

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES GROUPES DE SOLS DÉRIVÉS DE ROCHES VOLCANIQUES AUX ANTILLES FRANÇAISES.

par

F. COLMET-DAAGE* et P. LAGACHE **

avec la collaboration de J. de Crécy**, J. et M. Gautheyrou***, et M. de Lannoy****

Équipe de la carte des sols au 1/20 000 des Départements de
la Martinique et de la Guadeloupe (ORSTOM)

PLAN DU MEMOIRE

1 - INTRODUCTION

2 - LES SOLS FERRALLITIQUES

2.1 - Caractéristiques générales

Facteurs de formation, morphologie

Minéralogie, caractères physiques et chimiques

2.2 - Subdivisions

2.2.1 - Les sols très profonds, discussion

2.2.2 - Les sols des zones montagneuses très humides, discussion

2.2.3 - Les sols faiblement ferrallitiques

3 - LES FERRISOLS ET LES INTERGRADES FERRISOLS-VERTISOLS

3.1 - Introduction

3.2 - Les ferrisols à horizons B compacts

3.2.1 - Caractéristiques générales

Facteurs de formation, morphologie

Minéralogie, caractères physiques et chimiques

3.2.2 - Subdivisions

Quelques sous-groupes, discussion

* Directeur de recherches de l'O.R.S.T.O.M.

** De la S.O.G.R.E.A.H.

*** Chimistes de l'O.R.S.T.O.M.

**** De la S.C.E.T.

} Bureau des Sols des Antilles

- 3.3 - Les intergrades ferrisols-vertisols
 - 3.3.1 - Caractéristiques générales
 - 3.3.2 - Subdivisions
- 3.4 - Quelques cas particuliers
 - 3.4.1 - Les sols limoneux à altération montmorillonitique
 - 3.4.2 - Sols rouges montmorillonitiques, intergrades ferrisols-vertisols
 - 3.4.3 - Sols bruns ferrisoliques de pente à hydromorphie, intergrades ferrisols-vertisols
- 4 - LES VERTISOLS LITHOMORPHES
 - 4.1 - Caractéristiques générales
 - Facteurs de formation, morphologie
 - Minéralogie, caractères physiques et chimiques
 - 4.2 - Les subdivisions
 - 4.2.1 - Vertisols à structure large dès la surface
 - 4.2.2 - Vertisols et parvertisols à structure fine de surface
 - 4.2.3 - Discussion
- 5 - LES SOLS A ALLOPHANES OU "ANDEPTS"
 - 5.1 - Caractéristiques générales
 - Facteurs de formation, morphologie
 - Minéralogie, caractères physiques et chimiques
 - 5.2 - Les subdivisions
 - 5.2.1 - Classification pédogénétique
 - 5.2.2 - Classification de terrain
 - 5.2.2.1 - Les sols à allophanes
 - 5.2.2.2 - Les sols peu évolués AC à texture particulière sur cendres et ponces allophaniques.
 - 5.2.3 - Discussion
- 6 - LES SOLS BRUNS ET BRUN-ROUILLE A METAHALLOYSITE ET HALLOYSITE SUR FORMATIONS VOLCANIQUES PERMEABLES
 - 6.1 - Caractéristiques générales
 - Facteurs de formation, morphologie
 - Minéralogie, caractères physiques et chimiques
 - 6.2 - Subdivisions
 - 6.2.1 - L'orthotype
 - 6.2.2 - Les intergrades climatiques vers les sols à allophanes
 - 6.2.3 - Les sols bruns ou sols peu évolués de zones sèches
 - 6.2.4 - Les intergrades vers les sols ferrallitiques
 - 6.3 - Discussion
- 7 - CONCLUSION
- 8 - BIBLIOGRAPHIE

1 - INTRODUCTION

Les Antilles françaises sont situées entre le 14ème et le 16ème parallèle nord et font partie de l'arc volcanique Caraïbe.

Sur un socle de base antémioène se sont épanchées toute une série de formations volcaniques plus récentes, les dernières en date remontant à quelques dizaines d'années. Il s'agit souvent de projections aériennes andési-labradoriques donnant des tufs légers, des cendres et des ponces, ou des brèches. Les coulées sont moins fréquentes.

Certains matériaux volcaniques déposés en mer puis exondés, forment des tufs lités avec parfois des intercalations de bancs coquilliers. Des formations de calcaires coralliens d'âge burdigalien sont venus se superposer au soubassement volcanique. Leur étendue est très réduite en Martinique, mais leur extension est très importante à la Guadeloupe.

Le relief est accidenté. Aux édifices anciens plus ou moins démantelés sont venus s'ajouter les importants massifs encore en activité de la Soufrière en Guadeloupe et de la Montagne Pelée en Martinique, qui culminent vers 1 400 m.

Le climat est tropical humide. Si l'influence marine maintient une humidité permanente de l'air, par contre, la direction constante des vents et le relief tourmenté provoquent de nombreux micro-climats et des variations très importantes à de faibles distances de la pluviosité et de l'intensité ou de la durée de la saison sèche. La pluviométrie annuelle peut passer ainsi de 600 mm avec une saison sèche très prononcée dans les régions basses au vent ou sous le vent des montagnes, à plus de 5 m dans les hauteurs exposées aux vents dominants. Au dessus de 800 m, l'ennuage très fréquent limite l'insolation et maintient une humidité permanente. Les sommets de plus de 1 000 m sont rarement découverts.

La diversité des climats et des matériaux originels rend l'étude des phénomènes d'altération et d'évolution des sols particulièrement intéressante.

On trouve des sols issus de matériaux analogues, mais évoluant sous des **climats très variés** : pluviométrie annuelle de 0,6 m à 3 ou 5 m avec des saisons sèches marquées ou à peine sensibles.

On rencontre aussi, sous un même climat, des sols issus de **matériaux de composition minéralogique analogue mais d'âge différent**. Des dépôts aériens ont très souvent recouvert des sols en cours d'évolution ou même très évolués, issus d'éruptions plus anciennes. Ces recouvrements affectant des surfaces limitées ou ayant par endroits disparu, il est donc possible de trouver en superposition ou côte à côte des sols ayant atteint des stades différents d'évolution.

Sous un même climat, des matériaux de composition minéralogique et chimique voisine peuvent se présenter sous des **textures très différentes** : cendres grossières, ponces, brèches, tufs très divers, coulées. La perméabilité plus ou moins grande de la roche-mère peut modifier fortement les processus d'évolution ou d'altération.

L'établissement de cartes détaillées au vingt-millième a nécessité l'examen systématique de plusieurs milliers de profils et permis de mieux comprendre la répartition géographique et topographique des différents sols.

La classification adoptée s'efforce de tenir compte le plus possible à la fois du type d'altération argileuse et d'évolution de cette fraction argileuse dans le profil. Elle rend logique la cartographie, les séquences de sols ou les complexes et limite le nombre des types de sols principaux. Elle permet de tenir compte, pour chaque type de sol, aussi bien des données de laboratoire, que des caractères observables sur le terrain.

Précisons que les types d'altération ne sont envisagés que s'ils intéressent une fraction importante de l'épaisseur du profil. Nous n'avons pas étudié les phénomènes d'altération au contact immédiat des minéraux primaires.

Les analyses plus complètes, en cours d'achèvement, ainsi que des examens plus poussés des fractions argileuses et sableuses, permettront d'apporter des précisions importantes et probablement aussi quelques corrections.

Les analyses chimiques ont pour la plupart été effectuées au Laboratoire du Bureau des Sols des Antilles (O.R.S.T.O.M.) dirigé par M. GAUTHEYROU. D'autres ont été faites en France par les laboratoires des sols de l'O.R.S.T.O.M. (P. PELLOUX) ou de la S.O.G.R.E.A.H. (S. TOUJAN). Les mesures de pF ont été faites par le laboratoire de Physique des sols dirigé par A. COMBEAU (1), les déterminations des argiles par Mlle G. FUSIL et M. KOUKOU (1), sous la direction de M. PINTA (1) et les examens de sable par Mme DELAUNE au laboratoire de Géologie que dirige M. DEFOSSEZ (1).

(1) S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy.

On examinera successivement les sols suivants :

- les sols ferrallitiques (latosols) ;
- les ferrisols des régions humides et les intergrades vers les vertisols ;
- les vertisols.

C'est approximativement la séquence climatique des sols issus de roches-mères **anciennes** (labradorites, andésites, dacites). Ils résultent en général de phénomènes d'altération et d'évolution durant de longues périodes sur des matériaux originels **peu perméables**

Puis :

- les sols à allophanes ;
- les sols brun rouille à halloysite (sols bruns, sols bruns ferrisoliques, ferrisols bruns).

C'est approximativement la séquence climatique des sols issus de projections volcaniques **récentes** (labradorites, andésites, dacites). Les phénomènes d'altération et d'évolution n'ont pu se produire que dans des périodes courtes ou très courtes sur des matériaux **très perméables**

2 - LES SOLS FERRALLITIQUES

- Sous-classe des sols à hydroxydes fortement individualisés
- Groupe des sols ferrallitiques à horizons B friables.

2.1 - Caractéristiques générales

a - FACTEURS DE FORMATION

Climat

- Il s'agit d'un climat chaud et humide à saison sèche réduite. La pluviométrie annuelle varie entre 1 700 et 4 000 mm. Les précipitations tombent surtout en sept mois et il y a rarement plus de deux mois sans pluies. La température moyenne mensuelle est de l'ordre de 25° avec minima de 22° et maxima de 28°. L'influence marine limite les écarts de températures journaliers et saisonniers. L'hygroscopie ne descend pas en dessous de 60%.

Roche-mère - Géomorphologie

- Il s'agit généralement de projections épaisses probablement andési-labradoritiques et parfois dacitiques du complexe de base.

Le modelé consiste soit en larges piémonts aux pentes faibles, peu érodés, formant des plateaux séparés par des ravins. C'est le cas des régions de pluviométrie moyenne. Les sols sont en général très profonds. Il peut s'agir aussi de versants très accidentés des montagnes, dans des régions très humides où les sols sont constamment rajeunis par l'érosion.

b - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Les caractères du profil type sont les suivants :

Horizon A

Cet horizon étant généralement remanié par les labours ou l'érosion ne peut être systématiquement pris en considération. Il est argileux mais friable avec des agrégats à tendance anguleuse; sous couvert forestier et en forte pente, il est de couleur foncée, et peu épais : 10 à 15 cm.

Horizon B

L'épaisseur est de un ou plusieurs mètres, sans sous-horizons nettement différenciés.

La texture est argileuse à très argileuse. Le sol est ni plastique ni adhérent. La teneur en argile est, sur le terrain, sous-estimée par rapport à celle trouvée à l'analyse.

La structure d'ensemble est diffuse ; la sous-structure polyédrique fine. Le sol se fragmente aisément, surtout en profondeur en petits agrégats très anguleux. La perméabilité est bonne.

La luisance des éléments de la structure et des agrégats est faible. Il y aurait peu ou pas de revêtements.

Il n'y a pas de **débris d'altération**.

La couleur varie du jaune 5 YR à rouge 2,5 YR - 10 R dans les teintes vives et reste identique sur échantillons secs ou humides, que les agrégats soient ou non écrasés entre les doigts. Les diverses couleurs ne semblent pas se rattacher à des caractères physico-chimiques particuliers.

Horizon C

Son épaisseur peut atteindre plusieurs mètres. La consistance est friable, de couleur très variée, bigarrée par les débris altérés.

c - CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

L'argile est du type kaolinique. Il peut s'agir de kaolinites bien cristallisées, mais très souvent, aussi, de mélange de kaolinites et de métahalloysites (raies à 7,23 - 7,3 Å et raies vers 4,41 Å aussi intenses) ou peut-être de fire-clay.

La goëthite est toujours abondante donnant des crochets bien marqués à l'analyse thermique différentielle. La teneur en fer libre est voisine de 10 à 12 % du sol et égale à 75 % de celle du fer total (en Fe₂O₃ pour 100 g de terre).

La gibbsite peut être absente ou exister en faibles quantités. Certains faciès en renferment des teneurs très importantes. Le rapport SiO₂/Al₂O₃ du sol ou de la fraction argileuse est compris le plus souvent entre 1,7 et 2.

Les sables contiennent peu de minéraux altérables. Ce sont souvent des quartz, ou des débris de concrétions ferromanganiques. Tous les minéraux lourds de la fraction supérieure à 50 microns sont opaques : magnétite, ilménite. On ne rencontre pratiquement plus d'hypersthène, de hornblende, etc.. Quelques zircons témoigneraient de l'origine partielle très ancienne de ces formations.

d - CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

A basse altitude, la teneur en matière organique est voisine de 2 à 3 % dans l'horizon labouré et diminue rapidement en profondeur dans le profil. Le C/N est voisin de 9 à 10. En altitude, les teneurs en matières organiques peuvent atteindre 10 % en surface et encore 1 à 2 % vers un mètre de profondeur.

La teneur en argile oscille entre 60 et 80 % et demeure très uniforme dans tout l'horizon B. Elle ne décroît en profondeur que dans l'horizon C, riche en débris d'altération. L'horizon labouré

de surface a des teneurs d'environ 20 % plus faibles probablement par suite de l'enrichissement en sables par l'érosion. La teneur en limon (2-20 microns) ne dépasse guère 4 à 6 %. L'analyse mécanique est assez délicate. La désagrégation des petits pseudo-sables exige souvent l'emploi de procédés mécaniques. Les agrégats restent stables à l'eau, mais sont détruits par prétraitements au benzène, sauf dans l'horizon organique de surface.

La somme des bases échangeables est inférieure à 10 méq/100 g de sol. Elle est toujours plus élevée en surface en sol vierge et généralement aussi en sol cultivé et décroît en profondeur. Elle peut être faible dans les régions très humides dans l'horizon de surface comme en profondeur.

La capacité totale d'échange est comprise entre 12 et 20 méq/100 g de sol (soit 15 à 25 méq calculé en % d'argile) et décroît en profondeur.

L'état de saturation en bases est lié à la pluviométrie. Voisin de 5 % dans les régions très humides (pluviométrie : 3 m), il atteint 40 % et parfois plus dans les régions moyennement arrosées avec un léger déficit en eau (pluviométrie annuelle = 1,8 m). Les apports de chaux provoquent des perturbations locales, mais leur effet dans les régions humides ne dure que quelques années. Le calcium et la potasse échangeables sont rapidement entraînés, leur disparition étant surtout intense dans les horizons profonds peu humifères.

L'eau de rétention correspondant à la différence des humidités à pF 3 et pF 4,2 est voisine de 5 à 7 % et parfois 10 à 12 par 100 g de terre fine séchée à l'air. La perméabilité Muntz vers 50 cm de profondeur est de l'ordre de 5 à 7 cm/heure et la perméabilité Vergières de 2 à 3 cm/heure. Elle est souvent plus faible vers 120 cm sans empêcher toutefois une pénétration assez rapide et profonde de l'eau.

2.2 - Subdivisions dans les sols ferrallitiques

2.2.1 - LES SOLS FERRALLITIQUES TRÈS PROFONDS OU FERRALLITIQUES TYPIQUES

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 1,8 à 3 m avec une saison sèche modérée de trois à quatre mois. Le déficit en eau est inférieur à 200 mm. Il s'agit en général de plateaux peu accidentés.

Les sols ont des horizons B épais, de texture argileuse mais friables. La gibbsite est absente ou présente en petite quantité.

On distingue :

a - L'orthotype

Ce sont les sols à horizon B de consistance modérée à friable, paraissant plus friable en profondeur.

b - Les sols à pseudo-sables

Ils sont très voisins de l'orthotype, mais le caractère friable est si marqué en profondeur, qu'il est possible de distinguer deux sous-horizons. Un premier sous-horizon B21, à consistance modérée et de couleur jaune ou jaune rouge sur 50 à 80 cm d'épaisseur, repose sur un sous-horizon B22 très friable plus rouge et épais. C'est l'horizon à pseudosables. Les mottes éclatent en fins agrégats anguleux entre les doigts sans donner de morceaux de taille intermédiaire.

c - Les sols à hydromorphie

- Hydromorphie ancienne : sous un horizon B1 ou B2, souvent riche en pisolites ferroman-ganiques, on trouve un horizon B2 marbré de rouge et de jaune sale avec une intensité variable de la teinte. La profondeur d'apparition de ce niveau peu perméable marbré est variable (50 à 120 cm) et a une grande importance pour l'agriculture. Une nappe peut en effet rester perchée plusieurs jours

pendant les périodes pluvieuses. Lorsqu'il s'agit de processus anciens d'hydromorphie, la cartographie de ce faciès n'est souvent pas possible.

- Hydromorphie actuelle : ce sont les sols situés en bas de pentes, près des thalwegs sur des replats en pente légèrement inversée, ou encore au voisinage du niveau de la mer. La séparation des hydroxydes et de l'argile est en général plus poussée. On observe en même temps qu'un ternissement de la teinte de fond et sur une épaisseur pouvant dépasser le mètre, des veines grises et blanches très argileuses et compactes, avec des taches rouges très friables, beaucoup plus riches en fer. Le passage de l'horizon supérieur friable, lorsqu'il existe, à l'horizon marbré, est souvent brutal surtout quand l'hydromorphie est due à une nappe de niveau presque constant.

Qu'il s'agisse d'hydromorphie ancienne ou actuelle, le phénomène a affecté des matériaux déjà fortement ferrallitisés en place ou transportés. Il n'y a donc que séparation du fer et de l'argile, sans modification de la nature de l'argile qui reste la kaolinite plus ou moins hydratée.

Lorsque l'hydromorphie temporaire a influencé les processus d'altération des matériaux primaires (un pointement rocheux dans des formations ferrallitiques anciennes), les sols sont alors bien différents ; tout au moins les horizons profonds. On les rattache alors à l'une ou l'autre des variantes des ferrisols.

d - Discussion

Ces sols, situés sur des pentes relativement modérées, résultent d'une altération **très ancienne** et ont pour caractère commun d'être profonds et perméables.

L'argilisation est très poussée (kaolinite + hydroxyde de fer). Les hydroxydes de fer sont fortement individualisés, peu mobiles. Leurs liaisons avec les kaolinites (généralement peu hydratées et souvent bien cristallisées) confèrent aux agrégats une grande stabilité. Les hydroxydes d'alumine sont en général absents ou peu abondants.

La friabilité de ces sols paraît donc liée à un **bon drainage interne** vertical ou oblique. Il est significatif que, localement et en général en relation avec de faibles accidents topographiques provoquant un ralentissement du drainage externe dans une petite zone, on observe des horizons marbrés peu perméables dans lesquels la séparation des hydroxydes de fer et de la kaolinite est plus ou moins poussée, parfois presque complète.

Dans les régions les plus humides, ce caractère friable est plus accentué et des sols à 80 % d'argile peuvent avoir une texture apparente de tendance limoneuse. Les sols sont souvent très désaturés en bases.

Vers les régions un peu plus sèches, la partie supérieure de l'horizon B a tendance à devenir plus consistante et à acquérir une structure d'ensemble à tendance polyédrique, les horizons profonds demeurant très friables. Les sols sont aussi moins acides. S'agit-il là d'une évolution secondaire ?

2.2.2 - LES SOLS DES ZONES MONTAGNEUSES TRÈS HUMIDES OU GROUPE DES SOLS FERRALLITIQUES HUMIFÈRES

On les rencontre sur les versants montagneux très en pente et très humides (4 m) sans aucun déficit en eau au cours de l'année.

Ce sont des sols qui ressemblent beaucoup aux précédents par leur aspect morphologique, mais en diffèrent par une texture **apparente** plus légère, limono-argileuse et des teneurs parfois très importantes en gibbsite. Sur les versants très accidentés, l'horizon B a fréquemment une faible épaisseur par suite du rajeunissement des profils par l'érosion. L'horizon C est très épais.

Les teneurs en matières organiques des horizons superficiels sont souvent importantes et augmentent avec l'altitude et l'enneigement, pouvant atteindre jusqu'à 10 % dans les 20 cm de surface. Les sols sont en général très désaturés en bases ; S/T est inférieur à 10 % même en surface, et les pH bas : 4,5.

Comme ils sont situés sur de fortes pentes, ces sols sont sujets à des remaniements par ébou-

lements et colluvionnements. Il est difficile parfois de savoir s'ils n'ont pas été plus ou moins mêlés à des dépôts de cendres peu épais plus récents, maintenant fortement altérés et difficilement visibles.

Discussion

Ce sont des sols perméables qui reçoivent de très importantes quantités d'eau. L'évapotranspiration est souvent **réduite**. La pénétration de l'eau d'infiltration n'est ralentie qu'à la partie inférieure de l'horizon d'altération, lui-même épais et aréniforme, mais le drainage oblique dans le profil sur les fortes pentes est important. Il en résulte un renouvellement des eaux d'infiltration et un entraînement hors du profil des substances dissoutes. Les sols sont par suite très acides et désaturés en bases.

Outre l'apparition de kaolinite et d'hydroxydes de fer bien individualisés, on trouve fréquemment dans les régions les plus humides des hydroxydes d'alumine. Il n'est pas possible d'indiquer si la gibbsite se formerait à partir des minéraux primaires ou par décomposition de la kaolinite car, par suite de l'érosion très active, l'horizon d'altération apparaît souvent à moins de 1,50 m de profondeur. La première hypothèse paraît vraisemblable mais quelques apports de cendres récentes ayant saupoudré les hauteurs des massifs ont été parfois décelés et il n'est pas exclu que, dans certains cas, la gibbsite en soit directement issue.

2.2.3 - GROUPE DES SOLS FAIBLEMENT FERRALLITIQUES

On rencontre ces sols en passant vers les régions plus sèches à déficit en eau déjà marqué, et sur les pentes où un rajeunissement constant du sol se produit.

Ils se différencient essentiellement des sols ferrallitiques précédents par une compacité plus importante de l'horizon B ou, plus souvent, seulement du sous-horizon B21. L'épaisseur de l'horizon d'altération est plus faible et il est généralement moins aréniforme avec des débris de roches et de légères marbrures. L'épaisseur totale des sols dépasse rarement trois mètres. Le climat et l'âge du sol interviendraient donc simultanément.

3 - LES FERRISOLS ET LES INTERGRADES FERRISOLS-VERTISOLS

3.1 - Introduction

Il s'agit de sols à hydroxydes de fer fortement individualisés, renfermant généralement une faible proportion de minéraux altérables dans les sables et dont l'évolution de la fraction argileuse vers la kaolinite est plus ou moins poussée.

Certains sols ont des horizons B franchement compacts. Ce sont, en fait, des intergrades climatiques entre les sols ferrallitiques et les vertisols, tout comme les sols ferrugineux (ou fersiallitiques) constituent dans les régions plus sèches et sur des matériaux plus grossiers des intermédiaires climatiques entre les sols ferrallitiques et les sols sub-arides.

Si, dans certaines régions humides, ces sols semblent évoluer avec le temps vers des sols ferrallitiques, il n'est pas du tout certain que cela puisse être généralisé.

Parmi ces ferrisols à horizon B compact, certains se rapprochent nettement des sols ferrallitiques et constituent donc des ferrisols au sens de la définition, c'est-à-dire des sols proches des ferrallitiques.

D'autres, plus compacts, avec davantage d'argile hydratée et souvent une proportion importante d'argiles montmorillonitiques en profondeur, ou dans tout le profil pour les phases rajeunies, peuvent être difficilement classés parmi les ferrisols, par suite de la morphologie du profil. Il est préférable de les placer provisoirement en intergrades ferrisols-vertisols.

Certains sols ont des horizons B peu compacts argileux ou argilo-limoneux, avec pourtant une proportion importante de montmorillonite en profondeur ou dans tout le profil pour les phases rajeunies par l'érosion. La fraction sableuse supérieure à 50 microns est très faible et ne renferme pas de minéraux altérables. Par contre, la fraction limon est importante. Il ne peut être question de classer ces sols en intergrades ferrisols-vertisols. Il s'agirait donc de sols intergrades dans le temps entre des sols peu évolués et des sols ferrallitiques.

D'autres sols renferment une forte proportion de montmorillonite et sont de couleur rouge vif. L'horizon B est généralement compact et adhérent. On les trouve, en position érodée, côte à côte avec des vertisols noirs ou beiges, à structure fine, formés sur des tufs analogues.

Bien que ces différences d'évolution soient encore mal expliquées, on peut provisoirement considérer ces sols comme des intergrades climatiques et de temps entre les vertisols et les sols ferrallitiques vers lesquels ils semblent évoluer rapidement en zone humide. Il ne paraît guère possible cependant de les classer dans les ferrisols.

3.2 - Les ferrisols à horizons B compacts

Quelques caractères des sols ferrallitiques sont discernables dans certains horizons. Il y a rarement de la montmorillonite.

3.2.1 - CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

a - Facteurs de formation

Climat

Il est voisin de celui de beaucoup de sols ferrallitiques. Toutefois la pluviométrie annuelle dépasse rarement 2,3 m et peut descendre à 1,6 m. La saison sèche n'est pas très marquée.

Roche-mère - Géomorphologie

Il s'agit de brèches ou de coulées andési-labradoritiques anciennes anté-miocènes, en **modelé érodé et accidenté** de collines. La pente est, en général, supérieure à 10 %, l'altitude ne dépasse guère 400 m.

On rencontre aussi des tufs andési-labradoritiques plus récents, pliocènes qui ont recouvert les formations précédentes, le modelé restant sensiblement inchangé.

b - Caractéristiques morphologiques

Les caractères du profil sont les suivants :

Horizon A

Cet horizon est partout labouré ou travaillé, donc fortement remanié. Sa coloration est brun foncé, avec une structure moyenne à fine, relativement friable.

Horizon B

B de consistance et parfois de couleur (B1 + B2 ou B21 + B22). Son **épaisseur** est inférieure à 1,5 m avec présence de sous-horizons différenciables.

La couleur est brun-jaune (7,5 YR 4/4 à 5/6) à brun rougeâtre (5 YR 5/4 rarement 2,5 YR) avec souvent des taches légères jaune sale. La coloration brun foncé ne concerne que l'horizon labouré Ap, mais parfois aussi un horizon B1, jusqu'à une profondeur de 60 à 70 cm.

La structure d'ensemble est peu nette.

La texture est argileuse. Le sol est peu plastique mais compact à l'état frais, surtout en profondeur. L'adhérence est faible. Le sous-horizon B1 ou B21 est généralement moins compact et plus friable que B2 ou B22. Les agrégats ont plutôt un aspect terne. Le sol est très peu perméable. Il y a peu de débris d'altération. On trouve souvent des pisolites ferro-manganiques plus ou moins durcis, pouvant avoir un diamètre de 1 cm.

Horizon B 3

Son épaisseur est inférieure à 1 m. C'est un niveau de transition progressive entre B 22 et C. Il est plus ou moins riche en fragments de roches peu altérées et fréquemment marbré de veines jaune-sale et rougeâtres. L'apparition des marbrures s'accompagne d'une augmentation de la compacité.

Horizon C

Son épaisseur est variable. Il est souvent encore dur, de couleur variée et ayant conservé la structure du matériau originel. L'altération des roches en boule avec des écailles d'altération concentriques peut s'être produite sur une grande profondeur.

c - Caractéristiques minéralogiques

L'argile est constituée sur tout le profil, par un mélange de kaolinite et de métahalloysite (ou fire-clay) (raies à 7,25 - 7,35 Å, voisines ou plus petites que les raies vers 4,41 Å).

La goéthite est abondante. Les teneurs en fer libre sont élevées : 8 à 10 % en Fe₂O₃. Elles sont donc légèrement inférieures à celles des sols ferrallitiques, mais le rapport fer libre/fer total est identique : 75 %. La gibbsite est très rarement visible. Le rapport moléculaire SiO₂/Al₂O₃ varie entre 1,7 et 2,2.

Les sables renferment peu de minéraux altérables dans les horizons supérieurs où l'on trouve surtout des quartz et des débris de concrétions ferro-manganiques. La plupart des minéraux lourds sont opaques.

d - Caractéristiques physico-chimiques

La teneur en matières organiques dans l'horizon labouré est de l'ordre de 2,5 à 4 % à moyenne altitude. Elle décroît rapidement en profondeur.

La teneur en argile dans l'horizon B est de l'ordre de 50 à 60 %. Dans l'horizon A, les teneurs sont plus faibles de 20 % environ à celles de l'horizon B, par suite très vraisemblablement d'un enrichissement relatif en sables par l'érosion. Les teneurs en limon sont voisines de 15 à 26 %. Le rapport limon/argile est donc supérieur à 15 %. La dispersion est souvent encore délicate et exige une action mécanique.

La somme des bases échangeables oscille entre 8 et 20 méq./100 g de sol. La capacité d'échange est de l'ordre de 15 à 25 méq./100 g de sol, ce qui fait en moyenne, calculé pour 100 g d'argile, 25 à 40 méq. Elle peut décroître légèrement en profondeur ou rester constante ce qui, compte tenu de la diminution des teneurs en matières organiques en profondeur, indique une **augmentation** de la capacité d'échange de la fraction minérale. L'état de saturation en bases est voisin de 60 à 70 %, donc plus élevé que dans les sols ferrallitiques.

Par comparaison avec les sols ferrallitiques, on peut conclure que l'évolution semble moins poussée. Il y a un peu moins d'argile, un peu plus de limon, la capacité d'échange et l'état de saturation sont plus élevés. Les teneurs en matières organiques sont analogues. Celles en fer libre sont en valeur absolue très voisines ou peu inférieures ; le rapport fer libre/fer total est identique. Mais la nature des liaisons fer/argile est peut-être différente et responsable de ces variations de la compacité.

3.2.2 - LES SUBDIVISIONS DES FERRISOLS

1 - Sols à B peu compact - Intergrades vers Ferrallitiques

Dans certains cas, il s'agit de sols profonds peu érodés dans lesquels la ferrallitisation des horizons supérieurs plus friables est déjà sensible .

Dans d'autres cas, ce sont des sols issus de formations labradoritiques probablement plus riches en éléments ferromagnésiens sur lesquels l'évolution a été plus rapide. La profondeur du sol est variable.

Quelquefois, sur de fortes pentes, il s'agit tout simplement de sols rendus plus friables parce que résultant de colluvionnement et d'apports.

2 - Sols à B compact

C'est l'orthotype qui a été décrit.

3 - Sols à B1 ou B21 compact et B22 très compact

a hydromorphie secondaire de profondeur.

Ces sols diffèrent des précédents par l'horizon B 2, très compact et généralement fortement marbré de gris et de rouge vers 90-120 cm. Cet horizon marbré résulterait probablement d'une hydromorphie ancienne ayant affecté des matériaux déjà évolués. L'horizon contient peu de minéraux altérables, la capacité d'échange est relativement faible, l'argile est du type kaolinite à métahalloysite. Les concrétions ferro-manganiques sont particulièrement abondantes au-dessus du niveau très compact.

On rencontre ces sols surtout sur les formations légèrement surélevées en bordure de plaine ou dans certains sites topographiques particuliers.

3.3 - Les intergrades ferrisols-vertisols

ou Ferrisols à horizons B très compacts et argiles hydratées.

La compacité de cet horizon peut avoir plusieurs origines : elle peut être la conséquence de conditions d'hydromorphie temporaires dues généralement à un drainage externe ralenti susceptible d'affecter les phénomènes d'altération et de ralentir l'évolution de la fraction argileuse dans les horizons profonds ou dans tout le profil. (présence fréquente d'argiles hydratées : montmorillonite ...). Il n'est cependant pas toujours aisé, sur le terrain, de distinguer ces sols de certains ferrisols à hydromorphie secondaire affectant des matériaux déjà ferrallitisés, qui ne renferment que des argiles de type kaolinique.

La compacité peut être aussi la conséquence d'une évolution en **climat plus sec** qui favorise la formation de la montmorillonite et ralentit sa décomposition.

Il peut s'agir aussi de **sols moins évolués**, parce que plus jeunes, résultant de l'altération matériaux de recouvrement plus récents. Si ces matériaux sont très altérés et peu épais, on a des profils complexes et les différences d'origine de certains horizons ne sont pas toujours faciles à mettre en évidence.

3.3.1 - CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

a - Facteurs de formation

Climat

C'est encore un climat chaud et humide, mais le déficit en eau est souvent plus accusé. La pluviométrie est généralement comprise entre 1,6 et 2 m, lorsqu'il s'agit de sols formés sur des matériaux anciens. Dans le cas de formations volcaniques plus récentes, la pluviométrie peut être plus élevée, mais dépasse rarement 2,5 m.

Roche-mère - Géomorphologie

Il peut s'agir de roches dures, brèches, coulées, ou tufs peu perméables andési-labradoriques du miocène ou de formations tuffeuses plus récentes du pliocène. Le modelé érodé de collines est le même que dans le faciès précédent.

b - Caractéristiques morphologiques

L'aspect du profil est le suivant :

Horizon A

Il est remanié, en général, par les labours. La structure est déjà souvent plus large avec quelques fissures en saison sèche.

Horizon B

C'est un B de couleur et de consistance à sous-horizons souvent différenciés quand le sol est profond.

B-21 : il peut avoir un mètre d'épaisseur.

La **texture** est argileuse.

La **structure** d'ensemble est peu nette. Le sol est très dur, sec. A l'état humide il est plastique et adhérent, compact à très compact, surtout en profondeur. Il y a peu ou pas de revêtements sur les faces de la structure ou des agrégats. On observe quelques fentes en saison sèche.

La **couleur** est variée, mais le plus souvent brun jaune clair - 10 YR 5/6. Il y a peu de variations de sec à humide. Des taches de teintes différentes sont fréquentes. On note souvent la présence de pisolites ferro-manganiques plus ou moins durcis.

B-22 ou B-3 : l'épaisseur est inférieure à 40 cm. Il est de teinte assez claire avec des veines grisâtres ou beiges, plastiques et adhérentes. Les débris d'altération peuvent être abondants.

Horizon C

Le passage à l'horizon C est rapide. Il est encore dur, de couleur variée, ayant conservé la texture originelle de la roche.

c - Caractéristiques minéralogiques

Il y a souvent des différences sensibles entre la surface et la profondeur.

La fraction argileuse est en général constituée d'un mélange de métahalloysite (ou halloysite) et de kaolinite (ou fire-clay). En profondeur, la montmorillonite est souvent décelée.

La goethite peut se rencontrer en quantité notable. Les teneurs en fer libre sont souvent élevées, atteignant 70 % de celles du fer total, mais dans certains sols ce rapport peut descendre à 50 %.

L'examen des sables peut, soit indiquer une altération aussi poussée que dans les ferrisols déjà décrits, soit nettement moins intense avec, en ce cas, présence de minéraux lourds transparents, plus ou moins abondants.

d - Caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques concernant la matière organique et la granulométrie sont sensiblement les mêmes que dans les sols précédents.

Les teneurs en bases échangeables sont plus élevées : 12 à 20 méq/100 g de sol et peuvent augmenter en profondeur avec, surtout un accroissement du magnésium. L'état de saturation est voisin de 80%. Il y a donc une nette augmentation de la capacité d'échange de la fraction minérale en profondeur.

3.3.2 - SUBDIVISIONS (sous-groupes)

a - A hydromorphie temporaire

Ce sont des sols de piedmonts localisés dans les sites où se concentrent les eaux d'infiltration ou de ruissellement. L'horizon B est généralement peu épais, tacheté et la compacité peut apparaître dès la surface, ainsi qu'une plasticité marquée à l'état frais.

b - Sans hydromorphie

L'horizon B a déjà quelques caractères des argiles gonflantes. Ces sols se développent sur des matériaux moins anciens, et dans des régions relativement plus sèches que ceux des ferrisols à horizon B compact. Les rapports fer libre/fer total seraient souvent plus faibles. Certains de ces sols se rapprochent beaucoup des vertisols.

Il existe une phase érodée riche en débris d'altération dès la surface, ce qui contribue à diminuer la compacité du sol.

Il existe aussi une phase profonde présentant un horizon B-21 un peu moins compact que l'horizon B-22 plus profond. Cette phase constitue une transition avec les ferrisols du type 3-21 dont ils ne diffèrent que par la compacité et l'adhérence plus accentuées de l'horizon profond. La coloration est cependant plus claire, plus jaune.

c - A caractères vertisoliques plus accusés

Le drainage externe est faible. La proportion de montmorillonite est déjà importante dès la surface et les caractères vertisoliques sont accusés surtout en profondeur. Ce sont des sols beiges à beige jaune, avec de nombreuses taches ocre ou rouille, qui contribuent à atténuer la compacité et les phénomènes de retrait.

Discussion

Ces sols se distinguent essentiellement des sols ferrallitiques par la compacité de l'horizon B et par l'horizon d'altération moins épais et plus dur, situé relativement à faible profondeur (1,5 à 2 m).

Le niveau B1 compact, surmontant parfois un niveau B2 encore plus compact, les différencie encore davantage des sols ferrallitiques. Ils sont presque tous situés sur des fortes pentes et rajeunis par l'érosion.

La perméabilité réduite de l'horizon B limite la pénétration verticale des eaux et gêne leur écoulement oblique dans le profil le long de la pente au-dessus de l'horizon altéré, relativement peu profond. Il en résulte un certain engorgement pouvant atteindre les horizons supérieurs, engorgement bien connu des agriculteurs qui doivent établir un réseau de drainage superficiel même sur de fortes pentes. Cette dernière pratique est fort peu répandue sur les sols ferrallitiques, même sur ceux en faible pente.

L'engorgement de ces sols ou aussi la pluviométrie plus faible seraient responsables, en réduisant le volume des eaux percolées au cours de l'année, du lessivage moins poussé des éléments minéraux, tels que la silice, les bases . . qui seraient moins entraînés hors du profil. L'état de saturation en base est ainsi nettement plus élevé que dans les sols ferrallitiques, les argiles ont souvent un caractère hydraté (parfois montmorillonite), plus marqué en profondeur, et la compacité est plus forte, surtout dans les zones moins bien drainées ou à déficit en eau plus accusé.

Bien que les hydroxydes de fer semblent aussi individualisés et presque aussi abondants qu'en dans les sols ferrallitiques, leur action sur la stabilité structurale n'est pas aussi efficace que dans les milieux bien drainés et plus aérés des sols ferrallitiques. Dans certains cas, la nature de l'argile aurait d'ailleurs un rôle prépondérant sur la structure.

Presque tous ces sols sont cependant situés sur de fortes pentes. Ils sont rajeunis constamment. Il n'est donc pas exclu que, dans les **régions humides**, des sols plus profonds, **plus anciens**, évolueraient vers des sols ferrallitiques. Certains niveaux supérieurs déjà plus friables se rapprochaient de ceux des sols ferrallitiques. Les formations plus récentes et déjà altérées que l'on trouve en placage peu épais sur des formations ferruginisées plus anciennes donnent pour le moment des sols nettement plus compacts que les sols environnants sans préjuger de leur évolution ultérieure.

La nature de la roche-mère influence également les processus d'évolution. Les sols issus de formations labradoritiques donnent plus rapidement des faciès friables, plus rouges que ceux issus de brèches andésitiques.

3.4 - Quelques cas particuliers

3.4.1 - LES SOLS LIMONEUX A ALTÉRATION MONTMORILLONITIQUE

Ces sols se forment sur un massif bien arrosé (pluviométrie de 2 à 2,5 m par an), **très accidenté** et constitué de coulées et de projections fines labradoritiques d'âges différents, imbriquées (pliocènes, oligocènes).

L'altération montmorillonitique ne confère pas aux horizons riches en ce type d'argile, la compacité habituelle. Ceux-ci présentent une texture légère argilo-limoneuse. Il y a beaucoup plus de limons que dans bien des ferrisols. Les hydroxydes sont fortement individualisés.

La dégradation de la montmorillonite en argile du type kaolinite est rapide et les sols profonds qui ne sont pas rajeunis par l'érosion présentent, dans leurs horizons supérieurs, les caractères des ferrisols. Presque tous situés sur de fortes pentes, ces sols sont le plus souvent sujets à des remaniements par colluvionnements, et les profils complexes sont très fréquents.

a - Caractéristiques morphologiques

L'aspect du profil est le suivant :

Horizon A

Il est remanié par l'érosion.

Horizon B

B 21 - Son épaisseur est voisine de 1 à 1,50 m. La texture est argilo-limoneuse. La structure d'ensemble est peu nette, mais la sous-structure est polyédrique fine, à tendance anguleuse. La coloration est brun jaune pâle, **légèrement rougeâtre** (7,5 YR).

B 22 - La texture apparente est plus limoneuse avec un léger bariolage rougeâtre et jaune sale.

B 3 - Il est riche en fins débris d'altération (limons et sables très fins) jaunâtres et verdâtres. Le sol est limoneux légèrement adhérent. On passe progressivement à l'horizon C.

Horizon C

C'est un tuf peu induré de teinte beige clair.

b - Caractéristiques minéralogiques

En profondeur, la fraction argileuse est formée de métahalloysite et de montmorillonite. La montmorillonite disparaît souvent dans les horizons supérieurs. La goethite est présente en quantités importantes. On observe des traces d'argile illitiques (raies de 10 Å se conservant après chauffage à 100° et à 5 Å). C'est la seule fois qu'ont été rencontrés des argiles de ce type sur formation volcanique, ainsi que des sols perméables et riches en montmorillonite, ce qui est rare.

Les sables de l'horizon B sont tous très altérés et il n'y a pas de minéraux lourds transparents dans la fraction supérieure à 50 microns, par ailleurs très peu représentée.

c - Caractéristiques physico-chimiques

Les teneurs en argile sont de l'ordre de 35 à 45 % dans l'horizon B, elles sont donc nettement plus faibles que dans la plupart des ferrisols déjà décrits. Les teneurs en limons atteignent 25 à 30 % et augmentent en profondeur.

La somme des bases échangeables varie avec la profondeur passant de 15 à 25 méq en surface, à 25-45 méq/100 g de sol en profondeur, ce qui montre bien l'accroissement de la proportion de montmorillonite.

3.4.2 - SOLS ROUGES MONTMORILLONITIQUES. INTERGRADES FERRISOLS-VERTISOLS

Ces sols sont caractérisés par la présence, en quantités importantes, d'argiles gonflantes montmorillonitiques (silice - magnésie). Ces argiles montmorillonitiques ne paraissent pas en équilibre stable et se décomposent plus ou moins rapidement, la proportion d'argile de type kaolinique augmentant alors progressivement.

Les caractères vertisoliques sont surtout marqués en profondeur et n'apparaissent pas toujours dans les horizons supérieurs (lorsque ceux-ci existent) lesquels dans quelques cas, peuvent se rattacher aux ferrisols plus ou moins compacts.

Il s'agit de sols érodés peu profonds, relativement **bien drainés** sur de fortes ou très fortes pentes. On les rencontre sur des tufs labradoritiques où ils voisinent avec des vertisols lithomorphes à structure fine beige ou noire, dont ils se distinguent par leur couleur rouge vif (5 R 4/8) et leur structure plus friable en surface. Ils s'observent dans les régions humides recevant 1,8 à 2 m de pluviométrie annuelle, mais le plus souvent de la zone intermédiaire entre les zones à vertisols à structure large et les zones à ferrisols.

Seul, le sol à profil peu profond est cartographiable. Les faciès profonds rentrent dans la catégorie des ferrisols. On peut noter une augmentation très sensible de la montmorillonite dès que, par suite de la topographie, le drainage externe est un peu ralenti.

L'aspect du profil est le suivant :

Horizon A

Son épaisseur est de 15 à 20 cm. Les caractères grumosoliques sont accentués par les hydroxydes de fer. Le sol s'effrite en fins agrégats par dessiccation, mais est adhérent lorsqu'il est humide. La matière organique est masquée par la coloration rouge.

Horizon B

Son épaisseur dépasse rarement 60 cm. La coloration est rouge vif. La montmorillonite confère au sol un caractère gras et adhérent, plastique, compact. La capacité d'échange est voisine de 30 à 50 méq/100 g, soit 80 à 120 méq. calculée pour 100 g d'argile. Les teneurs en magnésium échangeable sont supérieures à celles en calcium.

Horizon B 3 ou C

Il est très riche en éléments altérables donnant au sol un bariolage constitué de nombreux petits points de toutes couleurs. Il semble plus friable, bien que la proportion de montmorillonite soit encore plus importante. La capacité d'échange peut atteindre 50 à 80 méq/100 g de sol avec de fortes teneurs en magnésium.

3.4.3 - SOLS BRUNS FERRISOLIQUES DE PENTES A HYDROMORPHIE. INTERGRADES FERRISOLS-VERTISOLS

On les rencontre dans des régions sous le vent où la diminution très rapide de la pluviométrie provoque le passage à de faibles distances des sols faiblement ferrallitiques aux vertisols.

Situés sur de fortes pentes dans la partie inférieure des versants de hauts massifs volcaniques, ces sols reçoivent d'importantes quantités d'eau de ruissellements superficiels venant des régions plus élevées.

Les sols sont peu profonds (40 à 60 cm), de couleur brun foncé argileux, assez compacts avec généralement de nombreux cailloux. La transition vers la roche-mère caillouteuse ou rocheuse est brutale. Un niveau riche en taches ferromanganiques situé juste au-dessus du matériau-mère résulte de la circulation épidermique importante des eaux provenant des sols ferrallitiques situés dans les régions plus hautes.

Les sols sont bien pourvus en bases échangeables (12 à 25 méq.). L'argile est du type métalloysite associée en général à de la montmorillonite. La teneur en magnésium échangeable est, en profondeur, souvent supérieure à celle du calcium.

En passant aux régions plus sèches, à déficit en eau marqué, on peut observer en profondeur des croûtes siliceuses blanches (silice soluble dans la soude).

4 - LES VERTISOLS LITHOMORPHES

- sous-classe des vertisols à pédoclimat seulement temporairement humide.

4.1 - Caractéristiques générales

a - FACTEURS DE FORMATION

Climat

Le climat est chaud et humide avec une saison sèche marquée. La limite climatique entre formations vertisoliques et ferrisoliques est extrêmement nette, le passage pouvant se faire en quelques kilomètres.

La pluviométrie est comprise entre 500 et 1 500 mm, avec souvent plusieurs mois sans pluies. Le déficit en eau (sur 5 ans) est important : 400 à 700 mm. Dans la plupart des cas, la végétation naturelle peut se dessécher et les arbustes perdre leurs feuilles.

La température est comprise entre 20 et 30° avec peu de variations. L'hygrométrie, par suite de l'influence marine, reste supérieure à 60 %.

Roche-mère - Morphologie

Le matériau originel peut être très varié. Il s'agit de coulées, de brèches ou surtout de tufs, andésitiques, labradoritiques ou dacitiques. Les projections aériennes peuvent avoir séjourné ou non en mer, être calcaires ou non calcaires. Le relief est varié, collines et piedmonts. La pente peut être très faible ou atteindre 25 %.

b - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Ce sont des profils A (B) C. Il s'agit d'un horizon (B) de couleur et parfois structural qui est souvent absent.

La morphologie du profil est la suivante :

Horizon A

Il est brun très foncé (de chroma 0 ou 2). Son épaisseur est variable (30 à 100 cm) et fonction, assez souvent, de la profondeur de travail du sol. A l'état humide, la structure est en général large.

Horizon B

Son **épaisseur** est inférieure à 1,2 m.

La **texture** est argileuse à fortement argileuse.

La **structure** est massive, continue à l'état frais et, au contraire fortement fissurée, prismatique, à l'état sec. On observe des faces de glissements (slikenside) et on note souvent la présence de petits points blancs. Humide, le sol est plastique et adhérent ; sec, il est très dur.

La **coloration** est beige à beige jaune ou beige olive (gamme 2,5 et 5 Y).

Horizon C

Le passage à l'horizon C est brutal et a lieu en quelques centimètres. Celui-ci est très mince de teinte claire, formé souvent de lentilles de débris friables peu altérés et d'argile grasse, dont la couleur est olive verdâtre au contact immédiat de la roche ou du tuf.

c - CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

L'argile est essentiellement du type montmorillonite. On peut trouver aussi en association de la métahalloysite en quantité variable. La métahalloysite est souvent plus importante dans les horizons de surface qu'en profondeur. Au contact de la roche ou du tuf, la montmorillonite est presque pure et, en général, mieux cristallisée.

d - CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- La teneur en matière organique de l'horizon labouré est de l'ordre de 2 à 4 % et diminue très rapidement en profondeur.

- La teneur en argile varie de 40 à 80 %.

- La somme des bases échangeables oscille entre 25 et 70 méq. Les teneurs en magnésium et en sodium augmentent presque toujours en profondeur. Cette augmentation est d'autant plus sensible que la dégradation de la montmorillonite en argile du type kaolinite est importante. La proportion de calcium et de magnésium échangeables est variable et sous la dépendance de la roche-mère. L'état de saturation en bases est compris entre 60 et 100 %. Le pH de l'horizon B oscille entre 5,5 et 7,8.

Dans l'horizon d'altération, le pH peut être supérieur à 7 ou, au contraire, très acide, de l'ordre de 4,5. Un pH aussi bas reflète presque toujours l'état très instable de la montmorillonite. On constate en effet, dans ce cas, que la proportion de ce type d'argile décroît progressivement de la profondeur vers la surface du sol.

L'eau utile définie par la différence pF 3 - pF 4.2 peut atteindre 30 à 50 d'eau pour 100 g de sol séché à l'étuve. Il semble nécessaire pour le calcul des besoins en eau, de corriger des valeurs aussi élevées et de ne retenir qu'une épaisseur modérée de sol réellement utilisable. Cependant, bien que les sols soient très lourds, les racines semblent descendre souvent assez profondément. Persistent-elles durant toute la saison des pluies ? Beaucoup sont, d'ailleurs, brisées par la fissuration du sol en saison sèche.

4.2 - Subdivisions

4.2.1 - VERTISOLS A STRUCTURE LARGE DÈS LA SURFACE.

1^{er} sous-groupe

Ce sont tous les sols formés sous **climat sec** (déficit en eau 400 à 700 mm) sur des tufs, des brèches ou des coulées. La surface du sol est largement fissurée. L'alternance des pluies et de la sécheresse n'arrive qu'à désagréger une pellicule superficielle. Cette structure est d'autant plus grossière que la proportion de magnésium est importante dans le complexe absorbant.

Il existe des **faciès très magnésiens** dans lesquels les propriétés de la montmorillonite sont particulièrement marquées. Le sol est très adhérent et exige une puissante force motrice pour être travaillé. Le magnésium est plus ou moins lié au sodium dont les teneurs augmentent souvent en profondeur et peuvent dépasser 15 % de la somme des bases échangeables. Le sol labouré se fragmente en petits blocs cubiques sans acquérir une structure grumeleuse.

2^e sous-groupe à hydromorphie

Ce sont les vertisols situés dans les régions plus humides à déficit en eau modéré, 250 mm. Les pluviométries annuelles sont de l'ordre de 1 600 à 1 800 mm. Le ressuyage du sol est plus lent que pour les sols précédents, surtout dans les zones peu accidentées. Une certaine circulation d'eau oblique peut alors se produire dans l'horizon de surface travaillé. Il y a, en général, dégradation de la montmorillonite dont la proportion diminue le plus souvent de la profondeur vers la surface, et est accompagnée d'une apparition et d'une augmentation de la proportion de kaolinite.

L'horizon B présente une teinte beige sale avec quelques veines grises ou rouille. L'engorgement est généralement plus marqué en surface qu'en profondeur. Certains sols cultivés sont ainsi, en périodes pluvieuses, gleyfiés sur 30 à 40 cm, alors que les horizons sous-jacents demeurent nettement plus sains.

La culture de tels sols est difficile et coûteuse. Elle exige la construction d'ados étroits et fortement bombés et de billons.

4.2.2 - VERTISOLS ET PARAVERTISOLS A STRUCTURE FINE DE SURFACE

La structure de surface fine peut avoir deux origines différentes. Elle peut être due à une saturation du complexe absorbant par le calcium en présence de matière organique. Elle peut avoir aussi pour cause une proportion déjà importante de kaolinite et même d'hydroxydes.

1 - Grumosols ou Vertisols calciques formés sur tufs volcaniques calcaires en zones sèches ou sur calcaires (sols fortement montmorillonitiques)

Ces vertisols se forment sur des roches mères calcaires : calcaires coralliens et tufs coquilliers, ou des roches très riches en calcium, comme les basaltes .. L'horizon A acquiert par simple dessiccation une excellente structure grumeleuse finement friable. Après labour, les gros blocs s'effritent ainsi complètement sur 20 à 30 cm d'épaisseur.

La stabilité de la structure de surface est variable. Elle peut se conserver plusieurs mois ou disparaître assez rapidement en saison des pluies.

L'horizon B peu organique, beige jaune, conserve une structure très grossière ; le sol se fissure fortement en saison sèche sans s'effriter.

Les faciès peu profonds constituent des intergrades vers les sols calcomagnésimorphes ou les rendzines

2 - Vertisols et Paravertisols (avec une proportion très variable de montmorillonite et de kaolinite) sur roches volcaniques en zones humides

La pluviométrie est voisine de 1,8 m. Les sols sont plus évolués et la dégradation de la montmorillonite en kaolinite, accompagnée d'une diminution des teneurs en magnésium échangeable est déjà sensible dans les horizons supérieurs. Il s'agit souvent de sols A/C situés sur des pentes relativement bien drainées. Les sols sont bien pourvus en matière organique (4 à 5 %) et parfois riches en petits graviers. L'horizon C présente les caractères des vertisols, masqués souvent par des débris peu altérés de la roche-mère.

Les faciès les plus évolués, donc plus riches en argiles kaoliniques et en hydroxydes, pourraient être considérés comme des intergrades vers les ferrisols à altération montmorillonitique. Certains, en position bien drainée, se rapprochent des sols bruns ferrisoliques.

3 - Sols très pierreux de zones sèches (ou phase érodée ou de colluvionnement des vertisols à structure large)

Ce sont des sols de fortes pentes formés sur coulées, brèches ou des éboulis caillouteux. Les caractères vertisoliques sont très nets, mais la présence des éléments pierreux et graveleux permet un meilleur effritement du sol.

4 - Paravertisols sur dacite en zones sèches

Ce sont des sols de zones sèches formés sur des matériaux-mères relativement moins basiques, comme les dacites. Le sol a l'aspect d'un vertisol beige clair ou brunâtre, mais la proportion d'argile montmorillonitique et la capacité d'échange sont plus faibles : 25 à 30 méq. L'adhérence est aussi plus faible et la structure de surface moins grossière.

4.2.3. - DISCUSSION

Il semble que pour des pluviométries inférieures à 1 500 mm, et un déficit en eau supérieur à 400 mm, et à saison sèche marquée, ce soient des vertisols ou des sols à tendance vertisolique qui prennent naissance sur la plupart des matériaux avec conservation du magnésium. Le caractère vertisolique serait d'autant plus accusé que le climat serait plus sec et la roche-mère moins perméable. Dans les régions à fort déficit en eau (500 mm) la montmorillonite paraît stable et la proportion de ce type d'argile semble peu varier dans le profil. Dans les régions à déficit en eau plus modéré, il y a en général nettement dégradation de la montmorillonite et augmentation de la proportion de kaolinite dans les horizons supérieurs.

Sur les surfaces très érodées ayant probablement jadis porté des sols de type ferrallitique et où subsiste seulement un niveau d'altération très ancien, on peut observer aujourd'hui en zone sèche, une nouvelle altération des minéraux primaires de type vertisolique.

5 - LES SOLS A ALLOPHANES OU "ANDEPTS"

- Classe des sols peu évolués. Sous-classe des sols peu évolués d'origine non climatique. (Sols d'apport). Sols à "pedon Cambique".

5.1 - Caractéristiques générales

a - FACTEURS DE FORMATION

Climat

On les rencontre en climat humide à très humide, à saison sèche très réduite. La pluviométrie annuelle est comprise entre 2,5 à 5 m. L'évapotranspiration est limitée par suite d'une insolation plus réduite et d'une température légèrement faible. En altitude, au-dessus de 700 m, l'ennuagement très fréquent maintient une humidité quasi permanente.

Roche-mère - Géomorphologie

Il s'agit de projections andésitiques à labradoritiques sableuses ou graveleuses **très perméables**. Épaisses en bordure des volcans, ces formations vont en s'amincissant quand on s'en éloigne. Dans certains endroits, elles peuvent avoir moins d'un mètre d'épaisseur et former des taches de recouvrement discontinues. Certaines venues datent du pliocène. Elles se présentent en tufs légers avec parfois des niveaux un peu cimentés en profondeur, formant des bancs discontinus. D'autres sont plus récentes et dateraient du quaternaire. Elles sont sableuses ou graveleuses : cendres et ponces.

Le relief est très varié. Aux fortes pentes des anciens volcans succèdent de longs plateaux en faible pente, découpés par de profondes ravines. Dans les zones où elles ont une faible épaisseur, les projections ont recouvert les collines accidentées des formations bréchiformes ferruginisées, dont elles épousent le relief.

b - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Ce sont des sols A (B) C-II (B) C avec B de couleur et parfois de consistance. Il y a des discontinuités lithologiques nombreuses, d'âge analogue ou différent et des horizons humifères enterrés.

L'aspect du profil est le suivant :

Horizon A

Sous forêt, il est très friable, très foncé sur 10 à 15 cm. Il est plus diffus quand il est remanié par les labours ou érodé.

Horizon B

Son **épaisseur** est variable et peut atteindre plusieurs mètres.

La **couleur** est beige jaune 10 YR. Elle devient beaucoup plus claire lorsqu'on passe du sol humide au sol séché à l'air. Certains horizons jaunes peuvent devenir beige-blanchâtre. Il y a peu de variations de couleurs entre le sol en place et le sol écrasé entre les doigts. La couleur vire souvent au brun assez foncé par séchage à l'étuve.

La **texture** apparente est celle d'un limon au toucher onctueux ayant une consistance à tendance savonneuse entre les doigts. Il s'agit d'un pseudo-limon.

La **structure** d'ensemble est diffuse, le sol est peu dur, mais avec une cohésion nette. Les mottes se brisent et s'effritent aisément dans la main, en donnant une sous-structure de petits agrégats, peu anguleux, stables. Il n'y a pas de revêtements nets sur les éléments de la structure et les agrégats. La perméabilité est très bonne. Il y a de nombreux débris d'altération sableux ou parfois graveleux.

Il est difficile, dans la plupart des cas, de distinguer le niveau d'altération. Du fait de l'épaisseur du sol et de l'hétérogénéité des matériaux-mères constitués par des dépôts aériens, on

observe en général des successions de niveaux grossiers, relativement peu altérés, alternant avec des niveaux plus fins de cendres souvent déjà très allophanisés. Il faudrait donc plutôt parler d'un horizon BC dans lequel, suivant la profondeur, l'accent devrait être mis tantôt sur B, tantôt sur C.

c - CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

La dispersion de la fraction argileuse est très difficile et incomplète par les méthodes usuelles. Ce n'est qu'après des traitements alcalins et acides que la dispersion en milieu acide a lieu partiellement.

Les examens aux rayons X effectués sur la fraction inférieure à deux microns ou la fraction extraite après quelques minutes de sédimentation n'indiquent aucun des minéraux argileux usuels.

L'analyse thermique différentielle montre un très grand crochet endothermique à 150°, suivi d'un petit crochet exothermique à 950°.

La goethite paraît peu abondante ou absente.

Les hydroxydes d'alumine sont souvent totalement absents. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est alors élevé, pouvant dépasser 3.

La gibbsite, et, par endroits la bayérite, peuvent aussi être importantes, surtout, semble-t-il, dans la fraction limon-sable fin. On observe alors les raies caractéristiques aux rayons X (4,72 - 2,21 Å pour la bayérite) et les crochets à l'analyse thermique différentielle. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ peut être faible, voisin de 1 ou inférieur

Une raie à 4,05 Å est presque toujours visible. Elle serait due à la cristobalite.

En dehors des hydroxydes d'alumine, quand ils existent, il y aurait donc surtout des substances amorphes.

La métahalloysite (ou l'halloysite) est parfois présente en petite quantité surtout dans les sols à allophanes qui forment transition vers les ferrisols bruns des zones plus sèches. La proportion augmente d'autant plus qu'on se rapproche de ce dernier type de sol.

Les sables (supérieurs à 50 microns) sont beaucoup moins altérés que dans les sols ferrallitiques ou les ferrisols déjà décrits. Presque tous les minéraux lourds sont encore transparents : hypsthène, hornblende, augite. Les zéolithes sont fréquents, analcime surtout.

d - CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

Les teneurs en matière organique sont variées et fonction de l'altitude. Elles peuvent passer ainsi dans les 20 cm superficiels de 3 ou 5 % à 200 m d'altitude, à plus de 10 ou 15 % vers 600 m. La matière organique semble migrer profondément dans le profil. En dépit de la couleur beige ou beige jaune clair du sol, des teneurs de 2 % vers 1 m de profondeur sont fréquentes.

Mais la caractéristique la plus importante des sols à allophanes est leur capacité pour l'eau, souvent considérable. L'humidité peut atteindre sur le sol ressuyé plus de 100 ou 200 d'eau pour 100 g de sol séché à l'étuve. Cette propriété disparaît en grande partie irréversiblement après séchage, même modéré, à l'air. L'humidité du sol réhumecté puis ressuyé, ne dépasse plus guère 30 d'eau pour 100 g de sol séché à l'étuve à 105°C.

Cette forte humidité peut s'apprécier dans une certaine mesure sur le terrain par l'onctuosité du sol entre les doigts, ce qui rend possible la cartographie des divers sous-types avec un nombre limité de déterminations d'humidité au laboratoire. La densité apparente du sol en place peut permettre aussi d'apprécier les caractéristiques hydriques du sol. Elle peut descendre jusqu'à 0,35 mais le plus souvent elle reste voisine de 0,5 à 0,7.

L'eau dite "utilisable", correspondant à la différence d'humidité entre les pF 2,5 et pF 4,2, mesurée sur échantillon **frais** est d'autant plus élevée, et sur échantillon séché à l'air préalablement d'autant plus faible que l'allophanisation est plus forte. L'humidité aux champs du sol ressuyé correspond souvent, cependant, à des pF inférieurs à 2,5. L'eau utilisable peut, alors, dépasser 60 % de sol séché à l'air.

La réhumectation du sol entre pF 4,2 et 2,5 semble réversible.

Les rôles respectifs de la matière organique et des substances minérales dans les phénomènes de rétention d'eau restent à préciser. Il semble que les allophanes et la matière organique puissent former des complexes particuliers, comme l'indiquent les très forts crochets exothermiques à des températures variant entre 600 et 900°, qui ne disparaissent que par des attaques prolongées à H₂O₂.

Après avoir été séché à l'air, le sol perd encore environ 30 % d'eau par chauffage à 900°. La perte d'eau est progressive.

La capacité d'échange de bases du sol après séchage à l'air est variable. Elle peut être élevée eu égard à la forte proportion de sable et atteindre 20 à 40 méq %. Elle est parfois plus faible avec le calcium qu'avec l'ammonium, et beaucoup plus faible avec le cobaltihexamine, alors qu'avec les sols ferrallitiques, les ferrisols, les sols bruns ou les vertisols riches en montmorillonite, les valeurs obtenues, dans les mêmes conditions, restent sensiblement les mêmes.

La somme des bases échangeables est variable, suivant l'intensité du lessivage, donc de la pluviométrie. L'état de saturation est souvent faible, parfois inférieur à 10 % dans les régions très humides. Les pH peuvent cependant demeurer relativement élevés même pour des degrés de saturation en bases faibles.

5.2 - Les subdivisions

Les matériaux amorphes qui constituent les sols à allophanes étant mal définis, ainsi que les liaisons entre les matières organiques et les substances minérales, il est possible de classer les allophanes, soit d'après des critères d'évolution pédogénétique, soit d'après des critères aisément mesurables qui se rapportent à leurs propriétés hydriques.

5.2.1 - CLASSIFICATION PÉDOGÉNÉTIQUE

Cette classification, basée sur le degré d'évolution, distingue les sols peu évolués et encore peu allophanisés sur cendres et ponces récentes, de texture encore relativement sableuse, des sols de texture pseudolimoneuse plus évolués, sans hydroxydes d'alumine, avec encore une forte proportion de silice, et enfin des sols riches en hydroxydes d'alumine et déjà très appauvris en silice.

Cependant, aucun caractère morphologique ne permet, sur le terrain, de distinguer les sols riches en gibbsite de ceux qui en sont dépourvus. L'un et l'autre peuvent avoir des caractéristiques hydriques similaires et très variées.

Il s'agit, en fait, d'une répartition géographique sur des dépôts d'âges différents où l'évolution a pu être plus poussée sur certains et l'élimination de la silice plus importante. L'examen des sables n'indique pas nettement des degrés d'altération très différents, comme c'est le cas, entre les sols à allophanes et les ferrisols, ou sols ferrallitiques. Tous les minéraux lourds sont, en général, transparents, ce qui montre qu'il s'agit de matériaux d'âges assez voisins.

Par contre, la composition minéralogique des sables des sols à allophane avec alumine, et celle des sols à allophane sans alumine, sont un peu différentes, prouvant ainsi qu'il s'agit de dépôts distincts en nature, donc aussi probablement dans le temps. Cette différence de composition ne pourrait pas, cependant, expliquer la présence ou l'absence de gibbsite. Le rapport hornblende/hypersthène est plus élevé dans les formations anciennes.

Dans les régions où les hydroxydes d'alumine n'existent encore qu'en petite quantité, la position topographique peut avoir une influence dans leur apparition.

Cette distinction entre allophane avec ou sans hydroxydes d'alumine est importante dans la pratique pour l'étude du phosphore du sol. Les teneurs en phosphore Truog paraissent directement influencées par la proportion d'hydroxydes d'alumine. Les allophanes riches en silice ont souvent un rapport P assimilable/P total assez élevé, voisin de 5 à 20 %. Les allophanes riches en gibbsite ont

presque toujours un rapport très faible, inférieur à 1 %, sauf prélèvements dans les semaines suivant la mise d'engrais. Il s'agit du phosphore apporté par les engrais, les fumures dans ces régions bananières étant très importantes et les teneurs en phosphore total souvent de l'ordre de 200 à 500 mg P_2O_5 % de sol.

Certains allophanes riches en alumine et très acides semblent provoquer des toxicités qui sont corrigées simultanément ou séparément par des apports de chaux ou de phosphate.

5.2.2 - CLASSIFICATION DE TERRAIN

La seconde classification, plus facile dans la pratique pour la cartographie, porte essentiellement sur l'intensité du caractère allophanique défini par l'humidité et l'écart des pF mesurés sur échantillons frais ou sur échantillons préalablement séchés à l'air. Comme nous l'avons dit, ces caractères sont relativement bien reconnaissables sur le terrain.

Cette dernière classification pourrait être la suivante :

5.2.2.1. - Les sols à allophanes (sous-classe ou groupe)

(La présence ou l'absence de gibbsite ou bayérite passe en deuxième ordre).

a - Allophanes à humidité constante (hydrandepts) : Ce sont des sols pseudolimoneux beiges ou jaune clair, onctueux, qui correspondent à l'orthotype qui a été décrit.

b - Allophanes à dessèchement temporaire de surface : Les horizons supérieurs sur une épaisseur variable (40 - 60 - 80 cm) ont déjà perdu irréversiblement une partie de leurs propriétés vis-à-vis de l'eau. Ils sont peu onctueux et plus friables.

c - Allophanes de transition vers les sols bruns ferrisoliques (ultiochrandepts) : Ils renferment déjà une certaine proportion d'argile métahalloysite ou halloysite. La texture est limono-argileuse. L'onctuosité n'apparaît plus qu'en profondeur. L'horizon humifère défini par sa coloration foncée est profond - 50 à 60 cm - bien que les teneurs en matières organiques ne soient pas supérieures mais parfois plus faibles que celles de l'orthotype dont les horizons correspondants de même profondeur sont beaucoup plus clairs. Il s'agit, soit d'une forme différente de matière organique due au dessèchement temporaire des niveaux supérieurs du profil, soit d'une autre forme d'association de la matière organique avec des allophanes qui ont perdu l'essentiel de leurs propriétés d'absorption pour l'eau. Il n'y a plus de différence entre les pF mesurés sur échantillons frais et ceux mesurés sur des échantillons préalablement séchés à l'air, mais la capacité en eau utile (pF 2,5 - pF 4,2) reste assez élevée.

d - Allophanes humifères d'altitude - hydrandepts et umbrandepts : On les rencontre en altitude généralement au-dessus de 500 m. La pluviométrie est élevée et la saison sèche très réduite. L'ensoleillement est faible.

Les sols sont très humifères, souvent spongieux en surface, avec des teneurs en matières organiques de l'ordre de 10 à 15 % dans les dix premiers centimètres.

Dans les zones encore plus humides, vers 700 à 1 200 m, les sols sont encore plus organiques, parfois rocheux. On observe alors souvent des veines ferrugineuses rouille, indiquant un engorgement en eau et des migrations ferrugineuses.

Des petites croûtes ferrugineuses peuvent être observées en profondeur sur des niveaux moins perméables. Les facteurs de pédogenèse, et en particulier ceux qui influencent la migration du fer, sont peut-être différents.

Les zones concaves à faibles pentes à drainage externe ralenti ont des sols franchement tourbeux avec des teneurs en matières organiques de 30 %.

5.2.2.2 - Les sols peu évolués AC à texture particulière sur cendres et ponces allophaniques. Lithosols. Entlumbrandepts

Il s'agit de matériaux quaternaires, cendres et ponces en bancs alternés dans l'ensemble encore peu altérés, et ayant conservé une texture sableuse ou graveleuse.

L'allophanisation se caractérise sur le terrain par une légère cohérence des particules sableuses. Cette cohésion est d'autant plus nette que la proportion d'allophanes est importante. Les cendres non allophaniques pour des teneurs en matières organiques analogues ont une texture particulière.

Les ponces peuvent être plus ou moins altérées. Elles ont conservé souvent leur aspect originel gravillonnaire, mais s'écrasent plus ou moins aisément entre les doigts en cédant beaucoup d'eau.

La capacité en eau utile mesurée sur échantillons frais peut être très élevée : 40 à 50 % de sol séché à l'étuve, ce qui paraît surprenant pour des sols ayant une texture sableuse faiblement cohérente. Le rôle de la matière organique reste à préciser, surtout dans les régions très humides d'altitude.

5.2.3 - DISCUSSION

Ces sols dérivent de couches successives très épaisses de projections sableuses ou graveleuses. La perméabilité de la roche mère est très importante et les eaux d'infiltration ne sont pas ralenties en profondeur comme dans le cas des sols ferrallitiques. L'entraînement des substances dissoutes serait si intense que la néo-synthèse de la kaolinite ne pourrait pas se produire.

Dans un premier stade, sur des matériaux encore peu altérés, il y aurait formation d'allophanes encore riches en silice et dépourvus d'hydroxydes d'alumine.

Dans un deuxième stade, les hydroxydes d'alumine s'individualiseraient (gibbsite ou bayérite) suivant les endroits et en quantité d'autant plus importante sur une formation de même âge que la pluviométrie serait plus élevée. Des petites poupées boursouflées ou des filaments de gibbsite peuvent ainsi être observés dans des niveaux profonds très humides ou en bordure de petits thalwegs.

Le terme ultime d'évolution dans le cas où la perméabilité se maintient semble être une bauxite.

L'humidité constante favorise le maintien de ces substances amorphes très hydratées. Dans certaines régions, les horizons de surface ont déjà subi sur une épaisseur variable une dessiccation irréversible plus ou moins poussée. En profondeur, au-dessus des niveaux argileux des sols plus anciens, qui ont été recouverts par ces formations récentes, nous avons observé parfois des poches d'argile halloysite hydratée, presque pure, blanche.

6 - LES SOLS BRUNS ET BRUN-ROUILLE A MÉTAHALLOYSITE ET HALLOYSITE SUR FORMATIONS VOLCANIQUES PERMÉABLES.

- Sols bruns ferrisoliques
- Ferrisols bruns
- Sols bruns tropicaux ou bruns eutrophes

Sols à "pédon Cambique"

Ce sont des sols formés sur des projections perméables graveleuses ou cendreuses relativement récentes, dont les éléments sableux peu altérés non quartzeux sont encore visibles dans tout le profil : pédon cambic.

Suivant les conditions climatiques et le temps d'altération, ces sols se rapprochent des ferrisols, des sols ferrallitiques ou des sols bruns peu évolués.

Dans la littérature, on les rencontre sous les noms : latosolic brown forest soils, ou lithosols pour les plus sableux, ou Initial rubrozems ...

6.1 - Caractéristiques générales

a - FACTEURS DE FORMATION

Climat

La pluviométrie annuelle varie de 1 300 à 2 500 mm. Une série de faciès morphologiquement différents correspondent à ces variations. Cependant, la plupart des sols se rencontrent sous des pluviométries voisines de 1,8 m à saison sèche peu marquée, donc sous un climat très semblable à celui des ferrisols déjà décrits.

Roche-mère - Géomorphologie

Il s'agit de projections cendreuse ou ponceuses andésitiques ou dacitiques perméables. Certaines datent du pliocène, mais d'autres seraient plus récentes. Le relief comporte souvent de longues bandes en faibles pentes qui correspondent à des dépôts meubles épais, ou des collines accidentées lorsque l'épaisseur du dépôt sur les formations brècheolides dures anciennes est faible.

b - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

L'aspect du profil est le suivant :

Horizon A

Il est brun foncé et en général plus léger que l'horizon sous-jacent, avec une bonne structure. Il est rendu parfois plus sableux par des apports plus récents de cendres. La transition vers l'horizon B est graduelle.

Horizon B

C'est souvent un horizon B1. B2 est parfois peu différencié, de couleur et parfois de texture ("cambic"). L'épaisseur est rarement supérieure à 1,20 m.

La **couleur** est brun rouille **foncé** caractéristique (voisin de 7,5 YR 4/4 mais plus rouille) devenant souvent plus claire de deux "values" environ sur le sol séché à l'air. On observe un changement fréquent de couleur entre le sol en place et le sol écrasé entre les doigts.

La **texture** est argilo-sableuse à argileuse. Le sol n'est pas plastique, parfois légèrement gras.

La **structure** d'ensemble est peu nette. La sous-structure est polyédrique fine avec des revêtements souvent nets et luisants sur les agrégats qui prennent un aspect plus terne lorsqu'on les écrase entre les doigts.

La perméabilité est bonne. Le caractère anguleux des agrégats paraît d'autant plus accentué que l'évolution du sol est poussée (région humide et dépôts anciens). Le sol est relativement friable à l'état frais ou légèrement humide, mais il devient ferme lorsqu'il est sec.

Il y a plus ou moins de débris d'altération dans les sables : hypersthène, hornblende, augite. Les minéraux noirs sont bien visibles.

En profondeur, on observe parfois des taches et des films ferromanganiques brunâtres. Il peut s'agir d'une hydromorphie de pente due à une circulation d'eau oblique dans les niveaux plus grossiers.

Horizon B 3

Son épaisseur est inférieure à 40 cm. Il est très graveleux avec des taches et des films ferromanganiques.

Horizon C

On passe rapidement à l'horizon C ou 11C. Ce dernier est fréquemment formé de projections graveleuses ou caillouteuses plus grossières que celles qui ont donné naissance à l'horizon B. Pour cette raison, elles sont souvent moins altérées.

c - CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES

Le minéral argileux est du type métahalloysite. Aux rayons X, les raies observées à 7,3 - 7,4 Å sont inférieures, en intensité, à celles proches de 4,4 Å. A l'analyse thermique différentielle, le crochet endothermique à 550° est important. Ce minéral est associé à de petites quantités de gibbsite et de goéthite. Il y a souvent de l'halloysite à 4 molécules d'eau (les raies à 10 Å passent à 7,3 Å après chauffage). Celle-ci a pu souvent passer inaperçue, beaucoup d'échantillons ayant été étudiés après séchage à 100°.

Les faciès à texture apparente plus légère, proches des allophanes de transition, contiennent une certaine proportion de substances amorphes qui ont perdu irréversiblement leurs fortes capacités pour l'eau.

Quand on s'éloigne des sols à allophanes vers les régions plus sèches, l'apparition de la métahalloysite (et halloysite) est progressive et la cristallisation semble s'améliorer. Les raies à 7,4 - 7,7 Å, d'abord très faibles, deviennent plus intenses, moins larges. Leur intensité approche de celle des raies situées à 4,4 Å. Les crochets à l'analyse thermique différentielle sont plus importants et passent de 500 à 550°, puis 570°. Les faciès les plus évolués renfermeraient un mélange de kaolinite et de métahalloysite (ou halloysite) avec une dominance de cette dernière.

Sur les formations récentes, il n'y a pas de gibbsite, comme d'ailleurs dans les sols à allophanes situés en zones plus humides et sur ces mêmes formations. Sur les formations plus anciennes qui ont donné naissance, dans les zones plus humides, à des allophanes riches en gibbsite ou bayérite, on observe souvent aussi une petite quantité de gibbsite, du moins dans les régions encore bien arrosées.

La goéthite n'apparaît que progressivement. Avec des rapports fer libre/fer total de 40 % et des teneurs en valeur absolue de 4 à 5 %, la goéthite est rarement visible aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle. Elle ne devient visible que dans les faciès plus évolués dans le sens ferrallitisation où les teneurs en fer libre peuvent atteindre 7 à 8 % et représenter 60 % du fer total.

Les faciès des zones les plus sèches ne contiennent que de la métahalloysite, avec des substances amorphes et parfois de la montmorillonite.

Les sables contiennent encore de nombreux minéraux altérables : hypersthène, hornblende, augite, andésine, zéolithes (analcime surtout). Le degré d'altération des sables est souvent assez proche de celui des sols à allophanes situés en régions plus humides. Dans les zones sèches, les sables sont souvent peu altérés. Dans les zones humides et sur les formations plus anciennes où la ferrallitisation et l'altération sont plus poussées, les minéraux lourds opaques sont en plus forte proportion ; dans les cas extrêmes, ils sont tous opaques.

La composition des sables varie suivant les dépôts aériens, mais ne semble pas avoir d'influence sur l'évolution du sol. Elle permet seulement de repérer les formations plus anciennes qui contiennent 40 % de hornblende et moins d'hypersthènes (50 %) dans la fraction lourde que les formations récentes riches en hypersthènes (80 %) et dépourvues d'hornblende. Les zéolithes se retrouvent dans toutes les formations : analcime, heulandite.

La distinction entre formations mères d'âges différents ne présente d'ailleurs d'intérêt que dans la zone de contact. En zones sèches ou en zones très humides, c'est le climat qui imprime son influence prépondérante quel que soit l'âge de la formation.

d - CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

Elles sont voisines, dans l'ensemble, de celles des ferrisols. Ces sols en diffèrent essentiellement par l'importance et l'abondance des minéraux altérables dans la fraction sableuse, elle-même en général plus importante.

Les teneurs en matières organiques en dépit de la coloration foncée sont analogues à celles des ferrisols et des sols ferrallitiques et varient avec l'altitude.

La teneur en argile varie entre 30 et 60 %, rarement 70 %, dans l'horizon B. Les teneurs sont généralement plus faibles en surface, mais il s'agit souvent de recouvrements plus récents de cendres.

Les teneurs en limon (2 - 20 microns) sont de l'ordre de 15 à 25 % ; le rapport limon/argile est donc bien supérieur à 15 %.

La somme des bases échangeables est rarement inférieure à 12 méq/100 g et l'état de saturation en bases est voisin de 60 à 70 %. Le pH est rarement inférieur à 5,5. Certains faciès plus évolués sont plus pauvres en bases et plus acides, plus désaturés, 30 %.

6.2 - Les subdivisions

La pluviométrie et l'âge des matériaux originels, qui conditionnent l'intensité et la durée de l'altération et de l'évolution, sont les deux facteurs responsables des divers faciès.

6.2.1 - L'ORTHOTYPE (sol brun ferrisolique, ou mésotrophe). Il peut se présenter sous divers faciès qui diffèrent entre eux :

- soit par la granulométrie. Certains faciès sont franchement argileux, d'autres sablo-argileux,
- soit par la texture apparente (ou la cohésion). Ces sols semblent devenir de plus en plus légers quand on passe des régions les plus sèches vers les régions les plus humides. Cette plus grande légèreté peut être attribuée à l'augmentation des caractères allophaniques quand il s'agit du même dépôt. Dans les zones sèches, les sols deviennent franchement plus compacts, sans qu'il y ait augmentation des teneurs en argile ;
- soit par des symptômes d'hydromorphie. Certains sous-faciès, avec pourtant un drainage externe correct, présentent en abondance des revêtements et des films luisants ferromanganiques qui disparaissent quand on passe aux sols plus perméables des régions humides. S'agit-il d'une évolution particulière du fer sous certaines pluviométries modérées ?

6.2.2 - LES INTERGRADES CLIMATIQUES VERS LES SOLS A ALLOPHANES ("ultic ochrandept")

On les rencontre dans les régions plus humides à saisons sèches peu marquées.

La texture apparente est argilo-limoneuse. Les taches ou les veines luisantes ferromanganiques, dues à une certaine hydromorphie ou aux migrations des hydroxydes, sont rares ou peu exprimées. Le sol est perméable.

L'horizon de surface est de couleur toncée sur au moins 50 cm (cf. sols à allophanes de transition).

6.2.3. - LES SOLS BRUNS OU SOLS PEU ÉVOLUÉS DE ZONES SÈCHES (andeptic hapludoll)

Il s'agit de régions à pluviométries plus faibles, de l'ordre de 1 000 à 1 300 mm et à saison sèche marquée. Le sol se dessèche complètement sur une certaine épaisseur durant quelques semaines.

La coloration va du brun rouille foncé au brun beige, suivant les formations, et s'éclaircit en séchant. L'épaisseur du profil dépasse rarement un mètre et souvent même 60 cm. La transition avec l'horizon d'altération et la roche mère est brutale, avec de nombreuses taches ferromanganiques.

La métahalloysite et les substances amorphes sont dominantes et peuvent être associées à un peu de montmorillonite. Bien que riches en éléments sableux ou graveleux peu altérés et de texture argilo-sableuse, les sols sont souvent compacts et plus ou moins gras et même adhérents. Le degré de saturation est élevé et le pH compris entre 6 et 7.

6.2.4. - LES INTERGRADES VERS LES SOLS FERRALLITIQUES

Il s'agit de sols formés sur des matériaux plus anciens qui ont évolué davantage dans le sens de la ferrallitisation sous des climats humides (2 m) à courtes périodes sèches. Les minéraux altérables des sables sont moins abondants et, dans certains cas, peuvent avoir disparu (sables lourds opaques). Il s'agit alors de sols ferrallitiques de coloration brune.

Le degré d'évolution dans le sens ferrallitisation influence aussi la texture apparente. Celle-ci est relativement friable, bien que les sols soient riches en argile (70 %). Les agrégats sont nettement plus anguleux que dans l'orthotype, la capacité d'échange de base est plus faible et l'état de saturation en bases souvent peu élevé (30 %).

6.3 - Discussion

Sur les projections fines ou graveleuses très perméables, on passe progressivement des sols à allophanes aux diverses variantes des sols bruns. Il y a donc une modification brutale de l'évolution qui s'observe très bien sur le terrain par la variation des caractères morphologiques.

En passant ainsi des régions très humides sans déficit en eau, à des régions à déficit en eau plus marqué, on observe l'apparition progressive de la métahalloysite (ou de l'halloysite) et la disparition simultanée des caractères allophaniques de ces sols, qu'il s'agisse des sols à allophanes riches en gibbsite ou de ceux riches en silice. Le phénomène est d'abord sensible dans les horizons supérieurs plus sujets à dessiccation que les horizons profonds. Les sols deviennent de plus en plus argileux. La formation de métahalloysite à partir du stade allophanique paraît donc un processus normal, ce stade pouvant avoir une plus ou moins grande importance suivant les régions.

L'approfondissement de l'horizon humifère défini par sa teinte foncée, qui accompagne l'apparition de la métahalloysite n'est-il qu'une conséquence de la dessiccation irréversible des substances amorphes, entraînant une modification des liaisons avec la matière organique ? S'agit-il, au contraire, d'un changement de nature même de la matière organique, sous l'influence de la dessiccation saisonnière ?

L'individualisation du fer dans ces sols est encore peu poussée (fer libre/fer total 40 à 50 %) et les minéraux des sables altérables encore abondants.

Dans les zones à déficit en eau marqué, l'individualisation du fer est moins importante (fer libre/fer total 30 %). Les sols sont plus compacts, bien que les teneurs en argile soient plus faibles et les sables plus abondants.

Dans les régions humides et sur des formations un peu plus anciennes, l'évolution plus poussée vers la ferrallitisation provoque une augmentation de la proportion d'argile kaolinique et d'hydroxydes de fer, dont l'association donne au sol un caractère plus friable. Les sols les plus évolués ont des agrégats déjà nettement anguleux et sont plus désaturés.

7 - CONCLUSION

La jeunesse de certains matériaux originels aux Antilles, soit par suite de l'érosion, soit par suite d'apports volcaniques aériens plus récents, est une des raisons principales des gammes étendues de sols que l'on rencontre à différents stades d'évolution.

La perméabilité variée des matériaux originels, pourtant de composition minéralogique voisine, et les différences climatiques très importantes influencent non seulement le sens général d'évolution mais aussi l'intensité et la rapidité d'évolution.

A certaines pluviométries semblent correspondre des stades au delà desquels l'évolution devient très lente. Les sols paraissent alors en équilibre avec le milieu naturel. Une des difficultés majeures de la classification réside précisément dans l'appréciation de cet état d'équilibre vers lequel tendent apparemment certains sols ou qui est atteint.

Sur matériaux durs et peu perméables, l'évolution des minéraux argileux a lieu lentement par tranches successives peu épaisses. Si cette évolution vers le type climatique final est déjà très poussée dès la base du profil, près du niveau d'altération, tous les horizons ont alors sensiblement les mêmes caractéristiques (cas des sols ferrallitiques et vertisols).

Par contre, si cette évolution est progressive de bas en haut du profil, l'ablation d'horizons supérieurs nécessitera la distinction sur le terrain de types de sols parfois très différents qui correspondent pourtant dans certains cas aux différents horizons d'un même profil complet (intergrades ferrisols-vertisols, ..).

Sur matériaux perméables cendreaux, l'altération ayant lieu simultanément sur une grande épaisseur donne naissance en peu de temps à un sol profond relativement uniforme sur tout le profil mais souvent encore loin de son état d'équilibre climatique avec d'abondants minéraux primaires altérables ; l'érosion n'entraîne pas de modification dans les types de sols inventoriés.

La classification des sols ferrallitiques et des vertisols ne semble pas poser de problèmes, surtout pour les vertisols, bien définis par les caractères morphologiques du profil.

Le concept des ferrisols s'applique bien aux sols à horizon B compact qu'il faut considérer comme des intergrades vertisols-ferrallitiques très proches de ces derniers, dont ils possèdent déjà certains de leurs caractères et vers lesquels ils évoluent. L'état de saturation en bases dépasse cependant la limite supérieure retenue dans la définition des ferrisols.

Par contre, les faciès plus compacts placés provisoirement en intergrades vertisols-ferrisols et ceux qui sont franchement montmorillonitiques, s'éloignent tellement des sols ferrallitiques par l'aspect morphologique du profil et leurs propriétés, qu'il est vraiment difficile de considérer ces sols comme des ferrisols, sols proches des ferrallitiques. La ferrallitisation paraît un des phénomènes d'évolution, mais il semble que par suite des conditions climatiques ou parfois d'hydromorphie, elle ne dépasse pas un certain stade. La faible proportion des minéraux altérables dans les sables indiquerait pourtant qu'il s'agit d'une altération déjà très ancienne.

Pour divers caractères comme la compacité à l'état frais, la présence dans le profil d'argiles hydratées, l'altération montmorillonitique, les liaisons fer/argile probablement différentes de celles qui dans les sols ferrallitiques sont responsables de la friabilité des sols, il semble préférable de donner à ces sols un nom particulier et de conserver pour les ferrisols la définition admise au lieu de l'élargir. Il s'agirait ainsi d'un ensemble de sols placés entre les vertisols et les sols ferrallitiques ou les ferrisols, de la même façon que les sols ferrugineux ou ferrallitiques, en climat plus sec et sur des matériaux plus grossiers, forment des intermédiaires entre les sols sub-arides et les sols ferrallitiques, l'évolution ferrallitique étant aussi arrêtée climatiquement à un certain stade.

Le passage des sols ferrallitiques aux sols des zones arides sur les matériaux altérés perméables a lieu en fait bien souvent sans qu'il y ait tendance à apparition de caractères vertisoliques, comme c'est aussi le cas aux Antilles, sur les matériaux volcaniques cendreux récents depuis les sols à allophanes jusqu'aux sols bruns peu évolués encore très perméables et riches en sables.

Sur les formations volcaniques dures ou peu perméables dont presque tous les éléments minéraux sont très altérables et altérés, l'argilisation des sols est importante et les teneurs en sables faibles. Ces facteurs, avec la richesse en bases, favorisent une évolution, dans les premiers temps au moins, à caractère nettement plus vertisolique que celle qui affecterait des matériaux originels plus riches en quartz, donc des sols plus sableux (sur granites, gneiss, schistes, arkoses) situés sous des climats identiques.

En distinguant plusieurs faciès, on pourrait ainsi faire rentrer dans cette catégorie de sols nouvellement définie : les sols intergrades ferrisols-vertisols, les sols rouges montmorillonitiques et bien des sols rouges ou bruns à montmorillonites ou argiles hydratées (halloysite, substances amorphes) plus ou moins compacts, que l'on trouve sous des climats variés sur des roches basiques récentes ou anciennes et que l'on classe souvent en bruns-eutrophes en dépit d'une individualisation des hydroxydes de fer qui semble marquée d'une acidification et d'un début d'évolution ferrallitique déjà nets.

Le terme "brun tropical" concernerait les sols encore jeunes, peu évolués, peu acides, riches en éléments primaires altérables sur tout le profil, sables, graviers ou cailloutis, perméables et généralement situés en position bien drainée.

*

Quelques difficultés apparaissent aussi pour intégrer les sols issus de formations perméables dans la classification française. Les sols très jeunes sur cendres qui, ne renfermant encore que de faibles quantités de métahalloysite ou de substances amorphes hydratées, correspondent aux sols peu évolués d'origine non climatique à pédoclimat permettant l'évolution du sol.

Cela devient plus délicat pour les sols fortement allophanisés. Ceux qui renferment beaucoup de gibbsite pourraient être placés parmi les sols ferrallitiques, mais ceux qui en sont dépourvus et qui renferment encore beaucoup de silice, pourraient rester parmi les sols peu évolués. Or, morphologiquement, ces sols sont très semblables et possèdent les mêmes propriétés de rétention très importantes pour l'eau et autres caractères particuliers des sols à allophanes. Les hydroxydes de fer sont rarement décelables et il est possible que le fer demeure peu individualisé et plus ou moins inclus dans le réseau allophanique.

Pour ces raisons, il semble préférable de conserver groupés les sols à allophanes comme c'est le cas dans la septième approximation USDA. Les sols encore riches en silice seraient des "entic"., ceux riches en gibbsite, des "ultic"., ou des "oxic".. Seuls les termes bauxitiques des sols à allophanes et des sols ferrallitiques seraient voisins.

Les sols à allophanes que nous avons étudiés sont encore relativement riches en sables peu altérés, et les substances amorphes semblent d'abord provenir de l'altération des verres. Quelle sera l'évolution des produits d'altération des hypersthènes, andésines, labradors, hornblendes... A ce jour, dans la région étudiée, malgré la présence par endroits d'altération poussée, se traduisant par beaucoup de minéraux opaques parmi les minéraux lourds, on n'observe toujours pas de métahalloysite quand le milieu demeure bien perméable en profondeur.

La distinction que nous avons faite entre les sols à allophane avec leurs propriétés d'absorption très importantes pour l'eau, et les sols à proportion variable de métahalloysite et de substances amorphes, mais ayant déjà perdu irréversiblement une partie des propriétés vis-à-vis de l'eau, permet de fixer une limite très précise entre ces deux ensembles, qui correspond à des caractères physico-chimiques, minéralogiques (absence ou présence de métahalloysite en quantité notable) et surtout morphologiques. Le concept des sols à allophanes pourrait être étendu à l'ensemble des sols renfermant des substances amorphes, mais il devient alors difficile de fixer des limites surtout quand ces substances deviennent délicates à déceler, par exemple en présence de montmorillonite et d'halloysite.

L'assimilation à un faciès de ferrisols, des sols brun rouille à métahalloysite situés à proximité des allophanes en climat humide, semble valable. Les plus évolués seraient déjà des sols ferrallitiques. La perméabilité de ces formations favorise d'ailleurs la ferrallitisation.

Les sols moins ferrallitisés renfermant peu d'hydroxydes individualisés, bien que riches en métahalloysite, correspondraient, par certains côtés, au concept des sols bruns tropicaux, par d'autres à celui des ferrisols et la dénomination sols bruns ferrisoliques semble leur convenir.

Dans les régions plus sèches où les hydroxydes de fer sont peu individualisés, la fraction argileuse étant surtout constituée de substances amorphes et de métahalloysites, parfois de montmorillonite, il s'agirait vraiment de sols bruns tropicaux, à pédo-climat chaud et temporairement humide, pris dans le sens de sols encore jeunes, peu évolués et généralement bien saturés en bases.

On peut se demander s'il ne serait pas utile, à un niveau élevé de la classification, d'introduire ce concept des sols brun-rouille tropicaux à métahalloysite, apparentés aux sols à allophanes, aux ferrisols et aux sols ferrallitiques, aux sols bruns mésotrophes ou eutrophes tropicaux. Les études en cours devraient aider à connaître les raisons de cette coloration brune foncée à l'état humide de l'ensemble de ces sols à métahalloysite et halloysite. Toutefois, à la différence des sols à allophanes aux propriétés si particulières, les caractéristiques physico-chimiques de ces sols concordent avec celles des sols des différentes classes, sous-classes ou groupes où il est possible de les placer.

Dans des notes ultérieures nous préciserons l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de chacune des principales catégories de sols et, en particulier, de celles des sols à allophanes des Antilles et d'Equateur. Nous indiquerons également les conséquences agronomiques importantes qui en dérivent.

Nous adressons nos vifs remerciements à MM. SEGALEN et MAIGNIEN, du service des sols de l'O.R.S.T.O.M. qui ont bien voulu relire ce texte et nous guider dans le choix de certains termes de classification pour qu'ils s'appliquent à des sols voisins de ceux qu'ils connaissent particulièrement bien en Afrique sous ces dénominations créées pour eux.

8 - BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.) - 1962 - La classification des sols. La classification pédologique française. *Cah. Pédologie O.R.S.T.O.M.*, 3, 1-8.
- BOTELHO DA COSTA (J.) - 1959 - Ferrallitic, tropical ferrallitic and tropical semi-arid soils. *C.R. 3ème Conf. interafricaine Sols, Dalaba*, 317-319.
- ELLIS (B.G.), MORLAND (M.M.) - 1963 - Heat of desorption of ammonia and simple organic materials from bentonite. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.*, 27, 1, 21-25.
- GRIM (R.E.) - 1953 - *Clay Mineralogy*. Mc Graw Hill, London, 384 p.
- KAZUTAKE (K.), KAWAGUCHI (K.) - 1954 - Oxidative changes of polyphenols. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.*, 28, 371-377.
- MAIGNIEN (R.) - 1961 - Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques au Sénégal. *African Soils*, 2-3, 113-228.
- MAIGNIEN (R.) - 1964 - Les sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques. Conférences à l'Université de Louvain.
- U.S.D.A. Soil Survey Staff - 1960 - *Soil classification. A comprehensive system, 7th approximation*, 265 p.