partie médiane du massif, couvrent 20 à 25 % de la superficie totale de celui-ci. Ce sont des sols rouges, épais (12 m) et comportant deux principaux ensembles d'horizons, un ensemble d'altération (ou altérites), à structures lithologiques conservées uniquement à sa base, et un ensemble pédoturbé, ou sol au sens strict, à forte différenciation structurale, d'où se démarque un horizon humifère brun sombre et très poreux, à caractères andosoliques. On note un rapport d'épaisseur sol/altérites d'environ 1/5. Sur le plan microstructural, ces sols, partout totalement dépourvus de séparations plasmiques, sont caractérisés par des plasmas cristiques gibbsitiques notamment dans l'ensemble pédoturbé. Sur le plan minéralogique, la gibbsite domine largement ; elle est associée à un peu d'oxydes de fer (hématite et goéthite) et à de très petites quantités de kaolinite, d'hallowite et d'alophaane, ce dernier minéral n'étant détecté que dans l'horizon humifère. Sur le plan géochimique, l'aluminium est l'élément le plus abondant, avec la silice et le fer, et sa teneur augmente fortement de la base au sommet des profils aux dépens principalement de la silice. Parmi les autres spécificités des sols étudiés, on note leur très faible densité apparente (0,7 à 1) et leur texture variable, mais partout bien pourvue en limons, ces derniers étant associés tantôt aux sables au sommet et à la base des profils, tantôt aux argiles dans les parties médianes. Par ailleurs, sur un plan plus général, les sols étudiés apparaissent se distinguer par l'association en leur sein, à la fois de caractères ferrallitiques et de caractères andosoliques.

Mots clés

Montagne tropicale humide, Ouest-Cameroun, Monts Bambouto, sols ferrallitiques andiques, gibbsite, alophaane

SUMMARY**PETROLOGICAL STUDY OF ANDIC FERRALLITIC SOILS FORMED IN THE HUMID TROPICAL MOUNTAINS (Bambouto mountains – West Cameroon)**

Bambouto mountain located between 5°25' to 5°45' on latitude N and 10°00' to 10°15' on longitude E is one of the major volcanic mountains of the west Cameroon highlands (Tchoua, 1974; Youmen, 1994). Geomorphologically, the mountain is divided into three main domains (figure 1): an elevated zone situated above 2000 m, dominated by andosolic soils, a mid zone located between 1600 and 2000 m, with andic ferrallitic soils, and a low zone below 1600m, covered by typical ferrallitic soils (Tématio et al., 2004).

A morphostructural and petrological study has been carried out on andic ferrallitic soils of the mid zone. For this, pits have been dug in the field and carefully described, then soil samples collected for laboratory analyses. Those analyses concerned physico-chemistry (particle size, bulk density, organic carbon, total nitrogen and acidity), petrography on soil thin sections, mineralogy by X-Ray diffraction and geochemistry by X-fluorescence.

Studied soils cover 20 – 25 % of the total area of the Bambouto mountain and are developed on alkaline trachytes rock (table 2 and figure 2). They are red, thick (12 m) and comprise two main sets of horizons (figure 3): a set of weathering horizon (or alterites) (figure 4 and 5), in which lithologic structures are preserved at the base, but completely obliterated towards the top, and a soil unit sensus stricto characterised by a pronounced structural differentiation from the bottom to the top of the unit; at the upper part of this unit, one can observe a dark brown humiferous horizon, which is highly porous and dominated by andosolic properties. The thick ratio soil/alterite here is about 1/5, a value commonly found in ferrallitic soils. From a microstructural point of view, the studied soils are characterised by plasmas which structures are silasepic in the alterite (figure 6), but cristic and gibbsitic in the soil unit (figures 7 and 8), without any stress cutans.

The physico-chemical analyses show that the studied soils have a low bulk density (0.7 to 1) and their texture is characterised by a high amount of silt (table 1), usually associated either with clays in the middle portions of the profiles, or with sands in the upper and the lower ones (figures 9 and 10). One can also note that the studied soils are acidic (pH 5.2 – 6.1), rich in organic matter (5.64 % om) with an average C/N ratio (18.4 – 18.5) (table 1).

In the mineralogical point of view, gibbsite is the main constituent (figure 11 and table 3); small amounts of iron oxides (hematite and goethite) and minor quantities of kaolinite, halloysite (figure 12) and allophane are joined to it, allophane being detected only in the humiferous horizon. The geochemistry is dominated by aluminium, which is the most abundant element (table 1), with silica and iron; its concentration greatly increases from the bottom to the top of the profiles at the expense of silica (figures 13 and 14).

Over all, studied soils are remarkable because of combination of both ferrallitic and andosolic properties.

Key-words

Humid tropical mountain, West– Cameroon, Bambouto mountain, andic ferrallitic soil, gibbsite, allophane

RESUMEN**ESTUDIO DE LOS SUELOS FERRALITICOS ÁNDICOS SOBRE TRAQUITA EN ZONA DE MONTAÑA HÚMEDA TROPICAL (Bambouto mountains – Oeste Cameroon)**

Suelos ferrallíticos ándicos desarrollados sobre traquitas alcalinas en el macizo de los Bambouto (oeste de Camerún) fueron estudiados en el plano morfológico, mineralógico y geoquímica. Estos suelos, localizados en la parte media del macizo, cubren 20 a 25 % de la superficie total del dicho macizo. Son suelos rojos, espesos (12 m) y que comporten dos principales conjuntos de horizontes, un conjunto de alteración (o alteritas) con estructuras litológicas conservadas únicamente en su base, y un conjunto pedoturbado, o suelo en el sentido estricto, con fuerte diferenciación estructural, donde se marca un horizonte húmifero pardo oscuro y muy poroso, con características ándicas. Se nota un índice de espesor suelo/alterita de aproximadamente 1/5. En el plano microestructural, estos suelos, en todos lados, totalmente desprovistos de separaciones plásmicas, son caracterizados por plasmas crísticos gibbsíticos en particular en el conjunto pedoturbado. En el plano mineralógico, la gibbsite domina largamente; se asocia poco a los óxidos de hierro (hematita y goetita) y a muy pocas cantidades de kaolinita, de haloisita y de alofano, este último mineral se detecta únicamente en el horizonte húmifero. En el plano geoquímico, el aluminio es el elemento el más abundante, con el sílice y el hierro, y su contenido aumenta fuertemente de la base a la cumbre de los perfiles a las costas principalmente del sílice. Dentro de las otras especificaciones de los suelos estudiados, se nota su muy ligera densidad aparente (0,7 a 1) y su textura variable, pero siempre bien proporcionados en limos, estos últimos se asocian a veces a las arenas en la cumbre y en la base de los perfiles, a veces a las arcillas en las partes medianas. Por otra parte, en un plano más general, los suelos estudiados parecen distinguirse por el asociación en su seno a la vez de características ferralíticas y de características ándicas.

Palabras clave

Montaña tropical húmeda, oeste de Camerún, Macizo Bambouto, suelos ferralíticos ándicos, gibbsite, alofano.

Duchaufour (1977) définit les sols ferrallitiques andiques comme des sols résultant d'un triple processus évolutif : une minéralisation plus ou moins rapide de la matière organique, une argilogenèse limitée par suite du déficit accentué en silice (éliminée au cours de phases antérieures), et une cristallisation des hydroxydes en gibbsite et goéthite (ou hématite) qui deviennent les constituants minéraux essentiels du profil. Ces sols se développent sur matériaux volcaniques en régions tropicales humides et leur formation semble favorisée par l'existence d'une saison sèche (Duchaufour, 1977). Le critère d'appellation "andique" est variable selon les classifications, mais la plupart des auteurs s'accordent à définir le caractère andique par une faible densité apparente avant séchage, une teneur élevée en Al et Fe extractibles par l'oxalate d'ammonium (Al_{ox} et Fe_{ox} , respectivement) c'est-à-dire correspondant à des formes minérales amorphes ou des associations organo-minérales, une forte capacité de rétention des phosphates et une épaisseur suffisante de l'horizon andique. Pour la classification WRB (FAO, 1998) par exemple, le caractère andique est défini par la présence, sur une épaisseur d'au moins 30 cm, d'une densité apparente à un potentiel matriciel de -0,33 bars inférieure à 0,9, d'une teneur en argile supérieure ou égale à 10 % , d'une valeur ($Al_{ox} + 0,5 Fe_{ox}$) supérieure ou égale à 2 % de la fraction fine, d'une rétention de phosphate supérieure ou égale à 70 % , de moins de 10 % de verres volcaniques dans la fraction fine.

Les sols ferrallitiques andiques, qui représentent en général un stade intermédiaire dans les mégaséquences allant des Andosols, dans les zones hautes des massifs volcaniques, aux sols ferrallitiques, dans les zones basses, en milieu tropical (Duchaufour, 1977; Quantin, 1992), couvrent dans l'ensemble de très faibles superficies dans ces paysages ; et l'attention des chercheurs et des utilisateurs est de ce fait toujours restée focalisée sur les deux grands pôles que sont les Andosols et les Sols Ferrallitiques. La conséquence est que ces sols demeurent peu connus. Des travaux récents (Mpakam, 2000 ; Leumbe Leumbe, 2003 ; Tematio *et al.*, 2004) révèlent que les Sols Ferrallitiques à caractère andique marqué peuvent avoir une extension géographique considérable et constituer de véritables entités de sols. C'est le cas dans les monts Bambouto notamment, où Tematio *et al.* (2004) montrent que les Sols Ferrallitiques à caractère andique marqué occupent 20 à 25 % de la superficie totale du massif, soit plus de 200 km². Il apparaît dès lors nécessaire, compte tenu de l'importance des sols dans la vie des hommes, de mieux connaître ce type de sol sur les plans de leur organisation, de leur constitution et de leur fonctionnement, au même titre que les Andosols ou les Sols Ferrallitiques auxquels ils sont généralement associés dans les paysages.

La présente étude se propose donc de caractériser des sols intermédiaires entre Sols Ferrallitiques et Andosols formés sur trachyte dans le massif des Bambouto en région tropicale humide, d'un point de vue morphostructural, minéralogique et géochimique.

CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES ET METHODES D'ETUDE

Le milieu physique du massif des Bambouto

Le massif des Bambouto est situé dans la partie ouest du Cameroun, entre 5°25' et 5°45' de latitude Nord, et entre 10°00' et 10°15' de longitude Est (*figure 1*). Il constitue un énorme bouclier volcanique culminant à 2740 m d'altitude.

Sur le plan géomorphologique, 3 grandes zones aux conditions environnementales distinctes y sont notées ; ce sont : la zone haute, d'altitude supérieure à 2000 m, la zone moyenne, comprise entre 1600 et 2000 m d'altitude, et la zone basse, d'altitude comprise entre 1400 et 1600 m (Morin, 1988) (*figure 1*).

La zone haute présente un relief très accidenté. Le climat est très frais, avec des températures de 10 à 13°C, et les brumes et les brouillards sont très fréquents. La pluviométrie est élevée (2500 mm d'eau par an), avec des pluies de type orographique (Valet, 1985). La végétation est essentiellement constituée de pelouses associées à des forêts galeries en bordure des cours d'eau ; elle est localement anthropisée. Le réseau hydrographique est subparallèle, radiaire et dense. Les sols qui prédominent sont des Andosols selon la classification CPCS (CPCS, 1967) ou des Typical Dystrandets selon la classification USDA (Soil Survey Staff,) (Tématio et Olson, 1997 ; Tsozué, 2001 ; Fopoussi Tuebué, 2003; Tématio *et al.*, 2004).

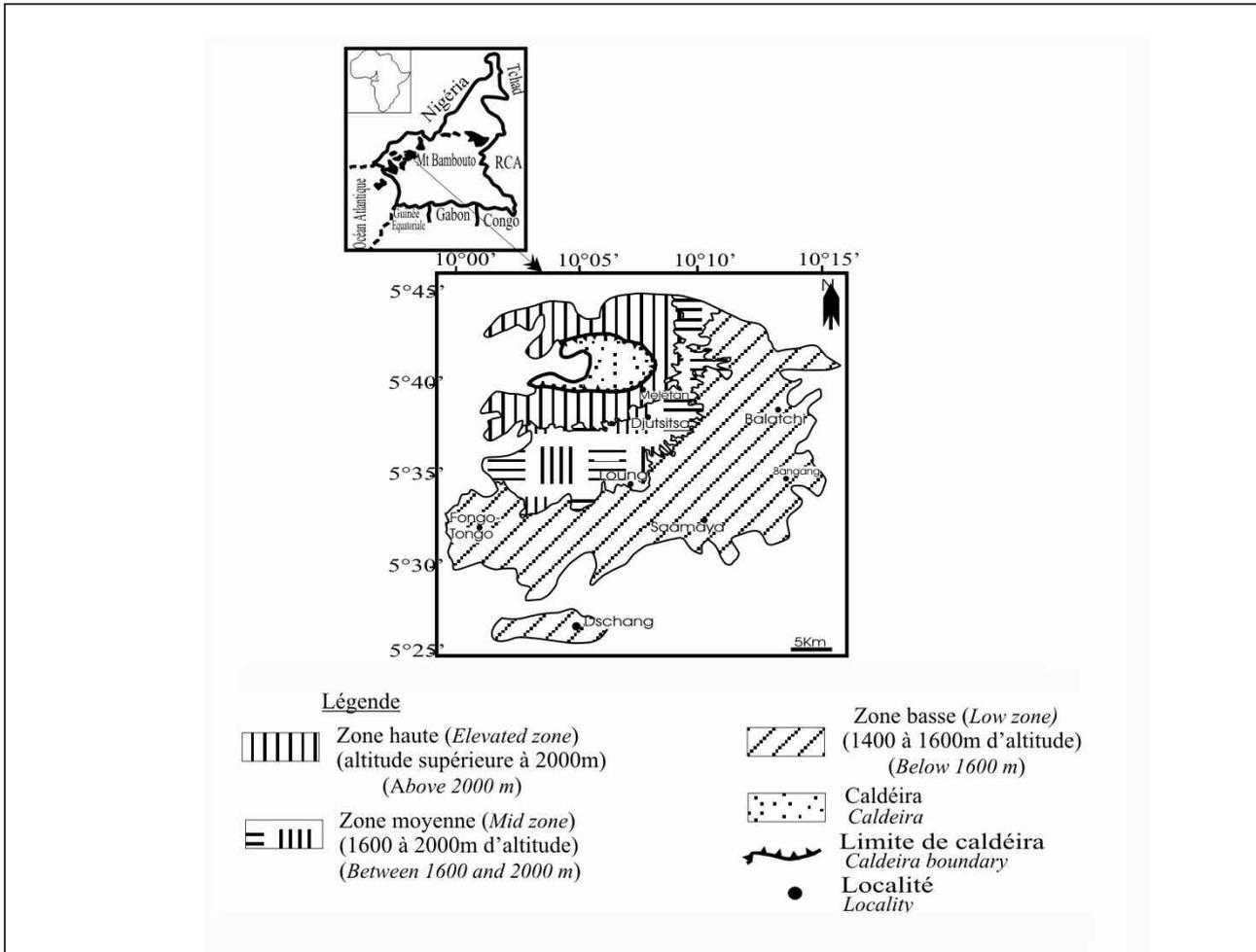
La zone moyenne présente un climat de type subéquatorial de montagne (Ngoufo, 1988), frais et humide, marqué par la présence d'une longue saison des pluies, de mars à novembre, et d'une courte saison sèche, de décembre à février. La température moyenne mensuelle oscille autour de 18°C et la pluviométrie moyenne annuelle est de 1690 mm. Le relief est moins accidenté que dans la zone haute, mais la végétation beaucoup plus anthropisée, avec par endroits dans les bas fonds, des reliques de forêts raphiales. Le réseau hydrographique est subdendritique. Les sols sont Ferrallitiques Andiques selon la classification CPCS ou des Oxid Dystrandets selon la classification USDA (Leumbe Leumbe, 2003 ; Tématio *et al.*, 2004).

La zone basse enfin présente un climat chaud et humide, caractérisé par une température moyenne mensuelle de 23,5°C et une pluviométrie moyenne annuelle de 1750 mm. Le relief est ondulé et la végétation apparaît très fortement anthropisée. Le réseau hydrographique est subdendritique. Les sols sont ferrallitiques cuirassés selon la classification CPCS ou des Haplohumox ou Kandihumox selon la classification USDA (Tématio et Olson, 1997 ; Tématio *et al.*, 2004).

Sur le plan géologique, les trachytes sont les roches les plus répandues (Tchoua, 1974 ; Youmen, 1994). Ils sont associés aux basaltes, ainsi qu'aux phonolites, rhyolites et produits de projections. Le massif repose sur un socle constitué de granite et de gneiss, que

Figure 1 - Le massif des Bambouto : localisation, configuration et grands traits géomorphologiques (d'après Morin, 1988)

Figure 1 - Location map, configuration and geomorphological organization of Bambouto mountain (Morin, 1988)



l'on observe dans la zone basse du massif (Tchoua, 1974 ; Youmen, 1994 ; Tématio et Olson, 1997).

Les sols étudiés ici sont localisés dans la zone moyenne du massif, et la roche mère est un trachyte daté Miocène (Tchoua, 1974 ; Youmen, 1994).

Les méthodes d'étude

Sur le terrain, sur la base de la carte des sols de Tématio *et al.* (2004), les Sols Ferrallitiques Andiques ont été repérés, puis soigneusement décrits au moyen de puits et de sondages à la tarière. Les descriptions ont également porté sur les nombreux affleurements de trachyte qui jonchent la surface du sol de la zone. Des échantillons de roches et de sols ont ensuite été prélevés pour analyses en laboratoire.

Au laboratoire, quatre principaux types d'analyses ont été effectués : des analyses pétrographiques, des analyses minéralogiques,

des analyses géochimiques et des analyses physico-chimiques.

Les analyses pétrographiques ont consisté en l'étude de lames minces de roches et de sols au microscope polarisant. Les lames minces de sols ont été confectionnées après imprégnation des échantillons à la résine et induration par séchage à l'air. Toutes les lames ont été taillées à l'atelier des lames minces du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I.

Les analyses minéralogiques et géochimiques, effectuées respectivement par diffractométrie de rayons X sur un appareil à anode en Cu et par fluorescence X, ont été faites sur des poudres totales de roches et de sols au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne en Suisse.

La granulométrie a été faite par la méthode de la pipette de Robinson, après dispersion à l'hexamétophosphate de sodium. Les densités réelle (D_r) et apparente (D_a) ont été déterminées respectivement par la méthode du pycnomètre et par la méthode à la paraffine. La porosité (P) a été déduite de ces deux valeurs par la

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés.**Table 1** - Physico-chemical characteristics of the studied soils.

Caractéristiques Horizons	Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	sable fin (%)	sable grossier (%)	Densité réelle (Dr)	Densité apparente (Da)	Porosité (%)	CO%	MO%	N%	C/N	pH _{eau}	pH _{KCl}	Δ pH
Horizon humifère (0 à 60 cm)	25,70	13,80	12,30	15,90	31,60	2,50	0,70	72,00	3,27	5,64	0,18	18,4	5,20	4,80	0,40
Horizon rouge polyédrique (60 à 100 cm)	45,28	10,47	12,50	12,20	19,95	2,50	0,80	68,00	1,24	2,13	0,07	18,5	6,10	6,00	0,10
Horizon rouge microagrégé (160 à 230 cm)	49,30	29,84	8,50	5,75	6,40	2,50	0,80	68,00							
Allotérite rouge orangé (230 à 660 cm)	40,52	30,89	20,15	3,65	7,60	2,60	1,00	61,50							
Isaltérite bariolée (660 à 850 cm)						2,60	1,00	61,50							
Isaltérite gris blanchâtre (850 à 1200cm)	20,22	13,24	20,32	8,95	37,45	2,60	1,50	42,30							
Roche							2,40								

formule : $P = (Dr - Da / Dr) \times 100$. Le carbone organique (CO) a été dosé par la méthode de Walkey et Black après minéralisation par oxydation au bichromate de potassium et à l'acide sulfurique concentré; le taux de matière organique (MO) est alors déduit en posant : $\% MO = 1,74 \times \% CO$. L'azote total a été dosé à l'acide sulfurique après minéralisation par oxydation dans un digesteur. Le pH_{eau} est mesuré à l'aide d'un pH-mètre, sur un mélange sol/eau de 1/2,5 et le pH_{KCl} sur un mélange eau/KCl de 1/1.

Les mesures de Al_{ox} et Fe_{ox} ont été réalisées par ICP-AES au CEREGE (Aix en Provence) sur extraits réalisés au laboratoire PROTEE (Université du Sud Toulon-Var) par la méthode de l'USDA (1992).

La granulométrie et les mesures de densités ont été réalisées au laboratoire des Sciences du Sol de l'Université de Yaoundé I, tandis que les déterminations du carbone organique, de l'azote et du pH ont été effectuées au laboratoire de l'IIITA (International Institute for Tropical Agriculture) de Yaoundé (Nkolbisson).

PÉTROGRAPHIE, MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE DE LA ROCHE

La roche est un trachyte gris clair, dur et dense (Da = 2,4) (tableau 1), très finement cristallisé.

Au microscope, elle présente une texture microlitique porphyrique (figure 2), avec de nombreux phénocristaux de sanidine, des cli-

nopyroxènes (augite) et des minéraux opaques, le tout noyé dans une mésostase (40 à 45 %) constituée essentiellement de microlites de sanidine (figure 2). Les phénocristaux de sanidine constituent 40 à 50 % du volume de la roche ; ils se présentent sous forme de baguettes allongées, de 0,75 mm à 1 mm de long pour 0,15 mm à 0,25 mm de large en moyenne. Les augites et les minéraux opaques représentent respectivement près de 5 % du volume de la roche ; ce sont soit des cristaux globulaires ou plus ou moins allongés de diamètre moyen 200 à 300 μm pour les augites, soit de petits cristaux amiboïdes ou ovoïdes de diamètre moyen 75 à 100 μm pour les minéraux opaques. Phénocristaux et microlites sont orientés et confèrent une structure de type fluidal à la roche (figure 2).

L'analyse par diffractométrie des rayons X confirme la prédominance de la sanidine, de même que la présence des pyroxènes et des minéraux opaques, ici l'ilménite et la magnétite (figure 9). Elle révèle de plus la présence d'un peu de cristobalite et d'anatase dans la roche (figure 11).

Sur le plan géochimique, la roche est très riche en silice (62,50 % SiO₂) et en alumine (16,50 % Al₂O₃) (tableau 2). Elle contient également du fer (5,62 % Fe₂O₃) et surtout des éléments alcalins, K (6,29 % K₂O) et Na (6,25 % Na₂O), ce qui lui vaut d'être rangée parmi les trachytes alcalins (Le Maître, 1989). Les autres éléments, Ti, Mg, Ca, Mn ou P sont très faiblement représentés et leurs teneurs n'atteignent guère 1 % (tableau 2).

Tableau 2 - Composition chimique des matériaux étudiés (en % d'oxydes).**Table 2** - Chemical composition of the studied soils (in oxide percentage).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Pf	Total
Horizon humifère	22,00	32,00	13,20	2,03	0,20	0,33	0,73	0,00	0,09	0,29	28,60	99,49
Glébules	7,53	46,80	16,20	1,25	0,01	0,06	0,01	0,00	0,13	0,18	27,60	99,77
Horizon rouge microagrégé	11,40	40,90	19,30	1,84	0,06	0,07	0,02	0,00	0,18	0,12	25,70	99,59
Allotérite rouge orangé	16,70	39,00	17,40	1,93	0,07	0,09	0,03	0,00	0,11	0,07	24,20	99,60
Isaltérite bariolée	24,90	28,10	23,20	1,01	0,08	0,00	0,03	0,00	0,52	0,06	21,70	99,60
Isaltérite gris blanchâtre	47,80	25,00	8,40	0,87	2,71	0,18	0,27	2,80	0,21	0,13	11,20	99,57
Roche	62,50	16,50	5,62	0,73	6,29	0,30	0,54	6,25	0,27	0,09	0,49	99,58

CARACTÉRISTIQUES MORPHOSTRUCTURALES ET PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

Caractérisation morphostructurale

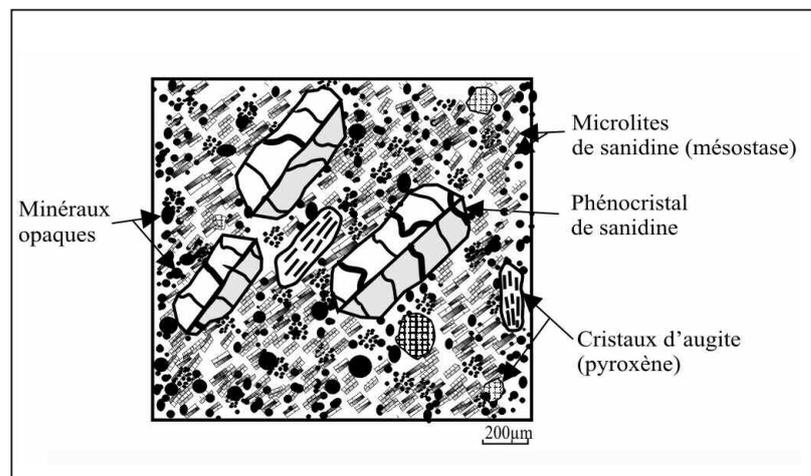
Analyse macroscopique

Les sols ferrallitiques andiques des monts Bambouto sont caractérisés par des profils de plus de 12 m d'épaisseur (pouvant descendre jusqu'à 6 m sur les versants), subdivisés en 7 horizons, qui sont, de bas en haut (figure 3) :

850 à plus de 1200 cm. Isaltérite gris blanchâtre (10YR8/3), à ponctuations micrométriques polychromes (roses à brunes) et à aspect saccharoïde de la roche conservé, tendre, limoneuse et poreuse. Présence de diaclases aux épontes rubéfiées et de pédotubules de 2 à 3mm de diamètre, remplis d'une terre fine jaune rougeâtre (5YR6/8), argileuse (figure 4).

660-850 cm. Isaltérite bariolée caractérisée par la juxtaposition de domaines centimétriques jaune-pâle (2,5YR8/3) à brun-jaune (2,5Y7/4), rouge-violacé (10R3/6), gris blanchâtre (10YR8/3), rouge-orangé (2,5YR6/8), et de volumes blanchâtres (5Y8/1).

- Les domaines jaune-pâle à brun-jaune constituent 35 à 40 % du volume de l'horizon. Ils sont limoneux et poreux. Leurs formes sont quelconques et leurs contours diffus.

Figure 2 - Organisation microscopique de la roche (trachyte)**Figure 2** - Microscopic organization of the trachyte rock

- Les domaines rouge-violacé (20 à 25 % du volume de l'horizon) ont des formes allongées ou amiboïdes. Ils sont également limoneux et poreux.

- Les domaines gris blanchâtre (20 % du volume de l'horizon) sont identiques au matériau de l'horizon sous-jacent.

- Les domaines rouge-orangé (5 % du volume de l'horizon) sont limono-argileux et peu poreux, et leurs formes sont quelconques.

- Les volumes blanchâtres (10 % du volume de l'horizon) sont ovoïdes, d'aspect homogène, limoneux et faiblement indurés.

On note que les domaines jaune-pâle à brun-jaune, rouge-violacé et gris blanchâtre conservent l'aspect saccharoïde de la roche, de même que les diaclases, contrairement aux domaines rouge-orangé où ces textures et structures lithologiques ne sont plus observées.

L'horizon est parcouru de pédotubules identiques à ceux de l'isaltérite gris blanchâtre sous-jacente.

230-660 cm. Allotérite rouge-orangé (2,5YR6/8), limono-argileuse et poreuse, embal-

Figures 3-4-5 - Organisation macroscopique [3] du profil étudié, [4] de l'isalterite bariolée, [5] de l'isalterite gris blanchâtre
 Figures 3-4-5 - Sketch of the studied profil [3], the grey whitish isalterite [4], the variegated isalterite [5]

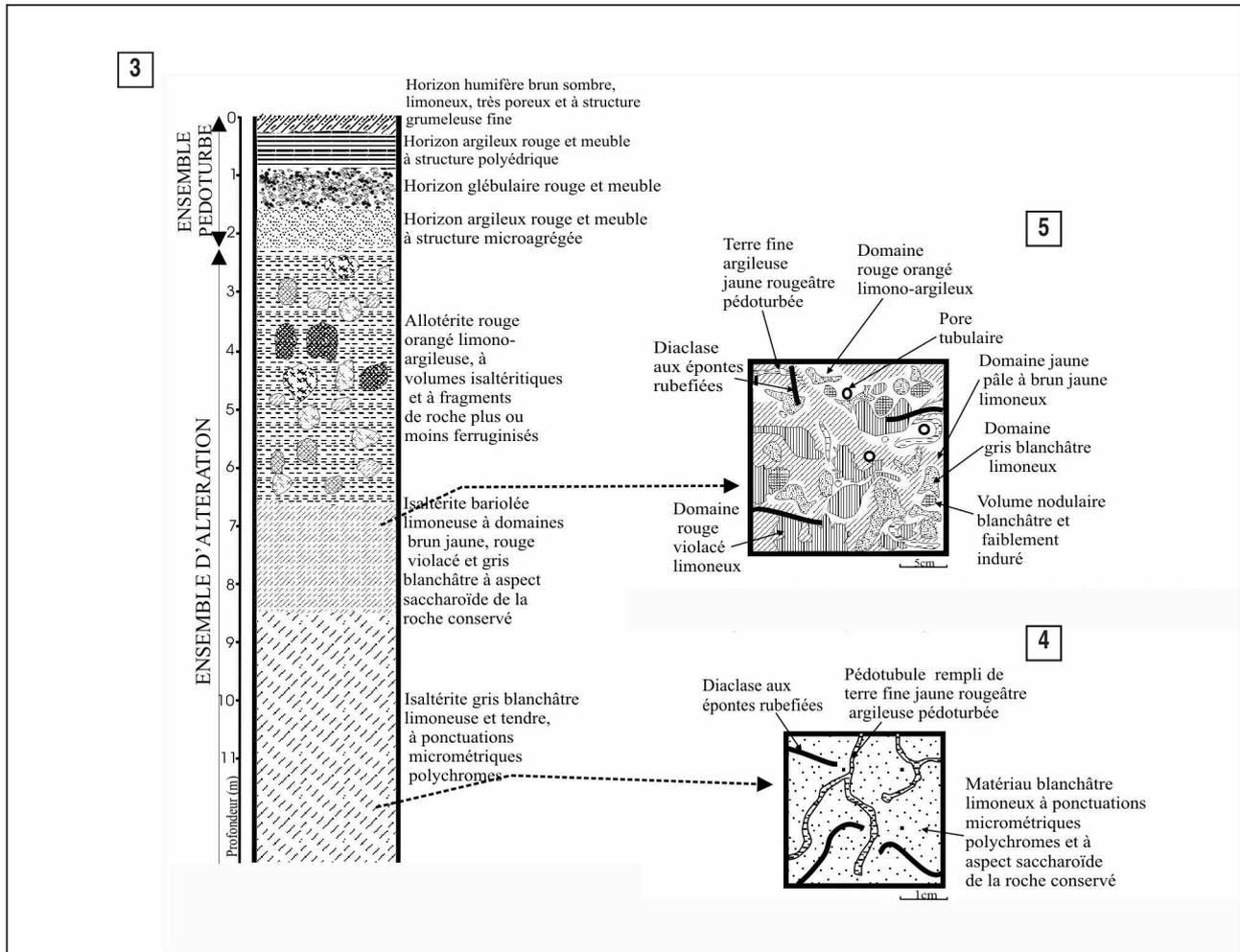


Figure 6 - Organisation microscopique de l'isalterite gris blanchâtre
 Figure 6 - Microscopic organization of the grey whitish isalterite

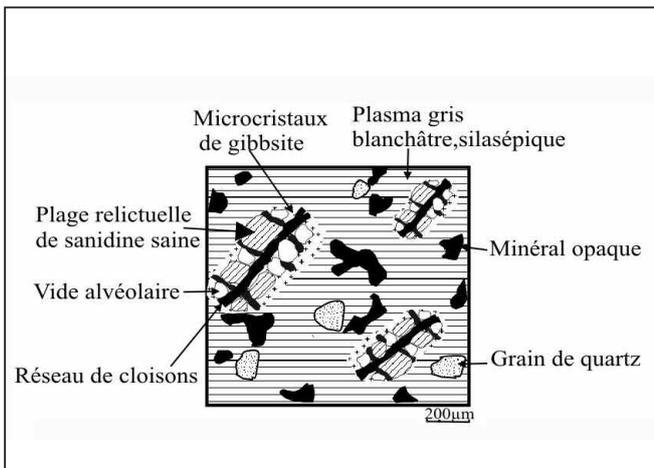


Figure 7 - Organisation microscopique de l'allotérite
 Figure 7 - Microscopic organization of the allotérite

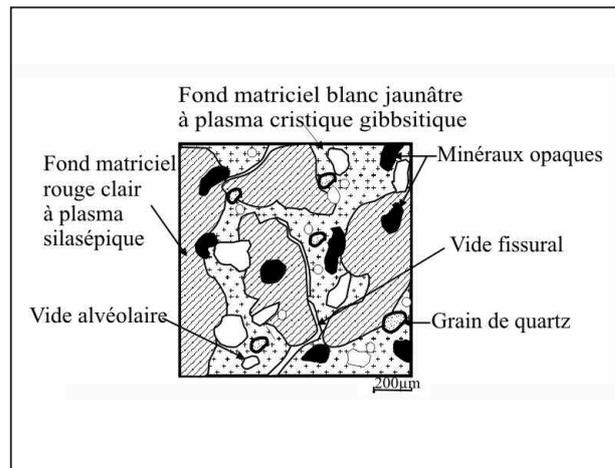
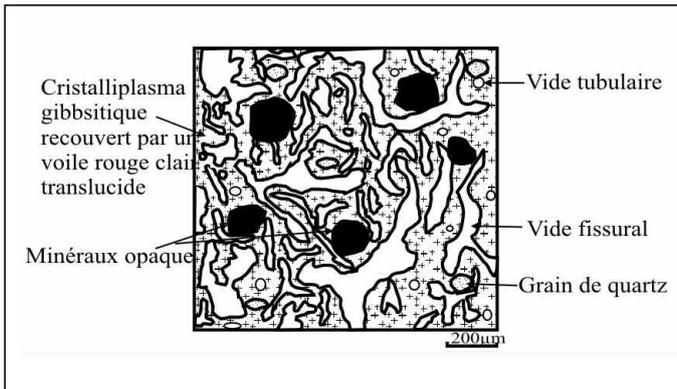


Figure 8 - Organisation microscopique de l'horizon rouge polyédrique
Figure 8 - Microscopic organization of the red polyedric horizon



lant des éléments grossiers faiblement indurés et de dimensions centimétriques, représentant 20 à 25 % de l'horizon, notamment des fragments de roche ferruginisés, des volumes isaltéritiques relictuels et des volumes nodulaires blanchâtres. Au sommet de l'horizon, la proportion et la taille des éléments grossiers diminuent.

160-230 cm. Horizon rouge (10R4/6) et meuble, à structure microagrégée et à texture argileuse, poreux et fragile, à éclats se désagrégant très facilement par pression entre les doigts.

100-160 cm. Horizon glébulaire, constitué d'une terre fine identique à celle de l'horizon sous jacent emballant de nombreux glébules (75 % du volume de l'horizon) ; ce sont soit des cailloux rouge jaunâtre à violacé, de 2 à 5 cm de diamètre moyen, ovoïdes ou aplatis, denses et très indurés, soit des cailloux brun jaunâtre, de 1 à 2 cm de diamètre, de formes quelconques, denses et très indurés également, soit des nodules brun sombre, de 0,3 à 0,8 cm de diamètre, très denses et très indurés. On note que les cailloux rouge jaunâtre et brun jaunâtre représentent 80 à 85 % de l'ensemble des glébules.

60-100 cm. Horizon rouge (10R4/6) et meuble, à structure polyédrique

fine, à texture argileuse, poreux et fragile ; présence de quelques glébules à sa base.

0-60 cm. Horizon humifère, brun sombre (10YR3/4), limoneux, structure grumeleuse fine avec des agrégats légers, très poreux, très friables, très fragiles. Matériau glissant à l'état humide et pulvérulent à l'état sec. Présence de nombreuses racines formant localement un chevelu racinaire.

Soit au total, des sols constitués de deux grands ensembles d'horizons : un ensemble d'horizons altéritiques (ou ensemble d'altération), très épais (de l'ordre de 10 m), regroupant les horizons isaltéritiques et allotéritique des parties inférieures et médianes des profils, et un ensemble d'horizons pédoturbés (ou ensemble pédoturbé), d'environ 2,30 m d'épaisseur, regroupant tous les horizons de la partie supérieure des profils (figure 3).

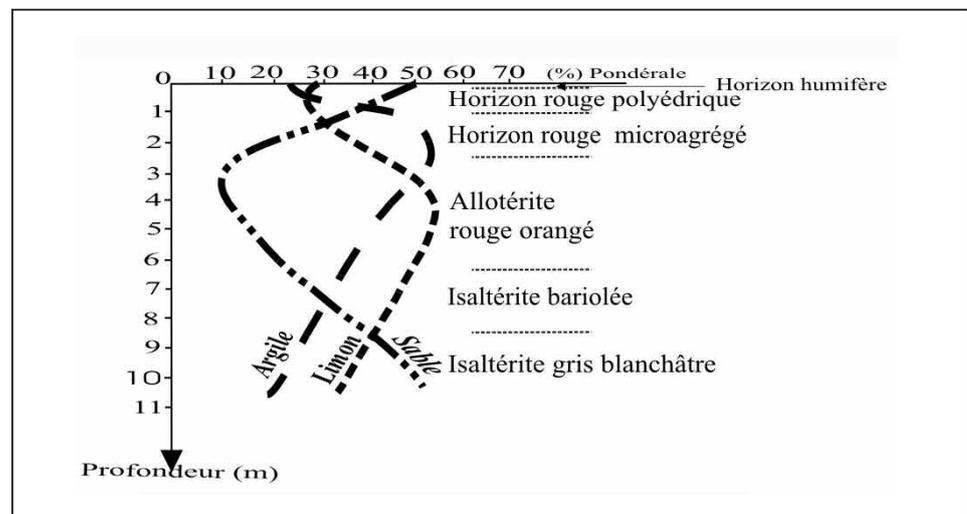
Analyse microscopique

L'analyse microscopique a été effectuée dans les niveaux isaltéritiques à la base, allotéritique médian et pédoturbés supérieurs. Des lames minces ont ainsi été taillées dans l'isaltérite gris blanchâtre, dans l'allotérite rouge orangé et dans l'horizon rouge polyédrique (figure 3).

L'isaltérite gris blanchâtre présente un fond matriciel caractérisé par un plasma abondant (55 % du fond matriciel), faiblement biréfringent et à structure silasépique, entourant complètement un squelette (35 % du fond matriciel) constitué de phénocristaux de sanidine, de minéraux opaques et de grains de quartz (figure 6). Les phénocristaux de sanidine représentent 40 à 50 % de l'ensemble du squelette ; ils sont entièrement ou partiellement pseudomorphosés par des microcristaux de gibbsite disposés le long de cloisons délimitant des vides alvéolaires ou entourant de petites reliques de sanidine saine (figure 6). Les

Figure 9 - Evolution verticale des fractions granulométriques

Figure 9 - Vertical evolution of the particles size



minéraux opaques (45 % du squelette) sont amiboïdes ou aciculaires, denses et trapus, et leurs tailles sont comprises entre 100 et 250 μm . Les grains de quartz sont subanguleux et leurs tailles varient entre 100 et 300 μm (*figure 6*).

Les vides constituent environ 10 % du fond matriciel ; ce sont principalement des vides alvéolaires de dissolution des sanidines. Leur diamètre est de 150 à 175 μm en moyenne.

L'allotérite rouge orangé montre 2 fonds matriciels à contours diffus : un blanc jaunâtre et un rouge clair (*figure 7*).

Le fond matriciel rouge clair (55 % de l'ensemble de l'horizon) comporte un plasma rouge clair abondant (55 % du fond matriciel), peu dense, faiblement biréfringent et silasépique, un squelette (35 % du fond matriciel) constitué de minéraux opaques et de grains de quartz, et des vides principalement de type fissural.

Le fond matriciel blanc jaunâtre présente un plasma jaunâtre, un squelette (20 à 25 %) à minéraux opaques, quartz et fragments de phénocristaux de sanidine pseudomorphosés, et des vides (15 à 20 %) de type alvéolaire ou fissural. Le plasma jaunâtre est composé de microcristaux de gibbsite très biréfringents, qui lui confèrent une structure plasmique de type cristique (Brewer, 1964) (*figure 7*).

On note que dans les deux fonds matriciels, les plasmas rouge clair et jaunâtre entourent complètement les grains du squelette et forment donc avec ces derniers, des assemblages de type porphyroscelique (Brewer, 1964).

Enfin, l'examen au microscope polarisant de l'horizon rouge polyédrique révèle un fond matriciel à plasma rouge abondant (55 % du fond matriciel) entourant complètement un squelette (15 %) composé de minéraux opaques et de quartz, et à vides abondants (30 %), principalement des vides tubulaires et des vides d'entassement des agrégats. On note en particulier que le plasma est entièrement cristique, formé de microcristaux de gibbsite (*figure 8*), partiellement recouverts par un voile ferrugineux rouge clair qui atténue leur biréfringence.

La généralisation des plasmas cristiques gibbsitiques au sein des matériaux pédoturbés constitue un des traits micromorphologiques majeurs des sols étudiés.

Analyses physico-chimiques

Granulométrie

Les analyses montrent que les sols étudiés ont une composition granulométrique variable le long des profils (*tableau 1, figures 9 et 10*).

Les fractions « sable » et « argile » sont les plus variables et présentent un comportement antagoniste (*figure 9*). Ainsi, à la base des sols (horizons isaltéritiques) et au sommet (horizon humifère), on note les taux de sable les plus élevés (45 et 50 %) concomitamment aux taux d'argile les plus faibles (20 à 25 %) (*tableau 1 et figure 9*), tandis que dans toute la partie médiane des profils, on observe les taux d'argile les plus élevés (40 à 50 %), mais les taux les plus faibles en sable (11 à 30 %) (*tableau 1 et figure 9*). Les teneurs en limon

sont sensiblement plus constantes et toujours assez élevées, variant entre 25 et 50 % (*tableau 1 et figure 9*).

Tout ceci caractérise donc des sols partout bien pourvus en limon, avec cependant une granulométrie à tendance tantôt plus fine (argileuse) dans la partie médiane, tantôt plus grossière (sableuse) à la base et au sommet des profils (*figure 10*). Précisons qu'à la base des sols, cette fraction sableuse est composée essentiellement de fragments de sanidine plus ou moins altérée, tandis qu'au sommet, il s'agit de grains de quartz.

Densité apparente (D_a), densité réelle (D_r), porosité.

La densité apparente de la roche est de 2,4 (*tableau 1*). Dès la base des sols, dans l'isaltérite gris blanchâtre, elle chute à 1,5, puis à 1,0 dans l'isaltérite bariolée et dans l'allotérite rouge orangé au sommet de l'ensemble d'altération (*tableau 1*) ; au dessus, dans tout l'ensemble pédoturbé, la D_a est inférieure à l'unité avec un minimum de 0,62 atteint dans l'horizon humifère superficiel (*tableau 1*).

Parallèlement, la D_r reste presque constante et élevée tout le long des profils, variant entre 2,5 et 2,6 (*tableau 1*), d'où une porosité globalement très élevée, variant entre 42 et 61 % dans l'ensemble d'altération, et entre 68 et 72 % dans l'ensemble pédoturbé (*tableau 1*).

Matière organique, azote et C/N.

Les sols étudiés sont assez riches en matière organique, avec des teneurs de 5,64 % MO dans l'horizon humifère et se maintenant à plus de 2 % vers 1 m de profondeur (*tableau 1*). Les teneurs en azote quant à elles sont moyennes à basses, variant entre 0,18 % en surface et 0,07 % à 1 m de profondeur (*tableau 1*), tandis que les rapports C/N demeurent relativement bas, compris entre 18,4 et 18,5 (*tableau 1*).

Acidité

Les sols étudiés sont acides en surface (pH=5,2), mais un peu moins en profondeur (pH=6,1) (*tableau 1*). Quant au ΔpH , il est partout inférieur à 1 (*tableau 1*), ce qui révèle l'absence d'une acidité d'échange (Ségalen, 1973 ; Duchaufour, 1977).

CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DES SOLS

Données minéralogiques

Les diffractogrammes des rayons X obtenus (*figure 11*) montrent que :

- les principaux minéraux de la roche, sanidine, pyroxène, voire cristobalite disparaissent très vite dès la base de l'ensemble d'altération (*figure 11 et tableau 3*). Seuls les minéraux opaques, magnétite, ilménite, ou lourds, anatase, par ailleurs accessoires, se maintiennent tout le long des profils (*figure 11 et tableau 3*) ;

Figure 10 - Détermination des classes texturales des différents horizons au moyen du diagramme de Jamagne (1976)

Figure 10 - Soils textural classes with reference to Jamagne diagram (1976)

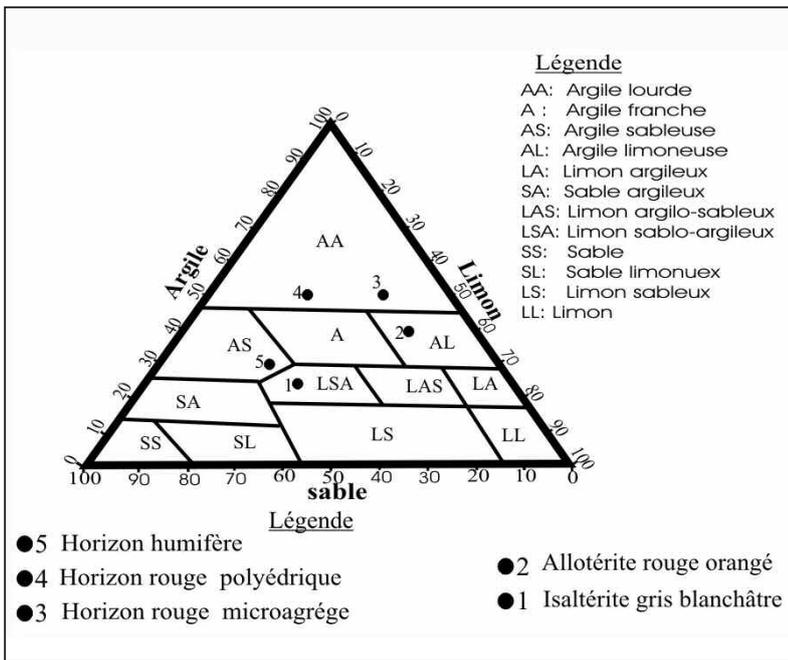
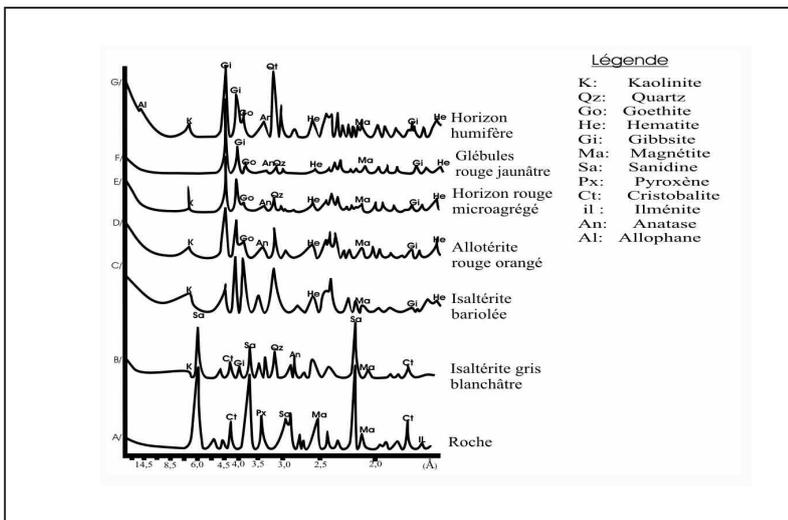


Figure 11 - Diffractogrammes des rayons X des sols étudiés

Figure 11 - Studied soils X-rays diffractograms



- l'ensemble d'altération est constitué en proportions presque équivalentes de gibbsite, de goéthite et d'hématite (figure 11 et tableau 3), tandis que dans l'ensemble pédoturbé au dessus, la gibbsite prédomine largement (figure 11 et tableau 3) ;

- la kaolinite est présente tout le long des profils, mais en quantités toujours très faibles (figure 11 et tableau 3) ;

- le quartz, absent dans la roche, apparaît à la base des sols, probablement aux dépens de la cristobalite, et se maintient jusque dans l'horizon humifère, où ses proportions les plus importantes sont observées (figure 11 et tableau 3) ;

- enfin, l'allophane n'apparaît que dans l'horizon humifère, et en petites quantités (figure 11 et tableau 3).

Par ailleurs, un examen minutieux du pic principal de la kaolinite à 7,15 Å révèle une forte dissymétrie de ce dernier, caractéristique de l'halloysite (figure 12) (Lietard, 1977 ; Bonnin et al., 1982 ; Cases et al., 1982).

Caractéristiques géochimiques

Sur le plan géochimique, les sols étudiés montrent une forte diminution de la silice, quand on passe de la roche à l'isaltérite gris blanchâtre à la base des sols (de 62,50 à 47,80 % SiO_2) (tableau 2) ; cette diminution est concomitante à une augmentation de l'aluminium et du fer (de 16,50 à 25,00 % Al_2O_3 et de 5,62 à 8,40 % Fe_2O_3), à une forte diminution du potassium et du sodium (de 6,29 à 2,71 % K_2O et de 6,25 à 2,80 % Na_2O) et à une évacuation quasi-totale du magnésium et du calcium (tableau 2). Sur le diagramme SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , ceci se traduit par un net éloignement des points du pôle siliceux (figure 13). De l'isaltérite gris blanchâtre jusqu'au sommet des sols, les matériaux sont de plus en plus alumineux (de 25,00 à 40,90 % Al_2O_3) et de moins en moins siliceux (de 47,80 à 11,40 % SiO_2), avec des teneurs en fer qui restent comprises entre 17,40 et 23,20 % Fe_2O_3 à partir de l'isaltérite bariolée. Cette tendance s'inverse uniquement dans l'horizon humifère superficiel où, tout en restant à dominance alumineuse, les sols semblent subir une nette resilicification (tableau 2 et figure 13). On signale que les matériaux indu-rés de l'horizon glébulaire (cailloux rouge-jau-nâtre) sont les plus alumineux (46,80 % Al_2O_3) et les moins siliceux (7,53 % SiO_2) de tous les matériaux des sols étudiés, avec des teneurs en fer de l'ordre de 16,20 % Fe_2O_3 (tableau 2).

En outre, l'examen, élément par élément, révèle que :

- l'aluminium est l'élément constitutif le plus abondant dans les sols étudiés (sauf dans l'isaltérite gris blanchâtre), en compagnie du silicium et du fer (tableau 2) et son comportement est rigoureusement opposé à celui du silicium, sa

teneur augmentant quand celle du silicium diminue, et vice-versa (figure 14) ;

- le fer lui se distingue par une courbe d'évolution en dents de scie (figure 13). On note toutefois que dans l'ensemble pédoturbé, son comportement devient identique à celui de l'aluminium (figure 14) ;

- les bases, Na, K et surtout Mg et Ca, sont rapidement et quasi totalement évacuées dès la base des sols. Seule la fine couche sub-superficielle des sols (horizon humifère), directement concernée par les cycles biogéochimiques des éléments, présente à nouveau de petites quantités d'éléments alcalins (0,20 % K₂O pour le K) et alcalino-terreux (0,33 % MgO pour le Mg et surtout 0,73 % CaO pour le Ca) (tableau 2) ;

- le titane est partout présent en petites quantités, avec une teneur qui augmente de la roche au sommet de l'ensemble d'altération (de 0,73 à 1,90 % TiO₂), puis se stabilise entre 1,85 et 2 % TiO₂ dans l'ensemble pédoturbé (tableau 2 et figure 14) ;

- enfin, le manganèse est également présent, mais en faibles quantités (0,1 à 0,5 % MnO) (tableau 2), et son comportement est rigoureusement calqué sur celui du fer (figure 14).

Les données d'aluminium et fer extractibles à l'oxalate d'ammonium permettent de calculer la somme (Al_{ox} + 0,5 Fe_{ox}), égale à 1,9 % de la fraction fine à 20 cm, 1,3 à 40 cm et 0,2 à 120 cm.

La comparaison des caractéristiques des horizons humifères de ces sols avec ceux des Andosols d'altitude et des Sols Ferrallitiques de la zone basse est présentée dans le tableau 4. Elle permet de

constater que les sols étudiés se situent dans une position intermédiaire entre les Andosols sur trachytes de la zone d'altitude et les Sols Ferrallitiques de la zone basse.

Figure 12- Diffractogramme des rayons X de l'ensemble d'altération: vue agrandie du pic de la kaolinite à 7,15 Å dont la dissymétrie est caractéristique de l'halloysite (Liétard, 1977; Bonnin *et al.*, 1982; Cases *et al.*, 1982; Bocquier *et al.*, 1983)

Figure 12 - X-rays diffractograms of the weathering horizons : enlarged view of kaolinite pick at 7,15 Å, whom dissymetry is characteristic of halloysite (Liétard, 1977; Bonnin *et al.*, 1982; Cases *et al.*, 1982; Bocquier *et al.*, 1983)

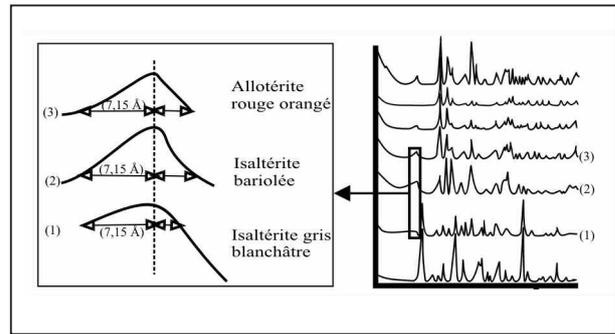


Tableau 3 - Composition minéralogique semi-quantitative de la roche et des sols étudiés (la taille des lettres est proportionnelle à la quantité relative du minéral considéré).

Table 3 - Semi-quantitative mineralogical composition of the studied soils (the letter's size is proportional to the relative abundance of the considered mineral).

	Minéralogie									
	Qz	An	Ma	K	Gi	Go	He	Al		
Horizon humifère										
Horizon polyédrique										
Horizon microagrégé										
Allotérite rouge orangé										
Isaltérite bariolée										
Isaltérite gris blanchâtre	Sa		ct							
Roche	Sa	Px	ct	ll						Ma

Tableau 4 - Comparaison des horizons humifères des sols en séquence altitudinale. Données provenant partiellement de Tematio *et al.*, 2004.

Table 4 - Comparison of humiferous horizons in altitudinal sequence. Data from Tematio *et al.*, 2004.

	Epaisseur	Densité apparente (Da)	MO %	CEC brute	CEC des argiles	Al _{ox} +0,5Fe _{ox}
Andosols (zone d'altitude)	72	0,55	16,15	34,82	15,65	5,6
Sols ferrallitiques andiques (zone médiane)	62	0,62	5,64	12,82	2,56	1,6
Sols ferrallitiques (zone basse)	13	0,80	2,32	5,51	2,34	-

DISCUSSION

La morphologie des sols étudiés montre deux grands ensembles d'horizons, de puissances très inégales, un ensemble d'altération (ou altérites) épais de plus de 10 m, surmonté par un ensemble pédoturbé (ou sol au sens strict) d'épaisseur plus modeste, 2,30 m, soit un rapport sol/altérites de l'ordre de 1/5. Cette très forte disproportion d'épaisseur entre ces deux principaux ensembles est un des traits morphologiques les plus marquants des sols étudiés. De telles disproportions sont fréquentes dans

Figure 13 - Variation de la composition chimique des matériaux dans le diagramme triangulaire $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Figure 13 - $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ triangular diagram of the studied soils

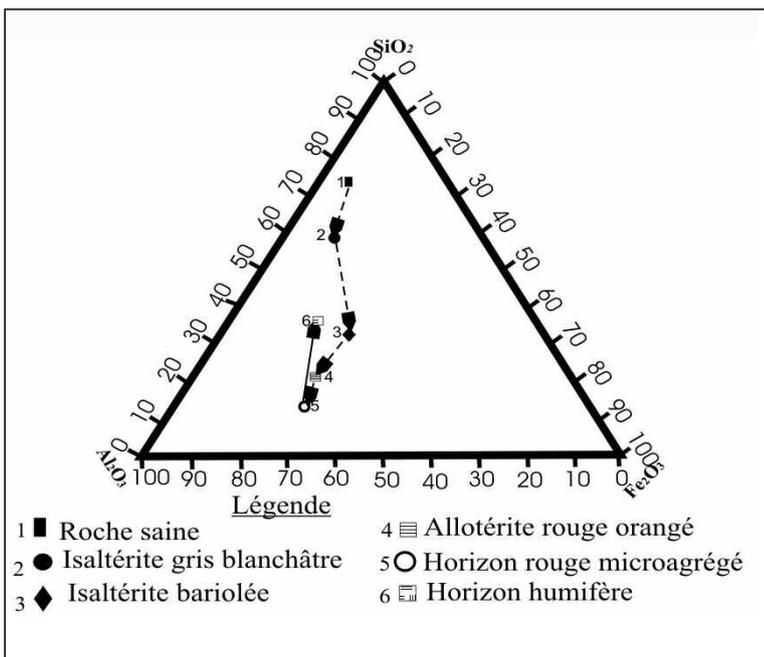
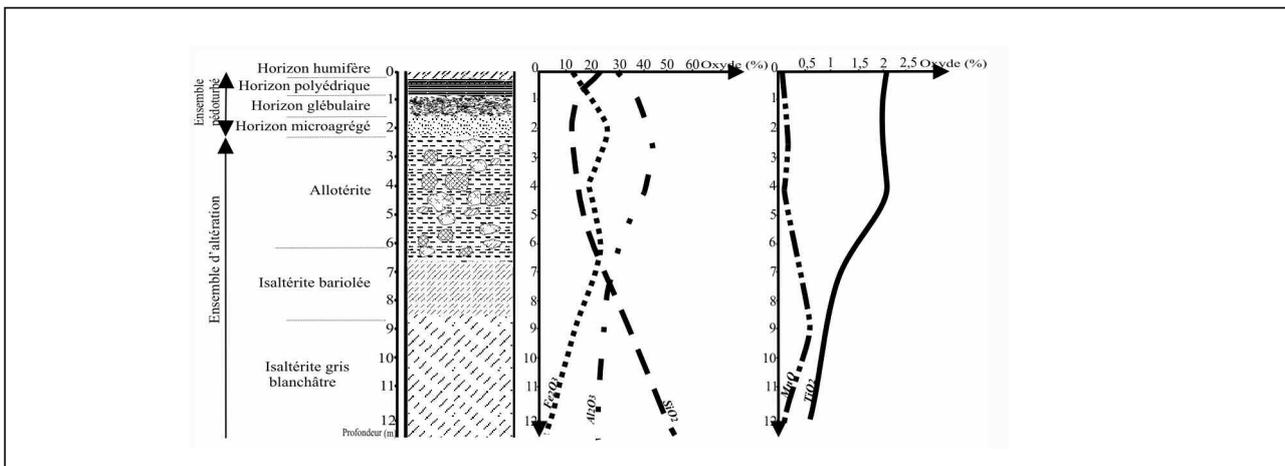


Figure 14 - Evolution des teneurs en $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-TiO}_2$ des matériaux le long du profil

Figure 14 - Vertical evolution of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-TiO}_2$ contents along the profile



les sols des régions chaudes et humides, comme les Sols Ferrallitiques, où l'altération est généralement très intense (Chatelin, 1974 ; Muller, 1987 ; Bitom, 1988 ; Tardy, 1993 ; Lucas *et al.*, 1996), mais rares dans les sols des régions tempérées à altération plus ménagée, où le sol sens strict est souvent plus épais que les altérites (Strakhov, 1967 ; Tardy, 1993).

L'ensemble d'altération à la base des sols se distingue par une parfaite conservation des textures et des structures lithologiques dans sa partie inférieure, qualifiée de ce fait d'isaltérite (Chatelin, 1974), mais par une perte progressive de celles-ci dans la partie supérieure, ou allotérite (Chatelin, 1974). Une telle succession verticale isaltérite-allotérite est très fréquente dans les sols bien drainés des régions chaudes et humides (Chatelin, 1974 ; Muller, 1987 ; Bitom, 1988). L'observation microscopique, qui précise que les minéraux de la roche, notamment les sanidines, s'altèrent essentiellement par pseudomorphose, permet de relier d'après Delvigne (1965), Boulangé (1984) et Tardy (1993), le caractère isaltéritique de la partie inférieure des profils à ces transformations pseudomorphiques, souvent fréquentes également à la base des sols ferrallitiques (Delvigne, 1965 ; Chatelin, 1974 ; Bitom, 1988 ; Tardy, 1993). Sur les plans géochimique et minéralogique, ces pseudomorphoses sont associées ici à une élimination totale, d'abord des alcalino-terreux (Ca, Mg), puis des alcalins (Na, K), à une élimination partielle de la silice, mais à une accumulation d'aluminium et de fer, principalement sous forme de gibbsite et d'oxydes de fer (goéthite, hématite). L'analyse granulométrique de l'ensemble d'al-

tération révèle des matériaux de texture grossière (sablo-limoneuse) à la base, avec une fraction sableuse alimentée principalement par des fragments de sanidine plus ou moins pseudomorphosée, puis de texture plus fine (limono-argileuse) dans l'allotérite. Cette texture à dominance de limons est en accord avec la structure silasépique (Brewer, 1964 ; Bennema *et al.*, 1970) de l'allotérite, telle qu'observée au microscope polarisant.

Dans la partie supérieure des sols, l'ensemble pédoturbé, qui représente seulement 1/5 du profil, se distingue par sa couleur rouge, sa texture argileuse à argilo-limoneuse, sa forte porosité et sa faible densité apparente, partout inférieure à l'unité (0,7 à 0,8). Cet ensemble reste toutefois assez fortement différencié sur le plan structural, subdivisé en un horizon microagrégé, un horizon glébulaire, un horizon polyédrique et un horizon humifère épais. Les horizons glébulaire, polyédrique et microagrégé sont couramment rencontrés dans les Sols Ferrallitiques Rouges (Delvigne, 1965 ; Muller, 1987 ; Bitom, 1988). Par contre, de par ses propriétés morphostructurales et analytiques, l'horizon humifère superficiel se démarque assez nettement. Il est en effet très sombre, limoneux, glissant à l'état humide et pulvérulent à l'état sec, avec une structure grumeleuse très fortement exprimée. De plus, il est particulièrement léger ($D_a = 0,62$), présente un taux de matière organique de 5,64 %, et un rapport C/N (18,5) nettement supérieurs à ceux couramment notés dans les Sols Ferrallitiques (CPCS, 1967 ; Duchaufour, 1977 ; Angue Abane, 1988). Autant de propriétés qui sont plus typiques des sols andosoliques (Colmet-Daage *et al.*, 1973 ; Rosello, 1984 ; Quantin, 1992 ; Tematio *et al.*, 2004). Enfin, la valeur du rapport ($Al_{ox} + 0,5 Fe_{ox}$) est proche de la valeur limite caractéristique des horizons diagnostiques andiques selon le WRB, et on y voit apparaître des allophanes.

Sur le plan micromorphologique, l'ensemble pédoturbé se distingue par l'absence de séparations plasmiques et par la généralisation des plasmas cristiques gibbsitiques. Ce dernier point se traduit sur le plan minéralogique, par la très nette prédominance de la gibbsite sur les oxydes de fer (goethite et hématite) et sur la kaolinite, beaucoup plus faiblement représentés. La présence majoritaire de la gibbsite dans ces sols rouges les rapproche des ferrallites, tels que définis par Duchaufour (1977) et traduit l'insuffisance de la silice (moins de 11,5 % SiO_2 pour environ 41 % Al_2O_3 dans l'horizon microagrégé) dans ce type de sols (Tercinier, 1971). Concernant les séparations plasmiques, qui sont des cutanes de contrainte se formant suite à la réorientation des minéraux phylliteux des plasmas sous l'effet des cycles humectation-dessiccation (Brewer, 1964 ; Bennema *et al.*, 1970), leur absence dans l'ensemble pédoturbé est à relier avec la nature non phylliteuse du constituant essentiel de leurs plasmas, en l'occurrence la gibbsite ; elle ne traduit donc pas l'absence de contraintes hydriques dans les sols étudiés.

Enfin, si on se réfère aux trois processus d'évolution essentiels des Sols Ferrallitiques Andiques suggérés par Duchaufour (1977), la présente étude confirme l'argilogenèse limitée et la cristallisation majoritairement de gibbsite, voire de goethite et d'hématite, dans ce type de sols ; en revanche, aucune analyse n'a été faite concernant

le troisième processus d'évolution, c'est-à-dire sur la vitesse de minéralisation de la matière organique.

CONCLUSION

Les Sols Ferrallitiques Andiques étudiés sont formés sur un trachyte alcalin d'âge miocène, en zone de montagne humide tropicale. Ils sont rouges et épais (jusqu'à 12 m), très légers (D_a 0,7 à 1) et poreux, à profil constitué d'un ensemble d'altération (ou altérites), à structures lithologiques conservées uniquement à sa base, surmonté par un ensemble pédoturbé, ou sol au sens strict, à forte différenciation structurale. On note ici un rapport d'épaisseur sol/altérites très spécifique, de l'ordre de 1/5. Sur le plan micromorphologique, ces sols sont caractérisés dans l'ensemble d'altération, par des transformations minérales essentiellement de type pseudomorphique à la base de l'ensemble, et qui garantissent à ce matériau un caractère isaltérique (Chatelin, 1974), tandis que dans l'ensemble pédoturbé, on retiendra principalement l'absence de cutanes de contrainte (séparations plasmiques) au sein des plasmas, en relation avec la nature cristique gibbsitique de ces derniers. La nature quasi exclusivement gibbsitique de ces plasmas rapproche fortement les matériaux étudiés des ferrallites définis par Duchaufour (1977).

Sur le plan textural, les limons sont partout bien représentés, associés tantôt aux sables à la base et au sommet des profils, tantôt aux argiles dans la partie médiane.

La composition minéralogique est largement dominée par la gibbsite, associée à un peu d'oxydes de fer (hématite et goethite). Halloysite dans l'ensemble d'altération et kaolinite dans l'ensemble pédoturbé, associée à de petites quantités d'allophane dans l'horizon humifère, complètent cette paragenèse minérale. Sur le plan géochimique, l'aluminium domine nettement sur le fer et surtout sur le silicium.

Enfin, les sols étudiés sont remarquables par la présence dans leur partie superficielle, d'un horizon humifère épais, sombre, riche en matière organique et à C/N élevé, à valeur du rapport ($Al_{ox} + 0,5 Fe_{ox}$) proche de 2, soit un horizon aux caractères fortement andosoliques. Ils correspondent bien à de parfaits intergrades compréhensibles au sens d'un référentiel «flou» selon la réflexion de Duchaufour (1998).

En définitive, les sols étudiés se distinguent par la présence en leur sein de caractères à la fois ferrallitiques et de caractères andosoliques, ce qui nous permet de leur attribuer le qualificatif double de Sols « Ferrallitiques Andiques ».

BIBLIOGRAPHIE

- Angue Abane M., 1988 - Biodynamique des humus et cycles biogéochimiques des éléments dans des sites forestiers et des sites cultivés en cacaoyère du Centre-Sud Cameroun (région d'Akongo). Thèse Doct, Univ. Nancy I, 189 pages.
- Bennema J., Jongéris A et Lemos R.C. , 1970 - Micromorphology of some oxic and argilic horizons in south Brazil in relation to weathering sequence. *Geoderma*, 4, - pp. 333 - 355
- Bitom D., 1988 - Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun). Genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse Doct, Univ. Poitiers, 164 pages.
- Bonnin D., Muller S. et Callas G., 1982 - Le fer dans les kaolins. Etude par spectrométrie RPE, Mössbauer, EXAFS. *Bull. Minér.*, 105, pp. 467-475
- Boulangé B., 1984 - Les formations latéritiques de Côte-d'Ivoire : les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. *Trav. et Doc. ORSTOM*, 175, 362 pages.
- Brewer R., 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, 470 pages.
- Cases J.M., Liétard O., Yvon J. et Delon J.F., 1982 - Etude des propriétés cristallochimiques, morphologiques superficielles de kaolinites désordonnées. *Bull. Minér.*, 105, pp. 439-455
- Chatelin Y., 1974 - Les sols ferrallitiques. Tome 3. L'altération. *Init. Doc. Tech. ORSTOM*, 144 pages.
- C.P.C.S., 1967 - Classification des sols. E.N.S.A, Grignon, 87 pages.
- Colmet-Daage F. et Gautheyrou J., 1973 - Etude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des antilles et d'Amérique Latine, *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol. Vol. XI*, pp. 97-120
- Delvigne J., 1965 - Pédogenèse en milieu tropical, la formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. Thèse Doct. ès-sciences, Fac. Sc, Paris, 177 pages.
- Duchaufour Ph., 1977 - Pédologie : pédogenèse et classification. *Doc. 2ème éd.*, Masson, Paris, 491 pages.
- Duchaufour Ph., 1998 - Réflexion sur les classifications des sols. *Etude et gestion des sols*, 5,3: pp. 201-205
- FAO, 1993 - World reference base for soil resources. *World Soil Resources Report 84*, Rome: FAO, ISRIC and ISSS.
- Leumbe Leumbe O., 2003 - Etude pétrographique, minéralogique et géochimique d'un sol ferrallitique sur trachyte de la zone moyenne du versant sud des monts Bambouto. *Mém. DEA en sc. de la Terre, Univ. Yaoundé I*, 93 pages.
- Lietard O., 1977 - Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse d'Etat, *Inst. Nat. Polytech. de Lorraine, Nancy*, 321 pages.
- Lucas Y., Nahon D., Cornu S. et Eyrolle F., 1996 - Genèse et fonctionnement des sols en milieu équatorial. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, Ser. IIA t. 322, sér. IIA, pp. 1-16
- Mpakam H. G., 2000 - Typologie et cartographie des sols de la zone d'altitude du versant sud des monts Bambouto. *Mém. Maîtrise en sc. de la Terre, Univ. Dschang*, 80 pages.
- Morin S., 1988 - Les dissymétries fondamentales des Hautes terres de l'Ouest-Cameroun et leurs conséquences sur l'occupation humaine. Exemple des monts Bambouto. *L'homme et la montagne tropicale. Sep. Ed.*, Univ. Yaoundé, pp. 35 - 56
- Muller J. P., 1987- Analyse pétrologique d'une formation latéritique meuble du Cameroun. Essai de traçage d'une différenciation par les paragenèses minérales secondaires. Thèse Doct. ès-Sciences, Univ. Paris VII, 188 pages.
- Ngofo R., 1988 - Les monts Bambouto, environnement et utilisation de l'espace. Thèse 3^e cycle, Univ. Yaoundé, Vol 1 et 2, 274 pages.
- Quantin P., 1992 - Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. *Coll. Etudes et thèses, ORSTOM*, 498 pages.
- Rosello V., 1984 - Caractérisation minéralogique et microstructurale des matériaux andosoliques. Reconnaissances expérimentales de leur comportement. Thèse Doct. univ, Paris VII, 194 pages.
- Segalen P., 1973 - L'aluminium dans les sols. *Init. Doc. Tech., ORSTOM, Paris*, 22, 281 pages.
- Soil Survey Staff, 1975 - Soil Taxonomy. Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agricultural Handbook n° 436. Soil Conservation Service, U.S.D.A, Washington*, 754 pages.
- Strakhov N.M., 1967 - Principles of lithogenesis. Oliver and Boyd, London, Vol. 1, 212 pages.
- Tardy Y., 1993 - Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Ed. Masson, Paris, 459 pages.
- Tchoua F., 1974 - Contribution à l'étude géologique et pétrographique de quelques volcans de la ligne du Cameroun (mont Manengoumba et mont Cameroun). Thèse Doct. ès Sc., Univ. Clermont Ferrand, 247 pages.
- Tematio P. et Olson K.R., 1997 - Impacts of industrialised agriculture on land in Bafou, Cameroon. *Journal of soil and water conservation*, pp. 403 - 407
- Tematio P., Kengni L., Bitom D., Hodson M.E., Fopoussi J.C., Leumbe O., Mpakam H.G. et Tsozué D., 2004 - Soils and their distribution on Bambouto volcanic mountain, West Cameroon Highland, Central Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 39, pp. 447 - 457
- Tercinier G., 1971 - Contribution à la connaissance des phénomènes de bauxitisation et d'allitisation. Les sols de karst d'atolls surélevés du Sud-ouest pacifique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3, 307 - 334 pp.
- USDA, 1992 - Soil Survey Laboratory Methods Manual. *USDA-SCS Soil Surv. Invest. Rep. n° 42, v. 2. U. S. Govt. Print. Office, Washington, D. C.*
- Valet S., 1985 - Notices explicatives des cartes du climat, des paysages agro-géologiques et des propositions d'aptitude à la mise en valeur des paysages agro-géologiques de l'Ouest-Cameroun au 1/200 000. *CIRAT-IRAT, Montpellier*, 120 pages.
- Youmen D., 1994 - Evolution volcanique, pétrographique et temporelle de la caldeira des monts Bambouto (Cameroun). Thèse Doct. ès Sc., Univ. Kiel, 273 pages.