

ÉTUDE PÉDOLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS DES VOLTA BLANCHE ET ROUGE EN HAUTE VOLTA

2^e partie : LES VERTISOLS *

par

B. KALOGA **

INTRODUCTION

1^o La classification des sols des bassins des Volta Blanche et Rouge.

a/ Les principes fondamentaux de la classification pédologique.

La classification utilisée est celle qui a été présentée par AUBERT et DUCHAUFOR en 1956 et qui a été modifiée par AUBERT successivement en 1958, 1962 et 1963. Ses principes de base ont été exposés par DUCHAUFOR dans son Précis de Pédologie (1961) et par AUBERT dans ses cours de pédologie à l'O.R.S.T.O.M. Il est bon de les rappeler au début d'une étude orientée vers la pédogenèse et les problèmes de classification.

C'est une classification génétique où les caractères pris en considération traduisent de manière effective les phases de formation et de l'évolution du sol ; les sols sont alors groupés en fonction de leur parenté génétique" (DUCHAUFOR 1961). Ces caractères qui servent à différencier les classes sont définis sur la base des critères fondamentaux suivants (DUCHAUFOR 1961) :

- le développement du profil en liaison avec le degré d'évolution
- le mode d'altération climatique
- le type de matière organique et son influence sur l'évolution des sols
- l'hydromorphie.

Dix classes ont été ainsi définies, dont une seule (la classe des Vertisols) s'écarte dans sa définition de ces principes de bases.

A l'intérieur des classes, les sous-classes sont souvent différenciées d'après le facteur écologique de base qui conditionne l'évolution (climat, roche-mère, conditions de station influençant le régime hydrique).

Les groupes se différencient par une particularité du processus : intensité d'altération, degré de lessivage. Les sous-groupes se différencient par une intensité variable du processus d'évolution caractérisant le groupe ou par la manifestation d'un processus secondaire se superposant au processus fondamental.

* la 1^{ère} partie de cet article : Le milieu naturel in Cah. ORSTOM. sér. Pédol. IV.1, 1966.

** Chargé de Recherches ORSTOM. Centre de Hann-Dakar.

Les familles sont définies par la nature du matériau originel. La complexité des matériaux dans les zones prospectées (les apports polyphasés étant presque de rigueur) rend ici la définition des familles trop complexe dans certains cas et est responsable alors d'une certaine interférence entre elles. Elle est aussi à l'origine des difficultés de classification qui font qu'on est obligé de considérer une seule des phases des matériaux à l'échelon le plus élevé de la classification. C'est ainsi qu'en ce qui concerne les sols à pseudogley à concrétions et taches sur arène granitique argilo-sableuse (Sols Hydromorphes), c'est l'évolution de l'arène granitique sous-jacente aux apports récents peu évolués mal drainés qui a été retenue au niveau de la classe.

Le principe est discutable, mais nous n'avons pas le choix, car la solution s'avèrera toujours imparfaite lorsqu'on applique une classification de sols simples à des sols complexes, tant par leur genèse que par leurs matériaux constitutifs.

La conception de la série se ressent beaucoup de cette complexité et elle ne peut en aucun cas atteindre la rigueur de la définition donnée par le groupe de travail de la Moyenne Echelle de la Carte de France, à savoir que "les profils d'une même série sont semblables non seulement par la succession, l'aspect et la constitution générale de leurs divers horizons, mais aussi par l'ordre de grandeur de l'épaisseur de chacun". La série est basée ici sur les différenciations du processus indiqué au sous-groupe (il a alors rang de faciès en fait) et sur des différenciations de détail du profil : variations dans le matériau originel, phénomènes de recouvrement, structure de surface ... Il s'agit donc en fait de groupement de séries et le terme sera souvent employé au pluriel.

Les types et les phases sortent du cadre d'une étude au 1/200 000ème dans une zone si complexe.

b/ La classification des sols des bassins versants des Volta Blanche et Rouge.

Six classes sont distinguées :

- Les Sols Minéraux Bruts
- Les Sols Peu Evolués
- Les Vertisols et Paravertisols
- Les Sols à Mull
- Les Sols Halomorphes
- Les Sols Hydromorphes.

En ce qui concerne les Sols Minéraux Bruts, l'importance et l'origine des lithosols qui constituent cette classe, ont été largement évoquées dans l'étude du milieu naturel, chapitre géomorphologie, (KALOGA, 1966)

Le principe de classification adopté, et qui ne fait intervenir les recouvrements superficiels qu'au niveau de la série a réduit énormément l'importance des Sols Peu-Evolués, limités dès lors à quelques familles sans grande extension et sans grand intérêt pédologique, dont l'étude ne sera pas abordée ici. Les Sols à Mull et les Sols Halomorphes feront l'objet de la troisième partie de l'étude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge dont la quatrième partie sera consacrée aux Sols Hydromorphes et la deuxième partie (étude présente) aux Vertisols.

2° Définitions et principes de la classification des Vertisols.

La classe des Vertisols correspond aux sols d'argiles noires ou d'argiles foncées des anciennes classifications françaises. Ces dernières retenaient leurs caractères de sols à engorgement temporaire (classe des Sols Hydromorphes) d'origine pétrographique (AUBERT, 1963). La nouvelle classification retient principalement des caractères physiques surtout d'ordre structural : "Structure polyédrique ou prismatique large et grossière, accompagnée d'une macroporosité extrêmement faible des blocs sur au moins la moitié du profil", et la couleur foncée relativement à la teneur en matière organique.

Les sous-classes sont définies par des caractères de pédoclimat qui correspondent à des différences de position topographique. On distingue ainsi deux sous-classes :

- Les Vertisols et Paravertisols à pédoclimat très humide pendant de longues périodes : Vertisols Hydromorphes.
- Les Vertisols et Paravertisols à pédoclimat seulement temporairement humide : Vertisols lithomorphes.

La différenciation des groupes est basée sur la présence ou l'absence d'un horizon grumosolique sur au moins 20 cm. Les deux groupes ainsi différenciés dans chaque sous-classe sont :

- groupe à horizon de surface à structure fine
- groupe à horizon de surface à structure large.

Mais les caractères structuraux des horizons de surface sont souvent si fluctuants dans le même profil que l'on se demande parfois s'ils peuvent même apparaître au niveau de la série. Par ailleurs, il n'existe que rarement un type structural bien défini. Le plus souvent, il y a une structure première qui peut être grossière, et des sous-structures à développement variable pouvant par endroits masquer la structure première par leur bon développement. Les termes structure première, sous-structure et sur-structure, inspirés de HENIN et al. (1960), ne font intervenir que le degré de développement relatif des différentes structures observées. Mais d'un point de vue absolu, ce n'est pas la structure première qui importe, mais l'agrégat élémentaire final lorsqu'il est bien individualisé. A cet égard, dans leur grande majorité les Vertisols appartiennent ici au type polyédrique moyen à petit, ce qui justifie leur position dans le groupe à structure fine en surface. Par ailleurs, les horizons superficiels, par la finesse relative à leur structure, se comportent toujours comme un "mulch" naturel, ce qui distingue ces sols de ceux qui ont une structure large dès la surface.

Une autre difficulté de classification vient des phénomènes de recouvrement. On sait qu'ils sont une caractéristique fréquente dans les régions étudiées (*). Le problème qui se pose alors est celui de savoir si l'on classe d'abord les recouvrements ou le matériau recouvert.

C'est la deuxième solution qui a été choisie ici, et les recouvrements n'interviennent qu'au niveau de la série tant que leur épaisseur n'excède pas 40 à 50 cm (elle est généralement bien inférieure à ces chiffres).

Cette classification se justifie par le fait que les argiles vertiques, même recouvertes, ont une très grande influence sur la pédogenèse des recouvrements. Par ailleurs, tous les stades intermédiaires entre le vertisol typique et le vertisol à fort recouvrement sont représentés. Il fallait donc adopter une limite artificielle pour éviter la multiplication des groupes et des sous-groupes.

C'est en fonction de toutes ces considérations, qu'a été retenue, à l'intérieur des Vertisols, la classification exposée dans le plan d'étude.

(*) cf. chapitre géomorphologie dans la première partie (Kaloga, 1966).

1 - LES TYPES MORPHOLOGIQUES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

1.1 - Sous classe des Vertisols à pédoclimat très humide pendant de longues périodes.

Vertisols hydromorphes à horizon de surface à structure fine.

Vertisols hydromorphes moyennement structurés sur argiles lourdes.

Le profil VRG 14 représente un type central de la morphologie de ces sols.

PROFIL VRG 14

Situation Au km 3,9 sur la piste de Bétaré à Nobéré.

Zone plane basse, hydromorphe en surface avec un réseau de fines fentes de dessiccation, nombreux rejets de vers de terre.

Végétation Elle est typique de ce type de sol. C'est la savane arbustive à *Combretum* sp. arborescents (ghal-lense ?) ; *Bauhinia* sp. d'où émergent quelques arbres : *Pterocarpus erinaceus*.

Description

- 0 - 19 cm Brun gris très foncé (J 82)* ; humifère ; texture argileuse ; structure polyédrique grossière à tendance prismatique bien développée, surstructure prismatique large également bien développée ; aspect brisé.
- 19 - 100 cm Gris-rouge foncé à taches brun-rouille dans le haut (F 41) passant au brun-rouge (F 42) par endroits en raison de taches ferrugineuses ocre-jaune, et restant brun-rouge en profondeur ; texture argileuse ; structure prismatique large très bien développée par de grandes fentes de retrait verticales avec dans le haut (19-40 cm environ) une sous-structure polyédrique très grossière, à nette tendance prismatique ; à partir de 40 cm, structure prismatique large, à faces de décollement patinées donnant vers le bas de belles patines luisantes ; cohésion très forte.
- 100 - 130 cm Gris à taches ocre ; texture argileuse ; structure prismatique à bases obliques patinées ou à tendance patinée ; dans le bas de l'horizon, sous-structure prismatique aplatie à bases obliques patinées et striées ; présence de revêtements argileux gris sur les faces verticales des agrégats ; on note dans le haut une phase à sables grossiers quartzeux et feldspathiques marquant la base de l'horizon précédent, c'est-à-dire la base des apports.

Ce profil est situé dans l'environnement d'une zone de cuirasse démantelée et à évolution de type ferrugineux tropical.

Il a la morphologie typique d'un vertisol :

- profil assez peu différencié sur une grande profondeur (jusqu'à 100 cm ici),
- couleur foncée relativement à la teneur en matière organique,
- structure prismatique large en profondeur, très bien développée,
- phénomènes mécaniques dûs aux remaniements internes bien marqués : grandes fentes de dessiccation, faces de glissement obliques patinées et striées,
- cohésion très forte.

(*) - Code expolaire A. CAILLEUX et G. TAYLOR, Boubée, Paris.

L'influence de l'hydromorphie d'origine topographique, se superposant à l'hydromorphie d'origine pétrographique caractéristique de ces sols, se traduit par une ségrégation ferrugineuse qui n'apparaît pas normalement dans les vertisols lithomorphes. Cette hydromorphie se traduit aussi par une accumulation de matière organique relativement forte en surface (3,2 %). La teneur en matière organique s'abaisse ensuite assez brutalement dans le deuxième horizon, tout en gardant encore une valeur relativement bonne (0,95 %) qui se maintient assez bien jusqu'à 100 cm (0,70 %). Corrélativement, le rapport C/N de l'horizon de surface (17,1) témoigne d'une matière organique mal décomposée, tandis que celui des deux prélèvements du deuxième horizon témoigne d'une matière organique assez bien évoluée, mais pas encore assez pour des horizons de profondeur (11,9 et 11,4).

Dans le troisième horizon, la pénétration humifère est de type hydromorphe : revêtements argileux gris humifère sur les faces des prismes. Alors que les deux premiers horizons sont soumis à une hydromorphie d'inondation, le troisième est soumis à une hydromorphie plus intense par engorgement à partir de la profondeur. La pénétration de la matière organique est profonde et celle-ci est bien répartie sur une grande profondeur, si l'on fait exception de l'accumulation plus forte dans le premier horizon.

En ce qui concerne le complexe absorbant, les teneurs en magnésium appartiennent à des séries de mesures différentes et montrent de grosses variations qui font que la somme Ca + Mg apparaît seule reproductible.

Le pH indique une acidité moyenne : 5,6 à 6,0, tandis que le taux de saturation indique un complexe absorbant presque saturé : 82 %. Ces valeurs sont assez bien concordantes. En effet, un sol à montmorillonite "offrirait" à pH 6 un taux de saturation de 80 % (DUCHAUFOR, 1961).

En conclusion, il s'agit d'un sol assez peu différencié sur une grande profondeur, à bonne pénétration de la matière organique, à complexe absorbant saturé par du calcium et du magnésium.

La capacité d'échange ramenée à la fraction argileuse - après soustraction de la part due à la matière organique estimée à 200 méq pour 100 g - est de 47 à 55 méq pour 100 g dans le deuxième horizon. C'est une valeur élevée qui témoigne d'une bonne proportion d'argile du type 2 : 1, en l'occurrence illites et montmorillonite, qui représentent 50 % de la fraction argileuse avec une dominance de la montmorillonite. Les 30 à 40 % d'argile gonflante (montmorillonite) ont suffi à conduire à un profil typiquement vertique au point de vue remaniements internes. Cette proportion est marginale dans les stations mieux drainées (cf. Vertisols lithomorphes).

Les caractéristiques analytiques structurales sont médiocres à mauvaises en profondeur ($I_s = 3,3$ et $K = 0,8$ cm/h). En surface, l'enrichissement en matière organique semble se traduire par une amélioration de la stabilité structurale, qui devient moyenne à assez bonne ($I_s = 0,8$), tandis que le coefficient de percolation reste médiocre ($K = 0,8$ cm/h).

Les variations morphologiques autour de ce type portent essentiellement sur les caractères structuraux des horizons A (qui peuvent se différencier en deux horizons A11 et A12) et B, et aussi un peu sur les caractères de la ségrégation ferrugineuse :

- a) élargissement de la structure en A11 avec passage aux Vertisols à structure large dès la surface : structure prismatique grossière, avec cependant, par endroits, dans le même horizon, une sous-structure polyédrique grossière assez bien développée.
- b) affinement de la structure dans les horizons A11 et A12 : structure polyédrique moyenne et petite très bien développée (cependant plus grossière par endroits), à surstructure prismatique grossière ; dans l'horizon B, structure prismatique grossière à large avec de grandes fentes de retrait atteignant 3 à 4 cm. Ces caractéristiques structurales provoquent des phénomènes d'effondrements (éboulement des horizons A dans les fentes de l'horizon B). Les effondrements, en se reliant entre eux, donnent un réseau de chenaux ou de dépressions, phénomène fréquent dans les Vertisols hydromorphes de ces régions.
- c) moindre développement de la structure dans le bas de l'horizon B.
- d) gleyification plus ou moins intense dans l'horizon B.
- e) ségrégation ferrugineuse dans les horizons A sous forme de taches rouille.

1.2 - Sous-classe des Vertisols à pédoclimat seulement temporairement humide.

Vertisols lithomorphes à structure fine en surface.

Vertisols moyennement structurés sur argiles lourdes.

1.2.1 - SOLS A STRUCTURE POLYÉDRIQUE EN SURFACE.

Ce sont les sols les plus représentatifs des Vertisols des bassins versants des Volta Blanche et Rouge

Le profil VN 17 représente une morphologie bien "typée" de ses sols.

PROFIL VN 17

Situation : sur la route de Kafbo à Niaogo, à 8 km de Niaogo dans une zone plane faiblement inclinée vers le Sud, à faible drainage externe, à touffes graminéennes exhaussées (érosion en nappe ?) et à épandage de véritables nappes graveleuses à caillouteuses de nodules calcaires en surface.

Végétation : maigre savane arbustive et très herbeuse. Strate arbustive constituée de *Bauhinia* sp., *Acacia gourmensis*, *Combretum* sp., *Ziziphus* sp., *Acacia senegal* - Strate herbacée à *Andropogon gyanus*, *Loudetia* sp., *Schizachirium* sp.

Description

0 - 30 cm Brun-gris foncé ; humifère ; à nombreux nodules calcaires jusqu' en surface, à quelques gravillons ferrugineux à patines brillantes ; présence de quelques concrétions noires et de quelques petites "concrétions" rouille ; texture argileuse ; structure polyédrique grossière à moyenne, parfois petite, très bien développée : horizon à aspect brisé ; cohésion des agrégats forte ; très nombreuses racines de graminées ; très bonne porosité d' agrégats de saison sèche.

30 - 115 cm Brun-gris foncé, devenant ensuite moins gris et moins humifère que précédemment, le passage est très progressif, l' aspect d' ensemble du profil est peu différencié au point de vue couleur ; texture très argileuse ; structure prismatique large très bien développée, individualisée par de très larges fentes de retrait verticales, se transformant souvent en véritables galeries délimitant des prismes branlants, avec parfois des migrations sableuses sur les faces, sous-structure en plaquettes obliques patinées assez bien développée, mais devenant difficile à dégager vers le bas parce que l' horizon est compact ; présence de nombreux nodules calcaires souvent blanc-jaunâtre ; ils sont plus nombreux et plus gros vers la surface ; présence de graviers de quartz.

115 - 140 cm Brun-jaune à très nombreux nodules et masses calcaires blanchâtres ; texture argileuse ; contient de fines paillettes dorées de mica.

Interprétation morphologique

La morphologie de ce profil est typique des vertisols . Nous l' interprétons ainsi :

0 - 30 cm Horizon A11, humifère se distinguant du suivant par sa structure.

30-115 cm Horizon A12 (B) : encore humifère mais possédant la structure d' un horizon B, et considéré comme un B structural dans la suite.

115-140 cm Horizon B se distinguant de l' horizon A par l' absence de matière organique et, semble-t-il, d' après l' analyse, par une plus forte teneur en argile, se traduisant effectivement par une capacité d' échange un peu plus forte, mais cette dernière caractéristique ne s' impose pas, étant donnée la texture très argileuse dans l' ensemble.

Le profil est assez peu différencié dans l'ensemble : le passage de l'horizon A à l'horizon B est très progressif. La couleur est foncée en regard d'une teneur en matière organique très faible.

Les phénomènes de remaniements internes se manifestent avec une intensité très forte : les fentes de dessiccation sont de véritables galeries internes délimitant des prismes branlants, et dans lesquelles tombent les produits plus fins de l'horizon superficiel, qu'on retrouve parfois sous forme de prismes aplatis dans le sens de la longueur entre les prismes originels du deuxième horizon. En effet, l'existence de ces galeries en profondeur est le point de départ des effondrements et du microrelief gilgai. L'horizon superficiel s'affaisse dans l'horizon sous-jacent, soit à l'état sec par éboulement des polyèdres dans les grandes fentes de retrait sous-jacentes (phénomène qui peut être accéléré par les fousseurs du sol), soit à l'état humide lorsque les premières pluies le transforment en une boue fluante avant que ne soit touché par l'eau l'horizon sous-jacent, dont les fentes de retrait restent donc béantes un certain temps en profondeur, permettant ainsi l'affaissement de la boue superficielle. Ce sont ces phénomènes d'affaissement qui créent les effondrements. Mais lors de l'humectation de l'horizon de profondeur, l'augmentation de volume consécutive de ces effondrements crée des pressions supplémentaires qui sont à l'origine du gilgai (le mécanisme sera étudié dans les caractéristiques générales au paragraphe structure).

Toutes les manifestations des phénomènes de remaniements internes existent dans ce profil : effondrements, microrelief gilgai, grandes fentes de retrait donnant une structure prismatique large, très bien développée, sous-structurée en plaquettes obliques patinées, homogénéisation du profil se traduisant ici par une concentration des nodules en surface, (nodules repris par l'érosion et épandus à la surface du sol en véritables nappes), homogénéisation du profil aboutissant à une différenciation peu marquée.

Le calcium en excès s'individualise en très nombreux nodules calcaires. Seule la ségrégation ferrugineuse apparaît comme une caractéristique très exceptionnelle en comparaison avec l'ensemble des vertisols lithomorphes. Mais, étant donné qu'il n'a jamais été observé de concrétions ferrugineuses dans les Vertisols même hydromorphes de ces régions, il est très probable qu'il s'agisse de formation allochtone ; l'absence de ségrégation ferrugineuse sous forme de taches et l'absence totale de ségrégation tant ferrugineuse que manganifère en B confirme ce point de vue.

Interprétation analytique.

Le chimisme du complexe absorbant est typiquement celui d'un sol calco-magnésimorphe à engorgement temporaire d'origine pétrographique, mais ici l'influence du sodium se superpose à celle du calcium et du magnésium.

En profondeur, le pH est celui des sols à alcalis (pH de la suspension de sol : 8,5), cependant il tombe à 8,1 sur pâte du sol.

Les caractéristiques analytiques structurales viennent confirmer cette influence néfaste du sodium échangeable : le coefficient de percolation est nul et l'indice d'instabilité structurale atteint des valeurs très élevées. Ce sont là les caractéristiques des terres sodiques. Le sodium total (*) représente 28 % de la capacité d'échange en B. Mais les sols à alcalis ne sont pas seulement définis par l'influence sodique : il existerait aussi des sols à alcalis magnésiens (DURAND 1954) et le magnésium semble présent ici en très forte proportion.

Le calcium est surtout sous forme de nodules durs ou de calcaire peu actif, puisqu'il représente moins de la moitié des cations dosés sous forme échangeable.

La capacité d'échange des argiles, de l'ordre de 60 mé pour 100 g, indique une très forte proportion de montmorillonite (90 % de montmorillonite et 10 % de kaolinite dans le deuxième horizon).

Les variations autour de ce type portent sur :

(*) Sodium total = sodium soluble + sodium échangeable. Pour des raisons d'ordre pratique, la séparation entre ces deux formes n'a pas été réalisée. Mais il s'agit de sols à très faible teneur en sels solubles : conductivité de l'extrait salin toujours inférieure à 250 micromhos et le plus souvent à 200 micromhos, soit 2,5 à 2 mé de sels solubles, où le sodium ne peut pas représenter 1 mé. Ce chiffre pris largement par excès comprend encore très certainement du sodium du complexe hydrolysé. On peut donc considérer que, dans de tels sols, le sodium total est à peu de chose près équivalent au sodium échangeable.

- a) un affinement de la structure dans les horizons A : structure polyédrique moyenne bien développée dans l' horizon A11 (15 cm d'épaisseur) pouvant se prolonger dans l' horizon A12 (25 cm d'épaisseur) à structure prismatique petite, à bases obliques patinées luisantes, sous forme d' une sous-structure assez bien développée devenant par endroits la structure première.
- b) un affinement de la structure sur l' ensemble du profil : structure polyédrique moyenne à petite très bien développée dans l' horizon A (avec toutefois, dans le même horizon, des variations vers le polyèdre grossier, loppée dans la moitié de l' horizon B (B1), passant à une structure prismatique petite, à bases obliques patinées luisantes dans la moitié inférieure (B2).
- c) une différenciation du profil plus nette : pénétration morphologiquement visible de la matière organique moins profonde, avec un horizon A nettement différencié.
- d) une atténuation des phénomènes de remaniements internes et de la structuration prismatique dans l' horizon B : structure peu développée, en plaquettes obliques ou en prismes à bases obliques patinées luisantes.

1.2.2 - SOLS A STRUCTURE PRISMATIQUE PETITE A MOYENNE EN SURFACE OU SUR L'ENSEMBLE DU PROFIL.

Ces sols n' ont pas, au point de vue extension, l' importance des précédents, mais ils représentent un maillon important dans la compréhension des phénomènes de structuration dans les Vertisols. Ils montrent, pour la série à structure prismatique petite sur l' ensemble du profil, que la structure large en profondeur n' est pas une caractéristique constante de ces sols.

PROFIL V 74

Situation : Au km 1,1 sur la piste Korsimoro-Masa - Volta Blanche (départ au croisement avec la route de Ouagadougou)
Dans une zone plane dominée à droite par de nombreuses collines.

Végétation : Ancienne zone de culture, végétation essentiellement herbacée.

Description:

- 0 - 25 cm Brun-jaune paraissant peu humifère ; texture argileuse ; structure bien développée, prismatique petite à tendance polyédrique grossière, ou polyédrique moyenne à tendance prismatique, parfois prismatique plus grossière ; surstructure prismatique grossière à large bien développée, aspect brisé ; nombreux cailloux de quartz.
- 25 - 125 cm Brun-olive s' éclaircissant vers le bas et plus riche alors en minéraux en voie d' altération ; texture très bien développée, prismatique petite à bases obliques patinées ou en petites plaquettes patinées ; la structure va en s' élargissant vers le bas ; on note la présence de quelques concrétions noires manganésifères.
- 125 - 143 cm Blanchâtre et brun pâle (altération de granite orienté ou d' un gneiss à grains fins) ; structure prismatique à polyédrique (taille d' un polyèdre grossier) bien développée à surstructure prismatique grossière.

Interprétation morphologique

- 0 - 25 cm Horizon A, très peu humifère.
- 25-125 cm Horizon B.
- 125-143 cm Horizon B (C).

Il n' y a dans ce profil qu' une dominance structurale prismatique petite. L' affinement de la structure

déjà signalé plus haut (structure de type polyédrique surtout, ne devenant prismatique que dans le bas) se retrouve ici dans une structure de type prismatique sur l'ensemble du profil. Par rapport au type précédent, la structure est très bien développée sur l'ensemble du profil.

L'accumulation calcaire non visible morphologiquement se retrouve analytiquement dans les horizons B et B (C), et augmente en profondeur. Elle induit une élévation du pH, qui est de l'ordre de 7,2 à 7,9. Le complexe absorbant saturé sur l'ensemble du profil est à dominance calcique.

Malgré cette structuration fine, le sol a des caractéristiques typiquement vertiques :

- fraction argileuse constituant plus de 40 % de la terre totale,
- montmorillonite très abondante dans toute l'épaisseur du profil (70 % en surface, atteignant 100 % dans l'horizon C (B) et bien cristallisée).
- plaquettes et faces obliques patinées, témoignant d'une intensité élevée des phénomènes de gonflement.

La diminution de la montmorillonite vers la surface peut être liée à une évolution en place, étant donné que le profil ne paraît pas remanié de 25 à 143 cm. Le rapport fer libre sur fer total élevé ne se traduit par aucune ségrégation ferrugineuse.

Les caractéristiques analytiques structurales : stabilité structurale et surtout coefficient de percolation, sont relativement bonnes pour ce type de sol.

En conclusion, c'est un sol à structuration d'ensemble relativement fine, mais à caractéristiques analytiques parfaitement identiques à tout point de vue à ceux des Vertisols typiques à structure plus large. Tous les caractères morphologiques, excepté la taille des éléments structuraux, sont aussi identiques.

1.2.3 - LES SOLS DES SÉRIES "PEU DÉVELOPPÉES"

Sont groupés dans ces séries peu développées des sols à profils typiquement vertiques, mais d'épaisseurs faibles (moins de 50 à 60 cm). Ils comportent la même différenciation que les Vertisols bien développés. Il est à remarquer d'ailleurs que la profondeur des Vertisols n'est pas bien grande dans les régions étudiées : on atteint fréquemment le matériau originel ou la roche mère friable entre 1 m et 1,50 m.

Le profil HA 7, réduit à 40 cm d'épaisseur, reproduit la morphologie et la différenciation d'un vertisol typique.

PROFIL HA 7

Situation : Au km 3,9 sur la piste de Zabré à Ziou.

Description

- | | |
|------------|---|
| 0 - 15 cm | Brun-gris, humifère ; gravillonnaire par endroits ; texture argileuse ; structure polyédrique moyenne très bien développée donnant un aspect brisé, surstructure prismatique. |
| 15 - 40 cm | Brun à brun-jaune ; argileux, à quelques concrétions noires manganésifères ; structure prismatique grossière très bien développée à sous-structure prismatique petite, aplatie, tendant à la plaque, à faces de décollement subhorizontales bien patinées, striées. |
| 40 et plus | Granite très peu altéré. |

Interprétation morphologique

- | | |
|------------|----------------------|
| 0 - 15 cm | Horizon A. |
| 15 - 40 cm | Horizon B structural |
| 40 et plus | Horizon C (D). |

Le profil est faiblement acide en surface (horizon d'apport remanié), mais il devient neutre en B et alcalin en C (D), montrant bien la nature basique du milieu de synthèse des argiles. Corrélativement, la capacité d'échange de la fraction argileuse atteint et dépasse 100 mé pour 100 g en B et en C (D), témoignant d'une forte synthèse montmorillonitique. Elle s'abaisse à environ 50 mé pour 100 g en surface, et caractérise encore une dominance montmorillonitique.

Le complexe absorbant est saturé, essentiellement à base de calcium. Cette forte dominance calcique semble se traduire par un indice d'instabilité structurale anormalement faible en B et corrélatif d'un bon coefficient de percolation. Ce dernier se maintient en surface, alors que s'explique difficilement la baisse de la stabilité structurale.

Dans certains de ces profils peu épais, on peut retrouver en B les grandes fentes de retrait formant galeries et délimitant des prismes branlants. Dans d'autres, le sol est développé sur un matériau argileux totalement allochtone très riche en gravillons ferrugineux et cailloux de quartz.

1.2.4 - LES SOLS A RECOUVREMENTS SUPERFICIELS DIVERS

A côté des Vertisols typiques précédents, il existe de nombreux Vertisols à recouvrements superficiels d'épaisseur très variable, de texture gravillonnaire, ou sableuse à sablo-argileuse, ou argilo-sableuse.

Les recouvrements sableux très fréquents sont généralement peu épais (quelques centimètres à 30 cm), ils ont le plus souvent des caractéristiques de sols "bruns eutrophes" couleur brun-gris à brun foncé, complexe absorbant saturé, pH proche de la neutralité (6,5). Quand ils sont affectés par l'hydromorphie, ils sont séparés de l'argile vertique par une fente de dessiccation horizontale.

Les recouvrements gravillonnaires, très fréquents aussi, peuvent être plus épais. Ils ont également des caractéristiques de sols "bruns eutrophes".

Les recouvrements argilo-sableux sont du type vertique. Ils engendrent en surface un élargissement de la structure qui fait de ces sols un passage aux Vertisols à structure large en surface. La structure en A11 est polyédrique large à sous-structure polyédrique très grossière ; elle peut s'affiner en A 12 et devenir polyédrique grossière à moyenne dès que la texture devient plus argileuse.

2 - CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES VERTISOLS DES BASSINS VERSANTS DES VOLTA BLANCHE ET ROUGE.

2.1 - Vertisols hydromorphes.

2.1.1 - CONDITIONS DE FORMATION.

La genèse des Vertisols hydromorphes est étroitement liée à l'accumulation dans les dépressions, soit de matériaux vertiques (étrangers aux matériaux constitutifs des sols climaciques environnants), soit de matériaux où la néosynthèse montmorillonitique est favorisée par un enrichissement en silice et en bases dû au lessivage des sols voisins. La formation de ces Vertisols peut être due aussi à l'altération montmorillonitique d'une roche plus ou moins basique en zone dépressionnaire.

2.1.2 - CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET ANALYTIQUES.

Quelques caractéristiques constantes s'imposent, dont la plupart ont été déjà signalées :

2.1.2.1. - La morphologie est assez semblable à celle des vertisols lithomorphes : la différenciation des profils est la même et du type souvent progressif. La manifestation des phénomènes mécaniques dus aux remaniements internes : fentes de retrait, faces de glissement patinées, plaquettes obliques patinées, est relativement plus intense dans les vertisols topomorphes et aboutit souvent dans les sols typiques à la création d'effondrements,

de réseau de dépressions ou de réseau de chenaux.

La ségrégation ferrugineuse plus ou moins intense est constante et paraît spécifique de la superposition d'une hydromorphie d'origine topographique à l'hydromorphie d'origine pétrographique.

2.1.2.2. - L'analyse minéralogique du profil VRG 14 montre que les Vertisols hydromorphes peuvent être - par rapport aux vertisols lithomorphes - bien "typés", avec des taux d'argiles gonflantes (en l'occurrence la montmorillonite) plus faibles, de l'ordre de 30 % : l'excès d'eau accentue les phénomènes de gonflement et compense ainsi la diminution de la capacité de gonflement du sol.

2.1.2.3. - L'accumulation de matière organique à C/N élevé : 17 à 21 est quasi-constante en surface. Le C/N peut garder des valeurs relativement élevées en profondeur (supérieures à 11). La matière organique est relativement abondante jusqu'à une assez grande profondeur (cf. VRG. 14).

2.2 - Vertisols lithomorphes.

2.2.1 - CONDITIONS DE FORMATION.

La genèse des Vertisols est liée à celle des argiles du type 2/1 principalement du groupe montmorillonite. Elle est toujours associée à un milieu générateur à pH élevé, riche en cations alcalino-terreux et en silice, et liée à des conditions de drainage interne faible.

Indépendamment de son rôle indirect sur le maintien des bases et de la silice, la vitesse de drainage aurait une influence directe sur le rapport Si/Al (SABATIER, 1962). "Ainsi la différence entre roches dites "basiques" et "acides" se marquerait principalement dans la qualité du drainage interne ; l'eau circule plus facilement dans la plupart des roches acides plus siliceuses, et les stades d'altération se trouvent étagés sur de plus grandes distances" (SABATIER, 1962). Sabatier conclut "la qualité du drainage et la salinité des eaux de percolation constituent donc les facteurs déterminants dans les processus génétiques".

Selon GASTUCHE, FRIPIAT et de KIMPE (1962), l'augmentation de la teneur relative en silice favorise la coordinance IV de l'aluminium, qui favoriserait elle-même l'apparition de phyllites 2/1. Mais cette coordinance ne serait stable qu'à pH élevé. Par ailleurs, un pH élevé augmente la disponibilité de la silice et favoriserait la coordinance IV de l'aluminium. Le magnésium faciliterait aussi la formation de phyllites 2/1.

L'alcalinité du milieu générateur est confirmée ici par les pH des matériaux originels qui s'échelonnent entre 6,6 et 8,2, avec fréquence maximum dans la classe 7,8 à 8,2 (fig. n° 20).

Ce milieu générateur riche en bases et en silice a théoriquement deux origines :

- une origine pétrographique : roche mère basique pour les Vertisols lithomorphes
- une origine topographique pour les Vertisols hydromorphes ou topomorphes : roche mère pouvant être acide, l'accumulation des bases et de la silice ayant lieu par apports exogènes, et leur maintien par limitation du drainage interne et externe.

Mais en réalité, d'après ce qui vient d'être dit sur les conditions de genèse de la montmorillonite, et comme le constate MAIGNIEN (1957), ces deux processus de genèse sont étroitement liés et il est souvent difficile de faire la part de l'un ou l'autre de ces processus.

L'influence de la limitation du drainage augmente avec la diminution de la basicité de la roche mère. Lorsque le climat devient moins humide ou la station mal drainée, des roches moins basiques, mais susceptibles d'engendrer un milieu alcalin grâce au maintien des produits d'altération, peuvent réaliser les conditions de genèse des Vertisols.

Ainsi dans les régions étudiées, les Vertisols couvrent les surfaces correspondant aux granites calco-alcalins à amphiboles et pyroxènes dominants qui sont des roches "acides à intermédiaires". Le modelé de pénéplaine mal drainée a dû jouer un rôle presque aussi important que la nature de la roche mère dans la genèse des sols (il faut tenir compte cependant des nombreuses intrusions basiques, dont le rôle est difficile à préciser à cause de l'indétermination de leur importance).

STEPHEN (1953) constate aussi au Ghana la présence de "quantités appréciables de montmorillonite dans des sols dérivés de schistes acides constitués principalement de quartz et de feldspaths pauvres en bases". Il suppose que la biotite y représente la source principale de base et que le climat est suffisamment aride pour assu-

rer le maintien des bases libérées dans le système en voie d'altération.

La diminution de la synthèse montmorillonitique, soit par augmentation de la pluviométrie, soit par amélioration du drainage, soit par moindre richesse de la roche-mère en bases, aboutit à la formation de sols bruns eutrophes : c'est le deuxième processus qui joue sur les schistes amphibolitiques en relief, tandis que le troisième processus joue sur les schistes "acides à intermédiaires".

Lorsque le milieu générateur, par le jeu des processus précédents, devient franchement acide, il n'y a plus que la synthèse kaolinique, aboutissant à la formation de sols de type ferrugineux tropical à complexe absorbant essentiellement ou exclusivement kaolinique. Il est bien reconnu que la synthèse kaolinique exige l'élimination des bases et un milieu acide. Ainsi, la dynamique des sols ferrugineux tropicaux, dynamique de milieu acide, est liée à la genèse même de leurs matériaux originels. Le matériau originel, c'est-à-dire d'altération, déterminerait ainsi le sol.

Au cours de l'évolution de ce sol formé en milieu basique à neutre, il peut se produire une acidification secondaire en surface, favorisée particulièrement par des conditions d'hydromorphie prononcée. Dans les Bassins Versants des Volta Blanche et Rouge, les horizons A ont typiquement des pH légèrement acides (population normale ou presque normale de pH dont la fréquence maximum se situe dans la classe 6,2 à 6,6). Une acidification plus prononcée paraît due ici à des phénomènes de remaniements et non à une évolution en place. Il faut rappeler en effet que la plupart des vertisols sont développés sur des argiles vertiques d'apports ou de remaniements, et que tous les horizons de surface sont apportés, ou plus ou moins fortement remaniés. Ce sont ces phénomènes de remaniement qui expliqueraient l'acidité de certains horizons B. Ces derniers apparaissent nettement plus alcalins que les horizons A ; la fréquence est maximum pour les classes 6,2 à 6,6 ; 6,6 à 7,0 et 7,0 à 7,4. (fig. 20). Il n'existe pas d'échantillons B à pH inférieur à 6,2.

Dans tous les cas, le complexe absorbant est entièrement saturé ou très proche de la saturation.

2.2.2 - CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES.

2.2.2.1 - Différenciation et couleur.

Ce sont des sols à profil AC ou ABC, de couleur allant du brun-olive foncé au brun pâle ou brun-olive pâle en profondeur. L'horizon A 11, de 20 à 30 cm d'épaisseur environ, est de couleur brun-gris à brun-gris foncé. Il n'a pas été observé d'horizons B de couleur plus soutenue que le brun-olive foncé F 72 ; par contre, il existe des B typiques éclaircis jusqu'à l'olive pâle D 83.

Ces Vertisols sont donc, d'une manière générale, relativement clairs. Mais, quel que soit le ton de la couleur, un caractère essentiel semble être l'absence de rubéfaction ou de tendance à la rubéfaction.

2.2.2.2. - Matière organique.*

La matière organique, peu abondante, est répartie soit de façon progressive en profondeur, donnant alors des profils assez peu différenciés, soit dans des horizons A morphologiquement bien individualisés, donnant des profils bien différenciés.

2.2.2.3 - Structure.

La classification des Vertisols, tant en ce qui concerne la différenciation au niveau de la classe que celle au niveau des groupes et de certains sous-groupes, est basée sur la structure. Il est donc nécessaire de s'attarder sur cette caractéristique en distinguant successivement :

morphologie de la structure
variations structurales et caractéristiques corrélatives
structure et minéralogie de la fraction argileuse.

2.2.2.3.1. - MORPHOLOGIE DE LA STRUCTURE.

(*) appréciation morphologique qui conditionne le degré de différenciation des horizons.

a. Horizons de surface.

La structure des horizons de surface est généralement bien développée, du type polyédrique grossier à petit, les gros agrégats ayant le plus souvent une sous-structure plus petite. La taille de la structure première varie beaucoup dans le même horizon, ainsi que le degré de développement des sous-structures. Par ailleurs, on trouve assez souvent, à côté de la structure polyédrique, la structure prismatique grossière. Mais d'une façon générale ces sols appartiennent au type "self mulching soils".

b. Horizons de profondeur.

En profondeur, la structure est typiquement prismatique ou un dérivé de cette structure : par troncatures successives plus ou moins obliques sur les arêtes, le prisme primitif passe à un prisme de plus en plus aplati aboutissant à la plaquette plus ou moins petite, parfois tétraédrique, ou à la large plaquette oblique.

Mais là encore, on peut observer parfois des fluctuations dans le même horizon : apparition à côté de la structure prismatique d'une structure polyédrique moyenne à grossière, plus ou moins bien développée, coïncidant avec des zones de très forte accumulation calcaire. Les faces de décollement horizontales ou obliques des prismes et dérivés sont toujours très patinées, luisantes, souvent striées. Les faces verticales ne présentent presque jamais ces patines luisantes. Les fissures délimitant les prismes peuvent se transformer en véritables galeries internes, individualisant des prismes branlants.

2.2.2.3.2. - VARIATIONS STRUCTURALES ET CARACTERISTIQUES CORRELATIVES.

a. Affinement ou élargissement de la structure en surface.

L'interprétation des résultats analytiques montre que l'équilibre et la nature des cations du complexe absorbant ne sont nullement en cause. Ainsi, parmi les horizons A 11 à structure polyédrique grossière à petite très bien développée, on en trouve qui ont un complexe absorbant riche en sodium échangeable avec une forte dominance du magnésium sur le calcium, tandis que d'autres ont un complexe absorbant non sodique où le calcium domine fortement sur le magnésium. Il en est de même pour les horizons de surface où la structure s'élargit. Par contre, cette dernière caractéristique semble liée souvent à une diminution de la capacité de gonflement du sol par apport d'un squelette sableux à sables fins. Cette diminution peut être compensée par une intensification du gonflement sous l'action d'un engorgement d'origine topographique.

b. Exaltation de la structuration prismatique en profondeur.

Elle aboutit à la création de véritables galeries internes (cf profil VN 17). Elle ne peut être attribuée à la seule influence sodique. En effet, dans le profil VN 17, on trouve en même temps une nette dominance du magnésium sur le calcium. Il existe par ailleurs des profils qui présentent ces caractéristiques structurales et qui ne contiennent que des quantités négligeables de sodium échangeable. Il existe aussi des profils qui contiennent de grandes quantités de sodium échangeable et qui ne présentent pas ces caractéristiques structurales (il s'agit évidemment dans cette comparaison, de sols identiques au point de vue des teneurs en argile et des proportions de montmorillonite).

Il semble cependant que, dans ces sols à exaltation de la structuration prismatique, la somme magnésium + sodium doit rester dominante sur le calcium. L'influence propre du sodium dans ce phénomène n'apparaît pas nettement.

c. Atténuation de la structure en profondeur.

Certains profils de Vertisols typiques au point de vue teneurs en argile (45 à 50 %), teneurs en montmorillonite bien cristallisée (70 à 80 % de la fraction argileuse), montrent une forte atténuation de la structuration prismatique : structure moyennement à peu développée, se manifestant par la présence de faces de glissement patinées luisantes. Le degré de développement de la structure diminue vers le bas. Le calcium domine très largement dans le complexe absorbant et le sodium y est négligeable.

d. Affinement de la structure en profondeur ou sur l'ensemble du profil.

On conçoit généralement les Vertisols comme devant toujours avoir une structure grossière, prismatique ou cubique en profondeur. Dans le cas particulier des régions étudiées, il n'en est pas toujours ainsi. On peut trouver des profils à structure prismatique petite sur l'ensemble du profil (cf. profil V 74) qui possède par ailleurs toutes les caractéristiques typiques des Vertisols. Cette caractéristique est accompagnée d'une forte dominance du calcium sur le magnésium (Ca/Mg de l'ordre de 1/3) et d'une représentativité négligeable

du sodium dans le complexe absorbant.

La structure polyédrique, lorsqu'elle se prolonge en profondeur sur au moins la moitié du profil semble aussi corrélative d'une certaine dominance du calcium sur le magnésium (rapport Ca/Mg de l'ordre de 1,5 dans le profil de référence) et d'une influence sodique négligeable dans le complexe absorbant.

Dans certains profils, on voit au contraire la structure s'affiner à la base. Dans un de ces profils, l'horizon A, sur 21 cm, passe de la structure prismatique large à la structure prismatique petite très bien développée, l'horizon B1 (21 à 64 cm) a une structure prismatique large bien développée et délimitée par des fentes de retrait verticales atteignant 2cm de large, cependant que l'horizon B2 (64 à 132 cm) présente, dans le haut, une structure prismatique moyenne passant très vite vers le bas à une structure prismatique petite à tendance polyédrique bien développée, avec en même temps une accumulation calcaire, sous forme de concrétions et d'amas terro-calcaires.

e. Structure des matériaux originels.

Si la structure est considérée ici comme un critère évolutif, elle doit permettre de mettre en évidence une évolution du matériau originel aux horizons B. Pourtant, de nombreux matériaux originels dans des Vertisols typiques présentent la structure polyédrique moyenne à grossière, et d'autres présentent déjà la structure prismatique à bases plus ou moins obliques et plus ou moins patinées. Cette dernière structure apparaît ainsi parfois héritée de la roche mère.

Il semble donc que, si la structure de ces sols est un élément important du point de vue pratique, elle ne puisse pas toujours servir de critère évolutif à un échelon élevé.

f. Conclusion.

La structure des horizons de surface, très variable, ne semble pas pouvoir être reliée à aucune caractéristique du complexe absorbant. Elle semble essentiellement sous la dépendance de l'allure des phénomènes d'humectation et de dessiccation (étant excepté le rôle de l'activité biologique).

La structure des horizons de profondeur semble par contre refléter dans une certaine mesure l'équilibre des bases du complexe absorbant et du sol entier :

- l'ion calcium et le calcaire semblent atténuer la structuration prismatique.
- le sodium n'a pas d'action bien précise sur la morphologie de la structure, il semble affecter, plutôt que le type structural, les caractéristiques analytiques structurales.
- le magnésium semble exalter la structuration prismatique.

2.2.2.3.- STRUCTURE DES HORIZONS B ET COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES ARGILES.

Le bon développement dans les horizons B de faces de glissement obliques, luisantes et plus ou moins striées, souvent très larges, parfois conchoïdales est la manifestation la plus constante et la plus spécifique des Vertisols des régions étudiées. Ces faces obliques délimitent soit des prismes, soit des plaques ou des plaquettes. Elles ne sont pas une caractéristique constante de tous les matériaux argileux montmorillonitiques, mais leur présence est toujours spécifique de celle de la montmorillonite ou de minéraux argileux interstratifiés gonflants. Ainsi, même les rares faces obliques luisantes que l'on trouve à la base de certains sols hydromorphes semblent toujours corrélatives d'une certaine quantité de minéraux gonflants.

Toutes les déterminations minéralogiques effectuées sur des horizons à belle patine oblique luisante bien développée, indiquent de très fortes proportions de montmorillonite dans les Vertisols lithomorphes (60 à 100 % de la fraction argileuse). Ces proportions sont plus faibles dans les Vertisols hydromorphes (30 à 40 %) où une intensité d'engorgement plus élevée d'origine topographique rétablit le déficit dans la capacité de gonflement.

À côté de la patine oblique luisante, on peut trouver, mais très rarement dans les Vertisols, des faces verticales patinées luisantes. La patine luisante verticale ne semble être qu'un revêtement argileux nullement caractéristique des Vertisols, mais traduisant simplement une hydromorphie prononcée avec tendance à la dispersion des argiles. Ainsi on peut la trouver dans des matériaux kaoliniques (100 % de kaolinite très bien cristallisée, des traces d'illites), en corrélation avec un indice d'instabilité structurale élevée ($I_s = 5,6$) et un coefficient de percolation nul.

Les faces de glissement obliques, luisantes, plus ou moins striées dérivent d'un système de clivages obliques

dans les prismes primaires, qui doit être relié au même processus fondamental que le gilgai. Ce dernier est la phase ultime du processus. Le clivage est dû au glissement de tranches de sol les unes sur les autres lors de l'humectation du sol, sous l'action de forces de pression différentielles. Ces forces de pression sont dues au gonflement élevé des argiles à l'humectation. HALLSWORTH et al (1955) ont étudié le mécanisme de ces poussées dans la genèse du gilgai et concluent à la nécessité de certaines conditions intrinsèques au sol :

- a. Sols à fort pouvoir de gonflement. En dehors de l'action des colloïdes organiques, la capacité de gonflement est liée aux caractéristiques des minéraux argileux présents et à la nature des cations du complexe. On peut alors la représenter par l'expression : $V = 0,48 C + 0,76 Na + 0,24 E$ où
- V est le gonflement en % du volume
 - C la teneur en argile en %
 - Na la teneur en sodium échangeable en mé pour 100 g de sol
 - E la capacité d'échange des argiles.

Mais, comme nous l'avons signalé plus haut, l'action spécifique de l'équilibre Ca/Mg semble également très importante, alors que celle du sodium a parfois des interférences sur la réduction de perméabilité du sol, et qui peuvent limiter le gonflement par déficit d'humectation.

- b. Capacité de gonflement plus élevée en profondeur qu'en surface, de sorte qu'il existe des pressions de gonflement plus élevées en profondeur, ou que la fissuration y est plus large, augmentant ainsi les chances d'éboulement de l'horizon superficiel dans les horizons profonds, et les chances d'humectation différentielle à l'origine des pressions différentielles.
- L'éboulement de l'horizon superficiel dans les horizons profonds donne naissance, lors de la réhumectation, à des pressions supplémentaires qui s'exercent sur les prismes et provoquent leur rupture.

La fissuration large en profondeur permet un ruissellement mécanique des eaux en profondeur, et des phénomènes d'humidification différentielle qui créent des pressions de gonflement différentielles entre des tranches de sol et provoquent la rupture des blocs. Cette fissuration large permet aussi l'affaissement d'une tranche supérieure de sol mouillée dans la fente restée béante de la tranche sous-jacente non mouillée. Lors de l'humidification de cette dernière, il en résulte une pression supplémentaire de gonflement dirigée vers les zones les moins résistantes, c'est-à-dire vers les couches mouillées dans le haut. Mais il ne semble pas nécessaire, dans ces mécanismes, qu'il y ait un gonflement plus élevé en surface qu'en profondeur.

Le processus d'éboulement ou d'affaissement de l'horizon superficiel dans les fentes de profondeur apparaît typiquement dans le profil VN 17 (décrit au début de l'étude des Vertisols lithomorphes). On y trouve, dans le deuxième horizon, coincés entre les prismes originels, des matériaux de l'horizon superficiel sous forme de prismes aplatis dans le sens vertical. On retrouve ce phénomène dans des profils à teneur en sodium échangeable négligeable. Il ne semble pas que son mécanisme exige un pouvoir de gonflement plus élevé en profondeur qu'en surface, mais un mode de structuration et de dessiccation différent : structure fine polyédrique ou grumeleuse en surface avec dessiccation et humectation homogène, structure prismatique en profondeur avec dessiccation uniquement par les fentes de retrait. Par contre, ce processus contribue à augmenter la pression de gonflement des horizons profonds par rapport à celle des horizons de surface. Le processus d'éboulement exige seulement que la structure de surface soit relativement fine par rapport aux fentes en profondeur.

- c. Aptitude du sol à transmettre les pressions dans un sens bien défini.
- "Cette aptitude est liée à la dimension des agrégats et à la cohésion du sol. Une pression appliquée à une masse de petits agrégats sera diffusée à travers le système d'une manière un peu analogue à la diffusion d'une pression dans un fluide. A mesure que la taille des agrégats augmente, les effets de la pression sont progressivement moins dispersés et dans le cas de gros blocs, la pression provoque un mouvement bien défini qui déplace un bloc par rapport aux blocs adjacents".

Ainsi les cations qui engendrent des structures larges et cohérentes, tels le sodium et le magnésium, favorisent ce phénomène, tandis que ceux qui engendrent des structures fines du type polyédrique ou grumeleux s'y opposent.

On voit ici que la structure originelle de la roche mère peut favoriser ce phénomène, lorsque cette structure possède des faces déjà orientées dans le sens des poussées.

Mais, dans ce mécanisme, le type structural doit aussi jouer un rôle important. Les structures à système de fissures orientées dans un sens bien défini (structures du type prismatique par exemple) et à cohésion forte doivent avoir une aptitude meilleure à transmettre les pressions dans une direction bien définie, alors que les structures à système de fissures formant réseau (structure grumeleuse, polyédrique...) transmettent plutôt les pressions de façon diffuse.

2.2.2.4 - Cohésion et porosité.

La cohésion des agrégats élémentaires est toujours très forte et leurs arêtes très vives sont tranchantes, au point d'endommager les sacs à échantillons.

La présence d'une macroporosité visible dans les mottes n'a pas été observée en profondeur. Les prismes et leurs dérivés sont compacts (c'est-à-dire non poreux).

2.2.3 - CARACTÈRES ANALYTIQUES DES VERTISOLS TYPIQUES.

2.2.3.1 - Matière organique. (fig. 16)

Elle est peu abondante et ne dépasse guère 2 % en surface. Les 2/3 des horizons A 11 contiennent moins de 1,4 % de matière organique, tandis que les 2/3 des horizons A 12 contiennent moins de 0,8 % de matière organique. Cette matière organique peut être bien répartie en profondeur ou marquer une chute brutale après l'horizon A 11.

Les rapports C/N des horizons A11 forment une première et importante population de valeurs allant de 10 à 14, ce qui indique une matière organique bien évoluée pour des sols non cultivés, et une deuxième population moins importante allant de 16 à 18, indiquant une matière organique moyennement évoluée. On peut considérer d'une manière générale que la matière organique est du type bien évoluée.

Malgré cette faible abondance de la matière organique, on lui attribue un rôle dans la coloration du sol qui serait due à des complexes montmorillonite-humus. En effet, l'absorption de certains corps organiques sur les argiles retarderait, ou même arrêterait leur décomposition, et cette propriété plus prononcée dans les argiles du groupe montmorillonitique serait négligeable dans les argiles du groupe kaolinique (D'HOORE, 1955).

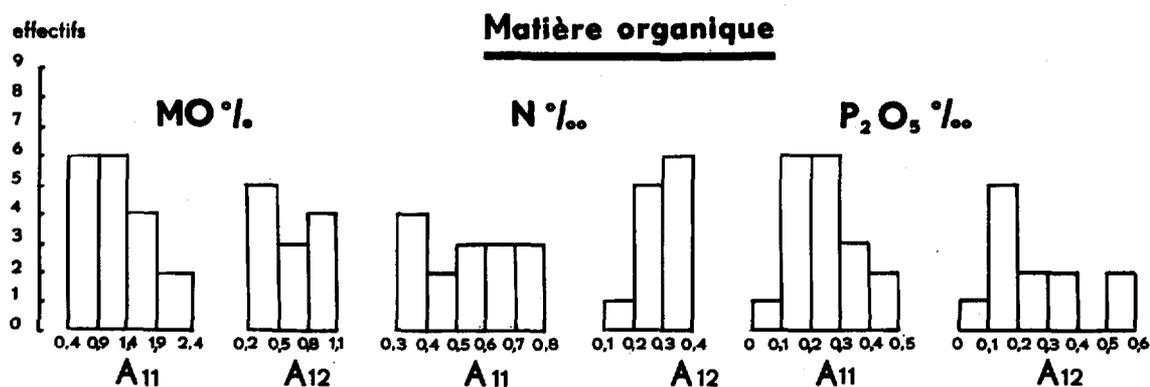
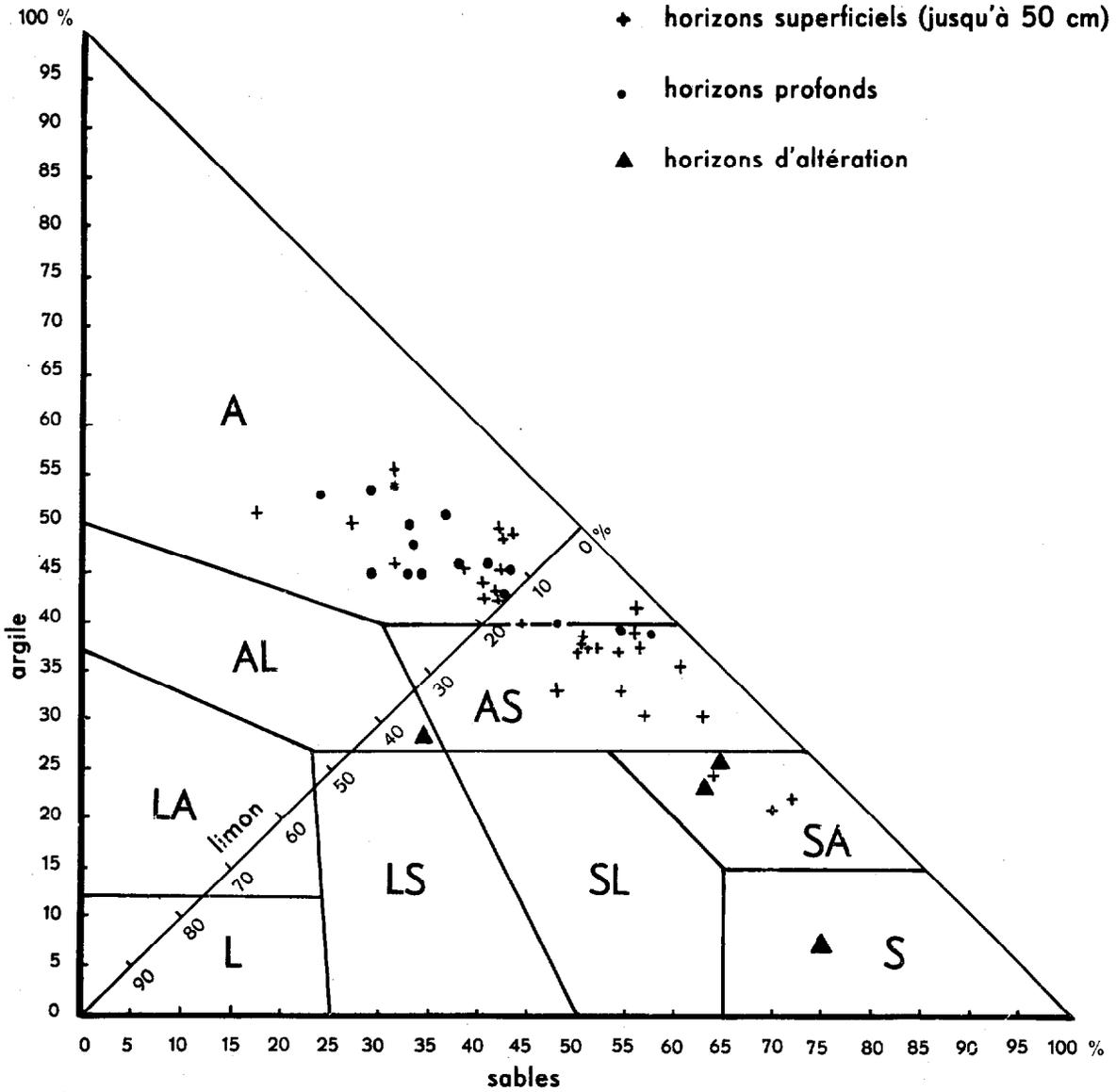


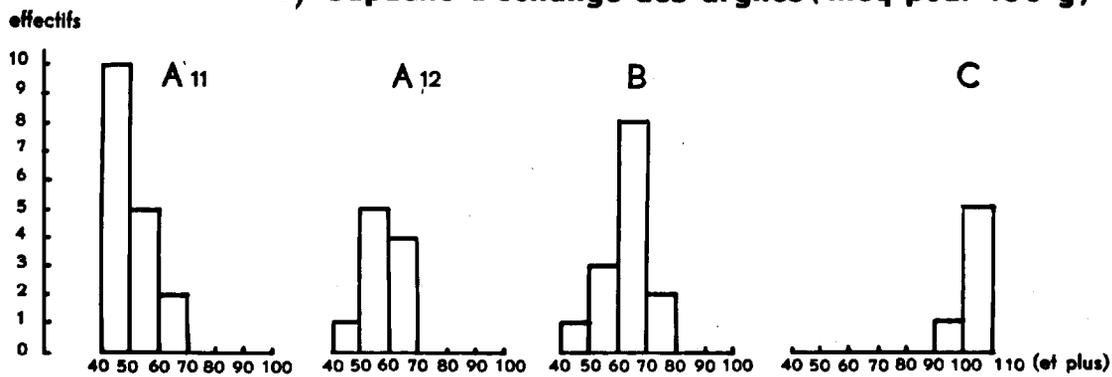
Fig.- 16

2.2.3.2 - Granulométrie. (fig. 17)

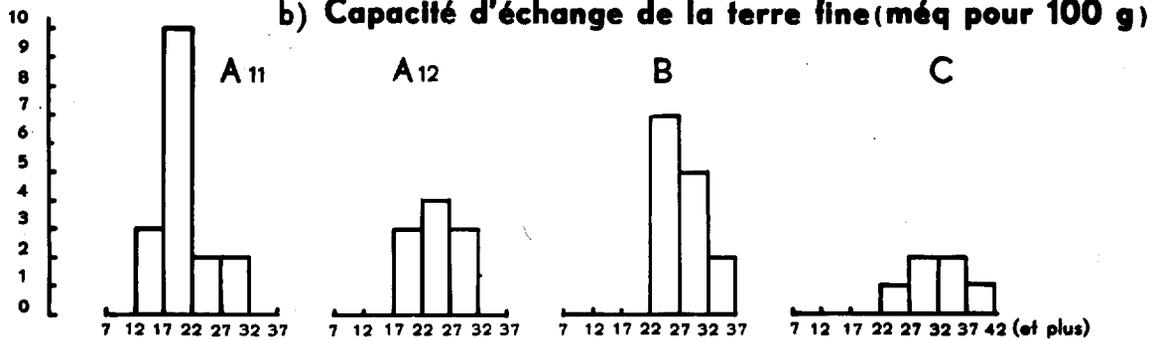
Les horizons de surface se partagent entre les classes argilo-sableuses et argileuses, tandis que les horizons de profondeur sont nettement dans la classe argileuse et contiennent approximativement 40 à 55 % d'argile.



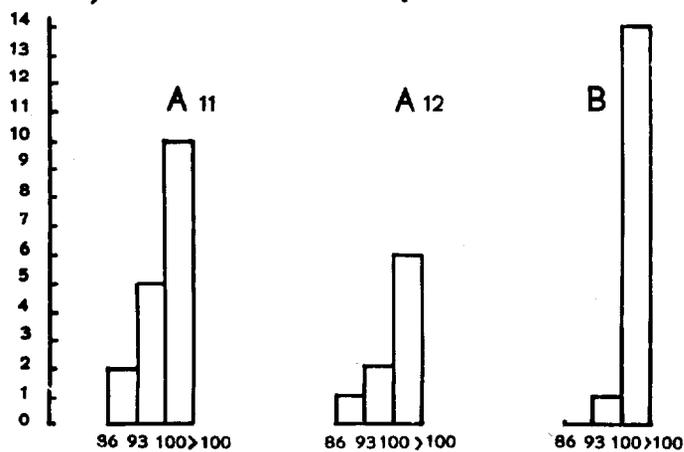
a) Capacité d'échange des argiles (méq pour 100 g)



b) Capacité d'échange de la terre fine (méq pour 100 g)



c) Saturation du complexe absorbant



d) Teneur en montmorillonite de la fraction argileuse

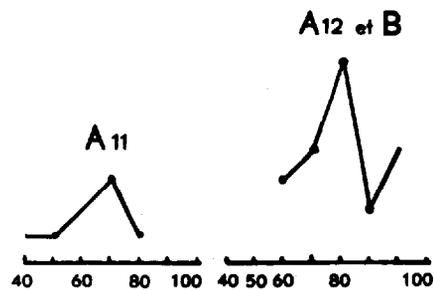


Fig.- 19

Alors que, selon ROSS (1958), la montmorillonite ne contient que 2,68 % de Fe_2O_3 , la nontronite en contiendrait 29,67 %. Des essais ont montré que le traitement d'une nontronite par la méthode Debb - équivalente à la méthode D'HOORE d'après les comparaisons effectuées à Hann par ARIAL-FARGEAS (*) - libère des quantités supérieures à d'autres méthodes, mais amène aussi une diminution très nette de la capacité d'échange (MEHRA et JACKSON, 1958), probablement consécutive à une altération du réseau cristallin par expurgation du fer de ce réseau.

Dans l'hypothèse d'une complexation par la matière organique, il devrait y avoir une variation des rapports fer libre sur fer total en fonction des variations de la quantité de complexant, c'est-à-dire en fonction de la profondeur.

On ne constate rien de tel - Mais il reste la possibilité de complexation par la silice et d'autres complexants.

Les rapports fer libre sur argile, à distribution de fréquence désordonnée dans les horizons A, prennent dans les horizons B une distribution normale avec une courbe de fréquence aiguë et une classe moyenne couvrant les valeurs 10 - 12 %. On retrouve exactement cette même distribution normale en groupant l'ensemble des échantillons de surface et de profondeur. Il apparaît donc nettement que les quantités de fer libre sont étroitement liées aux quantités d'argile. Par ailleurs, le rapport fer libre sur argile présente des valeurs très élevées, que l'on ne retrouve même pas dans des horizons d'accumulation d'argile de sols ferrugineux tropicaux. Il est donc très probable que le fer libre provienne du réseau des argiles. VAN DER MERWE (1940) fait les mêmes constatations sur les vertisols d'Afrique du Sud : le fer n'existerait pas sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes, mais serait partie intégrante du réseau cristallin.

Nous essayerons ultérieurement de voir l'influence des processus analytiques du fer libre sur la capacité d'échange.

En conclusion, le rapport fer libre sur fer total ne traduit pas ici la dynamique du fer.

2.2.3.4 - Le complexe absorbant (fig. 19)

a. Minéralogie du complexe absorbant.

Les analyses minéralogiques effectuées sur un assez grand nombre de profils montrent que la montmorillonite est le constituant principal ou essentiel de la fraction argileuse des vertisols lithomorphes typiques (tableau 1 et fig. 19 d).

Les pourcentages de montmorillonite oscillent en surface (horizons A 11) entre 40 et 80 %, avec fréquence maximum pour la valeur 70 %. En profondeur (ici horizon B et éventuellement A 12), ils oscillent entre 60 et 100 %, avec fréquence maximum élevée pour la valeur 80 %. Seule la valeur concernant l'échantillon VG 304 est aberrante dans ces distributions.

D'une façon générale, la proportion de montmorillonite augmente en profondeur, les horizons C étant au point de vue relatif les plus riches. Cela n'est pas lié à une évolution de la montmorillonite vers la surface, mais, comme nous l'avons déjà vu, aux phénomènes de remaniements et d'apports.

(*) Rapport de stage. Centre de Pédologie de Hann - Dakar, Décembre 1963.

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES ARGILES DES VERTISOLS.

1. - VERTISOLS TYPIQUES ET ARGILES VERTIQUES TYPIQUES.

Profils	Prélèvements	M	K	I	G
VL 17	771	60	40		
	773	90	10		
VK 50	501	70	20	10	
	502	80	20		
VK 4	41	50	40	10	
	42	80	10	10	
VL 6	61	40	50	10	
	62	80	20		
	63	90	10		
VL 21	213	80	20		
VN 14	143	70	10	20	
VN 17	172	90	10		
VO 3	32	60	30	10	
	33	70	20	10	
VY 4	43	60	20	20	
VY 15	151	70	30		
	152	100	traces	traces	
	153	100	traces	traces	
VY 78	781	80	20		
	782	60	40		
	783	100	traces		
VY 42	423	100	traces	traces	
VG 30	304		50	40	10
VRN 4	41	60	40		
	42	70	30		
	43	80	20		
	44	80	20		
V 74	741	70	30		
	742	90	30		
	743	80	20		
	744	100	traces		

2. - VERTISOLS DE TRANSITION MOYENNEMENT TYPÉS OU ARGILES VERTIQUES MOYENNEMENT TYPÉES.

Profils	Prélèvements	M.	K	I	G
VS 15	151		50	10	40
	152		50	10	40
	153		50		50
VG 6	63	30	20	50	

M = Montmorillonite
K = Kaolinite

I = Illites
G = Feuilletés gonflants

Pour les vertisols de transition, on trouve encore d'assez bonnes proportions de montmorillonite, mais mal cristallisée : 30 % dans le prélèvement VG 63, avec dominance d'illite : 50 %. Dans le profil VS 15 (transition avec les sols bruns eutrophes), il s'agit d'édifices micacés gonflants en bonne proportion : 40 à 50 %.

Comme cela a été déjà signalé, l'argile du groupe montmorillonite serait probablement de la nontronite.

b. Chimisme du complexe absorbant.

Les très fortes proportions d'argile montmorillonitique se traduisent par des capacités d'échange des argiles très élevées. Celles des horizons A 11 oscillent entre 40 et 70 mé pour 100 g d'argile, avec fréquence maximum dans la classe 40 - 50 mé. Celles des horizons A 12 oscillent entre les mêmes valeurs, mais la fréquence maximum est dans la classe 50 - 60 mé pour 100 g. Les valeurs concernant les horizons B oscillent entre 40 et 80 mé pour 100 g ; elles forment alors une population normale à courbe de fréquence très aiguë dont la classe moyenne est 60 - 70 mé. Pour les horizons C, les valeurs minima ne descendent plus en-dessous de 90 mé, la fréquence maximum couvrent les valeurs de 100, et même de plus de 110 mé pour 100 g.

Ainsi, la capacité d'échange des argiles augmente très nettement des horizons A 11 aux horizons C, suivant très probablement la variation des proportions de montmorillonite. Mais, bien que très élevée, elle reste un peu inférieure, jusque dans les horizons B, à la capacité d'échange théorique de la montmorillonite : 100 mé pour 100 g (si l'on considère que les horizons B contiennent en moyenne 80 % de montmorillonite). La différence n'est cependant pas significative, compte tenu des erreurs qui peuvent affecter les différentes déterminations. On peut donc dire que, dans les horizons B, il n'y a pratiquement pas de blocage des positions d'échanges, malgré les fortes proportions de fer libre. On sait que le blocage des positions d'échanges peut être provoqué par la précipitation d'hydroxydes de fer ou par le placage de grands ions organiques sur les surfaces des argiles (RUELLAN, 1958). Il y a donc une forte probabilité pour que le fer libre ne soit pas fixé sur les argiles, mais provienne de leur réseau.

Dans les horizons C, on dépasse la capacité d'échange théorique de la montmorillonite, malgré de grandes quantités de fer libre et un rapport fer libre sur fer total élevé. Mais ici, il faut faire intervenir, pour expliquer ces fortes valeurs, la capacité d'échange des fractions limoneuses - qui peuvent être constituées d'argiles dans les matériaux en voie d'altération - et des feldspaths dont l'hydratation des surfaces donnerait une certaine capacité d'échange (McALEESE et McCONAGHY, 1957).

Les variations de la capacité d'échange de la terre fine concordent assez bien avec celles des argiles (fig 19 a et b).

- Horizon A 11 : 12 à 32 mé pour 100 g de terre, avec fréquence maximum dans la classe 17 à 22 mé.
- Horizon A 12 : 17 - 32 mé avec fréquence maximum dans la classe 22 - 27 mé pour 100 g de terre.

- Horizon B : 22 à 37 mé pour 100 g de terre, avec fréquence maximum dans la classe 22 à 27 mé
- Horizon C : 22 à plus de 42 mé, avec fréquence maximum dans les classes 27 - 32 mé, et 32 à 37 mé.

Rappelons ici l'évolution du pH à travers les profils (fig. n° 20). Le pH oscille entre :

- A 11 : de 5,4 à 8,2, avec une distribution normale à courbe de fréquence aiguë - classe moyenne 6,2 à 6,6.
- A 12 : de 5,5 à 8,2, avec une fréquence maximum extrêmement élevée dans la classe 6,2 à 6,6.
- B : de 6,2 à 8,6, avec un maximum dans les classes couvrant les valeurs 6,2 à 7,4.
- C : de 6,6 à 8,2, avec fréquence maximum dans la classe 7,8 à 8,2.

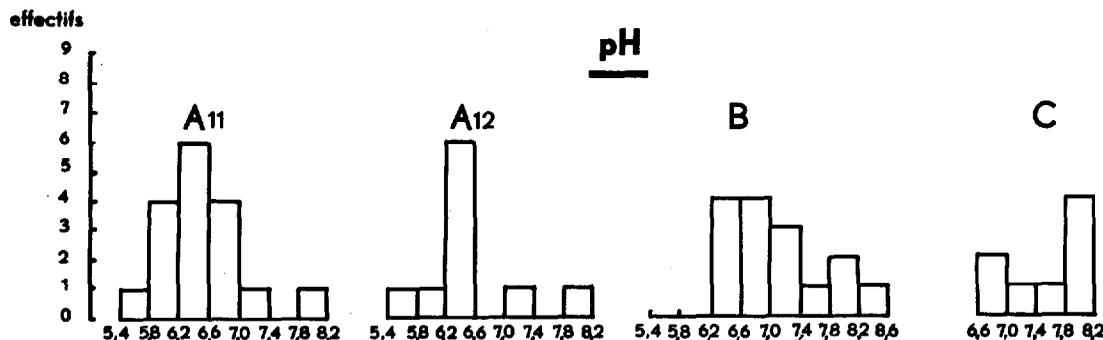


Fig.- 20

Malgré des pH en moyenne faiblement acides en surface, parfois même acides (5,4), les taux de saturation (V) sont très élevés indiquant un complexe absorbant entièrement saturé ou très proche de la saturation. Ils oscillent entre 86 % et plus de 100 %, avec dans tous les horizons, une fréquence maximum élevée à très élevée dans la classe des V supérieurs à 100.

Tous les horizons B, (sauf un seul saturé à 73 %) ont des taux de saturation supérieurs à 100.

Les capacités d'échange et les bases échangeables ont été déterminées au moins deux fois (pour la capacité d'échange : une fois à l'acétate d'ammonium et une fois au chlorure de calcium) pour les échantillons à pH inférieur à 6,5, trois fois pour certains échantillons. Nous avons fait tester quelques échantillons au Laboratoire des Sols de Bondy qui a obtenu les mêmes taux de saturation après détermination des bases échangeables tant par la photométrie de flamme que par la complexométrie. DUCHAUFOR (1961) admet que les sols à pH 7 "ont une valeur de V de 60 à 90 %". Lorsque tous les ions fixés sur le complexe sont des cations métalliques, le sol est alors saturé et son pH minimum est de 11 à 12 (DEMOLON, 1948).

Ces relations entre le pH de la solution du sol et la saturation du complexe absorbant supposent une corrélation directe entre les ions H⁺ de la solution du sol et ceux du complexe absorbant, les premiers étant fournis par la diffusion des seconds.

Or pendant la décomposition et la minéralisation de la matière organique, différents constituants sont libérés, notamment du gaz carbonique des acides organiques... En période humide ils sont facilement lessivés, mais aux faibles humidités, ils peuvent rester sur place sans pouvoir réagir sur le complexe absorbant, et provoquer une baisse du pH de la solution de sol, notamment dans les gammes de pH neutres à alcalins.

Par ailleurs, l'hydrolyse des sels solubles acides a une action incontrôlable sur le pH qu'il abaisse tout en élevant le taux de saturation.

La nature des collottes intervient aussi sur le pH de la solution du sol : c'est ainsi qu'une montmorillonite saturée à 80 % serait aussi acide (pH 6) qu'une kaolinite saturée seulement à 40 % (DUCHAUFOR, 1961).

En fonction de toutes ces considérations, il semble plus logique de raisonner seulement sur le taux de saturation qui est cependant entaché d'erreurs, de par la difficulté de détermination de la capacité d'échange. Cette dernière varie avec le pH, les cations échangeables, les phénomènes de blocage des positions d'échange, la perte éventuelle des humates alcalins... (RUELLAN, 1958).

On considèrera néanmoins, en se référant aux taux de saturation, que le complexe absorbant est saturé ou proche de la saturation dans les Vertisols.

Quant à l'équilibre des cations du complexe, le magnésium est d'une façon générale, très largement représenté dans le complexe absorbant. Le sodium atteint et dépasse dans un certain nombre de profils les valeurs critiques admises pour une dégradation de la structure. On considère généralement qu'il y a danger de dégradation de la structure quand le sodium représente plus de 15 % de la capacité d'échange, limite en fait assez optimiste (HENIN et al. 1960). Il ne faudrait pas, en réalité, dépasser 7,5 % (GREENE, 1948). Mais on admet aussi que cet état critique est atteint quand le sol contient plus de 2 à 3 mé de sodium échangeable pour 100 g de sol.

Dans l'horizon B du profil VN 17 la valeur du rapport sodium sur capacité d'échange atteint 16 % et plus de 23 % dans l'horizon C (B).

Mais il a déjà été signalé que l'influence du sodium sur la structure des vertisols ne se dégageait pas d'une façon bien définie.

En conclusion, ce sont des sols à complexe absorbant saturé ou presque saturé en calcium et magnésium, avec parfois une nette influence sodique.

2.2.3.5 - Caractéristiques analytiques structurales.

a) Porosité (fig. 21)

La porosité totale des mottes des horizons de profondeur est faible ; en moyenne, elle ne dépasse pas 26 à 28 cm³ pour 100 g de terre, la valeur maximale étant ici de 32 cm³ pour 100 g de terre (*). La macroporosité, différence entre la porosité totale et la microporosité (volume occupé par l'eau correspondant à l'humidité équivalente) est très faible ou nulle pour les horizons de profondeur : il y a asphyxie totale ou partielle.

Par contre, ces caractéristiques s'améliorent beaucoup en surface : de très nombreux horizons A 11 et A 12 ont une macroporosité moyenne à bonne (asphyxie partielle faible à absence d'asphyxie). Mais nombreux (parmi les horizons A 12 surtout) sont encore ceux qui ont une macroporosité faible à nulle (asphyxie partielle très prononcée ou asphyxie totale). Ce caractère de macroporosité très faible sur la plus grande partie du profil est une des caractéristiques actuellement retenues par la classification française dans la définition des Vertisols.

b) Tests Henin (HENIN et al, 1960) : Indice d'instabilité structurale (Is) et coefficient de percolation (K cm/h) (fig. 22)

Les horizons de surface (A 11) ont en moyenne des caractéristiques analytiques structurales moyennes, tant pour l'indice d'instabilité structurale que pour le coefficient de percolation. Cependant, un assez grand nombre d'entre eux se range dans les catégories très médiocres à mauvaises.

Pour les horizons de profondeur (ici A 12 et B) deux pôles extrêmes peuvent être distingués : un à caractéristiques structurales moyennes (tant pour Is que pour K) et un à caractéristiques structurales très mauvaises (K nul et Is élevé). Entre ces deux pôles, une majorité d'échantillons montre des caractéristiques médiocres à mauvaises. Certains des échantillons de profondeur ont donc exactement le comportement de terre sodique : il s'agit souvent effectivement d'échantillons dépassant le seuil critique de sodium (profils VN 17 ; VK 50 ; VY 15), mais certains, comme dans le profil VRN 4, n'ont que des teneurs négligeables en sodium.

(*) L'expression de la porosité en cm³ pour 100 g peut paraître quelque peu insolite, mais elle est homogène avec l'expression de l'humidité équivalente en g pour 100 g (équivalente à des cm³ pour 100 g), et la seule utilisation de la porosité des mottes, qui ne peut être considérée comme la porosité du sol, est son rapport avec l'humidité équivalente, que VIGNERON et DESAUNETTES (1958) considèrent comme valable en tant qu'indice de compacité et de risques d'asphyxie.

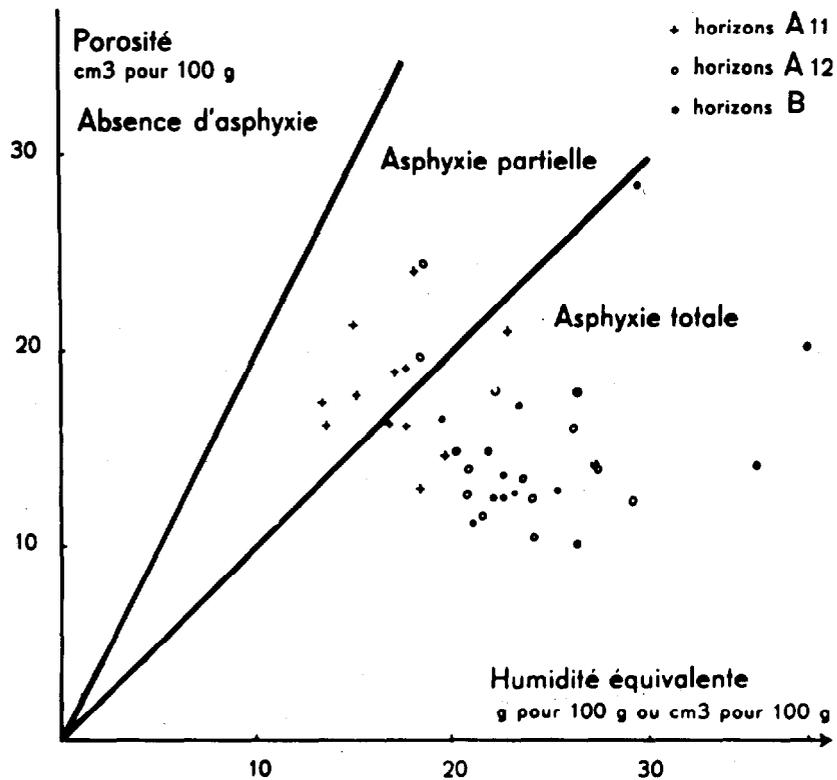


Fig.- 21

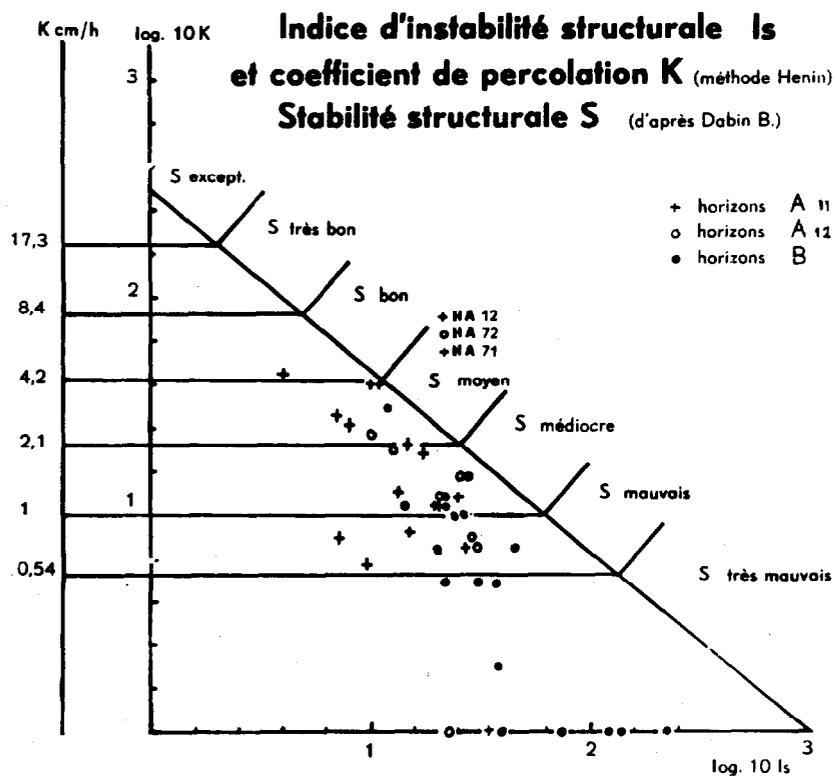


Fig.- 22

On peut cependant conclure d'une manière générale que l'influence sodique contribue à une forte diminution du coefficient de percolation qui s'abaisse à zéro, mais elle ne semble pas avoir d'influence nette sur l'indice d'instabilité structurale.

2.2.3.6. - Réserves minérales.

Les réserves minérales sont très élevées et les bases totales dosées après attaque à l'acide nitrique concentré représentent souvent plus du double ou du triple de la somme des bases échangeables.

3. - DISCUSSION DE LA CLASSIFICATION.

Relations avec les Sols Bruns eutrophes et les Sols Halomorphes associés

3.1 - Définitions.

Après la classe des Sols Hydromorphes, celle des Vertisols est la plus importante au point de vue superficiel dans des zones prospectées.

La classe des Vertisols est une nouvelle venue dans la classification française. Elle a été d'abord définie par les auteurs américains dans la 7^{ème} approximation en 1960 : Sols à argiles gonflantes, ayant plus de 35 % d'argile à capacité d'échange supérieure à 30 mé pour 100 g de terre, évoluant sous climat sec, mais avec une source saisonnière d'eau permettant le gonflement et le retrait des argiles (fissuration, microrelief gilgai, structure prismatique).

On voit que dans cette définition interviennent essentiellement des caractères physiques, manifestation du gonflement et du retrait des argiles. La limite de la capacité d'échange fixée à 30 mé pour 100 g exclut cependant les argiles kaolinitiques, et on peut considérer que la genèse est sous-entendue dans la définition. C'est ainsi en fait que les auteurs américains ont voulu leurs définitions : la genèse ne doit pas apparaître dans la définition, mais doit être sous-entendue (SMITH, 1963).

Dans la classification américaine elle-même, les Vertisols semblent introduire une certaine discontinuité. En effet, cette classification est basée sur la présence ou l'absence d'horizons de diagnostic soigneusement définis au point de vue morphologique, structural et chimique. Or, précisément, la définition des Vertisols ne fait intervenir la présence ou l'absence d'aucun de ces horizons de diagnostic à l'échelon de la classe. DUCHAUFOR (1961) souligne cette discontinuité en considérant que la création d'un ordre distinct pour les Vertisols se justifie difficilement : "en effet, beaucoup de ces sols sont caractérisés par un épipedon mollique ; on ne voit pas pourquoi le critère de richesse en argiles gonflantes l'emporte sur le critère évolutif proprement dit, alors que la genèse de ces sols est très semblable à celle de certains Mollisols." Mais les auteurs américains ont bien spécifié que leur classification avait un but pratique, et il faut reconnaître que cette définition a un caractère essentiel à cet égard.

AUBERT (1963), dans sa nouvelle classification, a repris l'appellation de Vertisols, mais en élargissant et en modifiant leur définition d'origine : couleur foncée relativement à la teneur en matière organique, structure prismatique ou polyédrique large et grossière, accompagnée d'une macroporosité extrêmement faible des blocs sur au moins la moitié du profil. La classification française ne retient pas la forte teneur en argile, ni la dominance de certains types d'argiles gonflantes. La classe ainsi remaniée est celle des Vertisols et Paravertisols. Elle remplace l'ancien groupe des Sols à Argiles foncées tropicales, autrefois classé dans les Sols Hydromorphes. Cette nouvelle définition des Vertisols, qui répond au même souci de différenciation d'un type de sol assez caractéristique au point de vue morphologique, reste en conséquence aussi peu génétique que celle des auteurs américains (parce que basée sur les mêmes principes fondamentaux), et surtout elle paraît introduire une discontinuité dans une classification essentiellement génétique. Ainsi la genèse semble sous-entendue, comme dans la classification américaine, mais n'apparaît pas dans la définition. Ceci provoque un décalage qui place les Vertisols à un échelon trop élevé. En interprétant la définition en termes génétiques équivalents à ceux des autres classes, les Vertisols se retrouveraient facilement dans l'une des classes déjà définies. C'est

ainsi par exemple que la couleur foncée relativement à la teneur en matière organique est considérée comme caractéristique des complexes humus-montmorillonite (D' HOOE 1955) et, sous-entendu, des sols à mull. La macroporosité très faible en B n'est qu'une conséquence de l'intensification des phénomènes d'hydromorphie par le gonflement des argiles : en termes génétiques, elle se traduit par sols (à argiles gonflantes) à engorgement temporaire, évoquant ainsi la définition du S.P.I (1961) : sols calcimorphes à engorgement au moins temporaire.

Cette discontinuité introduite par une définition des Vertisols d'après des propriétés et non d'après un type génétique, apparaît encore plus par rapport aux sols très voisins qui leur sont associés ici : les Sols Bruns eutrophes et les Sols Halomorphes.

3.2 - Relations Sols Bruns eutrophes-Vertisols.

Ainsi par exemple, il n'apparaît pas dans le cadre des études effectuées en Haute-Volta (Bassins versants des Volta Blanche et Rouge) et au Sénégal oriental (*) (feuille de Dalafi) qu'il existe entre les Sols Bruns eutrophes et les Vertisols de différence fondamentale qui justifierait une différenciation au niveau de la classe. Cette différenciation pourrait apparaître au niveau de la sous-classe et parfois du groupe :

3.2.1 - LA NATURE DE L'ÉVOLUTION. : les conditions d'altération consistent dans les Vertisols en une bonne représentativité des argiles du type 2/1, avec une moindre dominance (non constante) de la montmorillonite et une plus grande représentativité de la kaolinite (non constante) dans les Sols Bruns eutrophes.

Cette richesse moins grande en montmorillonite et plus grande en kaolinite semble se traduire par une différence dans la dynamique du fer : dans les Vertisols lithomorphes de Haute-Volta, le fer semble faire partie intégrante du réseau cristallin des argiles (voir dynamique du fer dans les Vertisols) et ceci se traduit par une faible individualisation ; dans les Sols Bruns eutrophes, l'augmentation de la proportion de kaolinite semble se traduire par une individualisation plus poussée du fer, avec, comme conséquence morphologique, un aspect rubéfié par rapport aux Vertisols.

Ces variations du taux des minéraux de type 2/1 sont liées à la nature de la roche-mère (moins basique dans les Sols Bruns eutrophes) ou à des conditions de station influençant le régime hydrique : ce sont des différenciations au niveau de la sous-classe.

PAQUET, MAIGNIEN et MILLOT, (1961) confirment bien l'identité des conditions d'altération, lorsque, à propos des Sols Bruns eutrophes et des Vertisols, ils écrivent : "les conditions d'altération sont telles - richesse en Ca ++ et Mg ++, drainage déficient - que la montmorillonite est leur minéral caractéristique commun. Il est donc nécessaire pour les définir de s'appuyer sur d'autres critères, en particulier leur structure, qui influe profondément sur la morphologie des profils".

3.2.2 - LE CHIMISME DU COMPLEXE ABSORBANT. Il est peu différent d'un type de sol à l'autre. Il y a saturation à base de calcium et de magnésium. Là encore, les différenciations de détail consistent en un pH plus élevé des Vertisols, lié à la nature de la roche mère ou à des conditions de station influençant le régime hydrique. Cependant, il faut noter d'une façon générale la dominance toujours nette et souvent très forte, du calcium sur le magnésium, et l'absence de quantités appréciables de sodium dans le complexe absorbant des Sols Bruns eutrophes. Cet équilibre des cations peut jouer dans l'orientation de la structure vers des types polyédriques ou à tendance polyédrique, et vers des cohésions plus faibles.

3.2.3 - LE TYPE D'HUMUS.

Il fait l'objet des travaux de recherche poursuivis par C. THOMANN au centre O.R.S.T.O.M. de Dakar.

La saturation du complexe absorbant à base de calcium et de magnésium dans les deux types de sols, les conditions climatiques identiques, la nature des minéraux argileux et les conditions écologiques (au moins en surface) assez voisines, ne semblent pas préjuger de différences fondamentales. Du reste, il semble y avoir accord entre les différents auteurs pour identifier la matière organique des Vertisols au type mull : DUCHAUFOR (1960) parle de complexe montmorillonite-humus ou illite-humus, et le confirme avec DOMMERGUES en 1963.

(*) rapport à paraître

3.2.4 - LA NATURE PHYSIQUE DE L'ÉVOLUTION.

a. La structure.

La structure elle-même n'est pas fondamentalement différente. Vertisols et Sols Bruns eutrophes de ces régions appartiennent au même type structural fondamental : la structure prismatique, et le concept central du Sol Brun eutrophe semble être le sous-groupe vertique. Les structures polyédrique, cubique et en plaquettes obliques sont essentiellement des structures secondaires.

A l'égard des Sols Bruns eutrophes, ce n'est pas le prisme ni même la taille du prisme qui est spécifique des Vertisols, mais la sous-structure en plaques, plaquettes ou prismes à faces obliques patinées, luisantes, plus ou moins striées, spécifiquement liées à une intensité de gonflement élevée, et aussi, semble-t-il, à une aptitude du sol à transmettre les poussées dans une direction bien définie. Ainsi, des sols riches en montmorillonite, à fort pouvoir de gonflement, se manifestant par un beau développement de faces de glissement obliques, luisantes (Vertisols), peuvent présenter une structure prismatique petite sur la totalité du profil, avec une macroporosité des mottes extrêmement faible en profondeur. Par contre, certains sols beaucoup moins riches en argiles gonflantes, présentent une structure prismatique large peu développée, coexistant avec une structure prismatique petite à tendance polyédrique, avec une macroporosité des mottes beaucoup plus élevée que dans les Vertisols, et les caractéristiques analytiques (capacité d'échange, bases échangeables, taux de saturation, capacité d'échange des argiles ...) de Sols Bruns eutrophes.

Dans le cas des Sols Bruns eutrophes, la diminution de la capacité de gonflement, soit par diminution de la proportion de montmorillonite, soit par diminution de la profondeur du profil, par modification de l'équilibre des cations ou par l'action du calcaire, jointe à une diminution de la cohésion des prismes initiaux (modification de l'équilibre des cations) se traduit par la disparition des clivages obliques. On obtient des structures secondaires du type prismatique ou polyédrique souvent à tendance plus ou moins prismatique. Les polyèdres peuvent acquérir un développement masquant plus ou moins la structure prismatique, qui devient seulement une sur-structure. Ce phénomène apparaît très souvent dans les Sols Bruns eutrophes du Sénégal oriental (feuille de Dalafi) où polyèdres et prismes se disputent la première place, le polyèdre lui-même gardant très souvent une nette tendance prismatique.

Mais la forme polyédrique elle-même n'est pas strictement spécifique du Sol Brun eutrophe à l'égard du Vertisol. La structure polyédrique constitue les horizons A des Vertisols et peut se maintenir jusqu'à 50 cm de profondeur. Elle peut se trouver dans l'horizon B2 de certains Vertisols, au-dessous d'un B1 à structure en plaquettes obliques patinées. Elle peut apparaître dans des horizons B à structure en plaquettes obliques patinées, mais alors en assemblage compact et très peu développée.

Ces variations structurales semblent liées, comme il a été signalé plus haut :

- à des conditions particulières de station ou d'épaisseur du profil agissant sur l'intensité des phénomènes de gonflement et de retrait. La possibilité de dessiccation plus prononcée, suivie d'une humectation plus rapide, favorise l'affinement de la structure. Cette possibilité n'est pas liée seulement aux conditions de station et d'épaisseur du profil, mais aussi aux modifications dans la proportion et la capacité de gonflement des minéraux argileux.
- à des modifications dans la proportion des minéraux gonflants, dont la diminution peut se traduire par une amélioration du régime hydrique (diminution du gonflement, amélioration de la perméabilité, dessiccation plus prononcée), même dans un sol profond et en position quasi plane, avec la même morphologie que des sols en position de bon drainage externe.
- et probablement à une modification dans l'équilibre des cations et parfois à l'action du calcaire.

b. La macroporosité.

La macroporosité des mottes ne dépend pas de la taille des éléments structuraux, mais de l'intensité des phénomènes de gonflement et de la dispersion des colloïdes du sol (en dehors de l'action biologique). Dans les sols à forte capacité de gonflement, la dessiccation provoque une mise sous tension du sol, se traduisant, d'une part, par une expulsion de l'eau et une diminution de volume équivalente jusqu'à la limite de retrait ; et d'autre part, par un déplacement des particules d'argile vers la position de plus grande densité (MEANS et PARCHER, 1964). La macroporosité du sol s'exprime essentiellement par les fentes de retrait, et les blocs ou agrégats ont une macroporosité très faible ; c'est une caractéristique des Vertisols (AUBERT, 1963).

Dans les sols où le gonflement ou la dispersion des argiles sont faibles, la macroporosité créée dans les mottes par l'activité biologique, ou par l'existence de sous-structure, n'est pas détruite lors de l'humectation ou de la dessiccation du sol qui n'est pas soumis à de fortes tensions. C'est à cet égard que les Sols Bruns eutrophes marquent sur les Vertisols une amélioration de la macroporosité et de la stabilité de la structure (indice d'instabilité structurale et test de percolation Hénin).

3.3. Relations Vertisols-Sols halomorphes.

En ce qui concerne la famille la plus typique des Sols Halomorphes de ces régions, la différenciation par rapport aux Vertisols est délicate et imprécise. Le chimisme du complexe absorbant, les conditions d'altération, peuvent rester identiques. Ainsi, dans ces sols, la fraction argileuse assez abondante (de l'ordre de 30 à 40 %) est à dominance ou même exclusivement montmorillonitique. Le complexe absorbant est saturé par du calcium et du magnésium, mais avec une proportion importante de sodium, se retrouvant cependant dans certains Vertisols typiques, qui accusent en conséquence les mêmes caractéristiques analytiques structurales de terre sodique : coefficient de percolation nul, et indice d'instabilité structurale très élevé.

La différenciation de ces deux types de sols est basée sur une manifestation faible des phénomènes de remaniement interne, corrélatif non d'une diminution de la proportion des minéraux gonflants, mais de la présence de proportions assez importantes de sodium échangeable sur le complexe absorbant.

Cette faible intensité des remaniements internes, c'est-à-dire du gonflement et du retrait, aboutit à la création d'une structure polyédrique ou (et) prismatique.

Le plus souvent, la structure va du type polyédrique (grossier à petit) bien développée, (sols alors difficiles à distinguer d'un Sol Brun eutrophe) au type polyédrique en assemblage très compact, avec une cohésion d'ensemble forte à très forte, aboutissant même parfois à un aspect massif ou continu. La structure polyédrique peut avoir une tendance plus ou moins prismatique. La structure prismatique, souvent à tendance colonnaire, apparaît parfois, mais seulement en surface ou immédiatement en dessous des apports superficiels sableux qui recouvrent le matériau halomorphe. C'est surtout ce caractère qui rapproche ces sols des sols Halomorphes. Cette structure est généralement limitée à des épaisseurs très faibles, de l'ordre de 10 cm environ et passe très vite à la structure de type polyédrique.

En profondeur, la structure prismatique, parfois aplatie, à faces de décollement horizontales à obliques plus ou moins patinées (passage parfois à la plaquette oblique patinée des Vertisols), apparaît souvent, marquant alors une nette tendance vers les Vertisols. Cette structure peut être à assemblage plus ou moins compact et se superposer à la structure polyédrique.

Ces variations structurales ne s'accompagnent pas, en ce qui concerne les bassins versants des Volta Blanche et Rouge, de variations corrélatives des proportions de sodium échangeables à l'intérieur des Sols Halomorphes.

Il y a dans cette différenciation des Sols Halomorphes par rapport aux Vertisols un certain paradoxe. En effet, la structure la plus universellement reconnue comme étant caractéristique des matériaux argileux sodiques est la structure allongée suivant un axe vertical, c'est-à-dire la structure prismatique et sa variété colonnaire. C'est ainsi que les sols à gilgai seraient acceptés partout ailleurs en tant que sols solonetziques (HARRIS, 1958). On a déjà signalé la relation qui existe entre la capacité de gonflement et la teneur en sodium échangeable. Le profil VN 17 (Vertisol typique), avec dans l'horizon B ses gros prismes branlants, ses larges fentes de retrait formant galeries et témoignant d'une capacité de gonflement très élevée, ses 28 % de sodium échangeable par rapport à la capacité d'échange, apparaît mieux comme un sol solonetzique à l'égard des sols à structure peu développée, et souvent de type polyédrique, que sont les Sols Halomorphes.

Les structures du type massif ou continu ne se forment que si le sol possède un squelette inexposable et incompressible par les forces mises en jeu lors de l'humectation et de la dessiccation, et dans lequel la dispersion de l'argile colmate les vides, donnant alors une cohésion très forte dans le cas d'argile sodique (DURAND, 1958). Durand réserve la structure massive ou continue "à la boue homogène à texture suffisamment grossière pour qu'elle se dessèche sans qu'il se produise des fentes de retrait".

On constate une plus grande richesse en sables de ces sols halomorphes par rapport aux vertisols (30 à 50 %

de sables dans les Vertisols, le plus souvent même 30 à 40 % ; et 40 à 60 % dans les sols halomorphes sur argile finement sableuse).

Il se pourrait que le rôle de "dégraissant" que peuvent jouer les sables (DURAND, 1958) ne soit pas à négliger. C'est ainsi qu'il a été remarqué, sur les Vertisols à texture argilo-sableuse à sablo-argileuse en surface, que cet allègement de la texture par apports de sables contribuait souvent à élargir la structure (qui tend à devenir massive), par atténuation des phénomènes de retrait qui provoquent normalement cet aspect brisé en surface.

Cependant, si on en croit HALLSWORTH et al. (1955, fig. 7 page 23), l'aptitude du sol à transmettre les poussées dans une direction bien définie (mesurée par l'amplitude du gilgai) serait une fonction croissante du produit du gonflement par la teneur en sables + limon jusqu'à une valeur asymptote. On connaît, dans les régions faisant l'objet de cette étude, des Vertisols à horizons B argilo-sableux, ou même sablo-argileux, parfois littéralement bourrés de sables feldspathiques, et cependant à belle structure en plaquettes obliques luisantes plus ou moins striées.

Peut-être l'action dominante au point de vue structural appartient-elle au calcium, dont l'accumulation est constante dans ces sols, et qui tend à induire des structures du type polyédrique.

Comme dans le cas des Sols Bruns eutrophes, il semble bien que, la différenciation avec les Vertisols soit due essentiellement aux conditions de drainage. Selon HALLSWORTH et al. (1955), lorsque la surface du sol est sableuse (cas de nombreux sols halomorphes ici mais aussi des Vertisols à recouvrements), on obtient une dessiccation uniforme en profondeur ; la couche superficielle desséchée agit comme un mulch, la fréquence et l'ampleur des changements de volume deviennent minimum et, dans les cas extrêmes, il ne se forme pas de gilgai. C'est ainsi que ces auteurs expliquent l'absence du gilgai dans les solonetz solodisés et dans les solods où pourtant, ajoutent-ils, le schéma de gonflement ressemble qualitativement à celui des sols à gilgai. Si tel était le cas ici, l'état de l'humidité du sol devrait être nettement meilleur dans les Sols Halomorphes que dans les Vertisols. Or, c'est le phénomène inverse qu'on observe. La structure polyédrique des horizons A des Vertisols agit comme un mulch efficace, car les horizons B en place se laissent toujours pénétrer facilement par la sonde, et sont presque malléables, alors que les horizons B de Sols Halomorphes sont secs et impénétrables à la sonde.

Il faut faire appel à un autre processus pour expliquer cette différence de comportement : les Sols Halomorphes associés aux Vertisols apparaissent comme des sols totalement imperméables et dont l'humidification qui permettrait le gonflement serait très difficile et imparfaite, atténuant ainsi les phénomènes de remaniement interne. Les petites cuvettes qui se forment parfois à leur surface sont affectées par un hydromorphie très intense et très superficielle, qui témoigne de l'imperméabilité des matériaux constitutifs. D'une façon générale, l'aspect superficiel de ces sols est toujours très hydromorphe par rapport aux Vertisols.

Par ailleurs, leur végétation est le plus souvent typiquement sahélienne, même sous climat soudano-guinéen : maigre végétation constituée par quelques *Balanites aegyptiaca* et *Acacia seyal* disséminés par minuscules bosquets ou par pieds isolés, laissant de larges plages de sol nu (phénomène caractéristique surtout dans le Sénégal oriental où ces sols acquièrent un grand développement).

Dans le concept évolutif de ces matériaux argileux montmorillonitiques, les Sols Halomorphes apparaissent donc moins évolués par rapport aux Vertisols, par suite d'un déficit en eau dû à leur imperméabilité.

3.4. Conclusion

En conclusion, il apparaît que Vertisols, Sols Bruns eutrophes et Sols Halomorphes associés forment un complexe de sols à genèse assez comparable, ne se différenciant que par des caractéristiques secondaires : intensité de gonflement, variations dans le taux des minéraux 2/1 principalement du groupe montmorillonite, degré de développement de la structure. Ce complexe de sols caractérise, en zone tropicale semi-humide, les conditions d'altération en milieu basique. Ces sols pourraient être différenciés à l'échelon de la sous-classe et peut-être parfois du groupe.

4 - CONCLUSION GÉNÉRALE A L'ÉTUDE DES VERTISOLS.

En définitive, le concept de Vertisols auquel on aboutit est celui des auteurs américains : ce sont des sols dont les caractéristiques morphologiques distinctives sont les manifestations saisonnières de phénomènes de remaniements internes, dûs à la forte capacité de gonflement du sol, et à la possibilité de réalisation de ce gonflement par une humidification suffisante. Ces phénomènes de remaniements internes se traduisent essentiellement par un glissement de tranches de sol les unes sur les autres, selon des faces plus ou moins obliques, plus ou moins larges, parfois conchoïdales, luisantes et plus ou moins striées. La phase ultime de leurs manifestations est le gilgai.

Mais ces caractéristiques ne peuvent intervenir à un échelon aussi élevé que la classe dans une classification de type génétique telle que la classification française ; elles ne relèvent que de différenciations de l'ordre de la sous-classe, sinon parfois du groupe.

C'est ainsi que les Vertisols, les Sols Bruns Eutrophes et les Sols Halomorphes associés forment un complexe de sols à genèse assez voisine, ne se différenciant que par des caractéristiques secondaires : intensité de gonflement, variations dans la proportion des minéraux 2/1 principalement du groupe montmorillonite : ce complexe de sols caractérise en zone tropicale semi-humide les conditions d'altération en milieu basique.

Au point de vue chimisme du complexe absorbant, les Vertisols sont des sols à complexe absorbant saturé et à matière organique du type Mull que rien n'exclut de la grande classe des Sols à Mull.

En ce qui concerne la différenciation actuelle des Vertisols au niveau de la sous-classe, il faut signaler que dans les conditions hydrographiques des régions étudiées, les Voltas, à plus forte raison leurs affluents, cessent rapidement de couler après la saison des pluies. L'hydromorphie est plus intense dans les dépressions, mais elle ne s'y maintient pas pendant de longues périodes. La définition de la sous-classe des Vertisols à pédoclimat très humide pendant de longues périodes ne s'applique donc pas ici en toute rigueur.

SITUATION DES LOCALITÉS CITÉES.

	Longitude W	Latitude N
Bétaré	1° 23'	11° 26'
Katbo	1° 1'	11° 45'
Korsimoro	1° 5'	12° 49'
Masa	1° 10'	12° 52'
Niaogo	00° 46'	11° 46'
Nobéré	1° 12'	11° 33'
Zabré	00° 39'	11° 10'

BIBLIOGRAPHIE.

- AUBERT (G.), DUCHAUFOR (Ph.) - 1956. - Projet de classification des sols. Congr. intern. Sci. Sol, 6, Paris, E, pp. 597-604.
- AUBERT (G.) - 1958.- Classification des sols. Analyse de livres, brochures et articles à l'intention des Pédologues de l'ORSTOM, VIII, 2, pp. 1-3.
- AUBERT (G.) - 1962.- Classification des sols. Nouvelle approximation. Pédologie (à paraître).
- AUBERT (G.) - 1964.- La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride. Sols Afric., IX, 7, pp. 97-105.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) - 1963.- Minéralogie des argiles. Masson et Cie, Paris, 356 p.
- CAILLEUX (A.), TAYLOR (G.) - Code expolaire. Boubée et Cie, Paris, 19 p.
- DEMOLON (A.) - 1948.- La dynamique du sol. 4ème ed. Dunod, Paris, XVIII, 414 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1960.- Précis de Pédologie. Masson et Cie, Paris 438 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1961.- Données nouvelles sur la classification des Sols. Ann. de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts, XVIII, 4, pp. 1-68.
- DUCHAUFOR (Ph.), DOMMERGUES (Y.) - 1963.- Etude des composés humiques de quelques sols tropicaux et subtropicaux. Sol Afric., VIII, 1, pp. 5-23.
- DURAND (J.H.) - 1958.- Les sols irrigables (Etude pédologique). Impr. Imbert, Alger, 192 p.
- GASTUCHE (M.C.), FRIPIAT (J.J.), De KIMPE (C.) - 1962.- La genèse des minéraux argileux de la famille du kaolin. Genèse et synthèse des argiles - Colloques Internationaux du CNRS n° 105, Paris, pp. 57-74.
- GREENE (H.) - 1953.- Using Salty Land. 2nd ed. F.A.O. Agric. Studies, n° 3, Rome, IV, 52 p.
- HALLSWORTH (E.G.), ROBERTSON (G.K.), GIBBONS (F.R.) - 1955.- Studies in Pedogenesis in New South Wales. VII The "Gilgat" Soils. J. Soil Sci., 6, 1, pp. 1 - 31.
- HARIS (S.A.) - 1958.- The gilgaied and bad-structured soils of Central Iraq. J. Soil Sci., 9, 2, pp. 169-185.
- HENIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.), MONNIER (G.) - 1960.- Le profil cultural. Principes de physiologie du sol. Soc. Ed. Ingénieurs Agricoles, Paris, XXIV, 320 p.
- D'HOORE (J.) - 1955.- Sols et Argiles noirs tropicaux et subtropicaux. Sols Afric., III, 3, pp. 366-377.
- KALOGA (B.) - 1966.- Etude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge en Haute-Volta. 1ère Partie. Le milieu naturel. Cahiers ORSTOM, sér. Pédol., vol. IV, 1, 1966
- MAIGNIEN (R.) - 1961.- Sur les sols d'argiles noires tropicales d'Afrique Occidentale. Bull. A.F.E.S., 8, pp. 131-144.
- McALEESE (D.M.), Mc CONAGHY (S.) - 1957.- Studies on the Basaltic Soils of Northern Ireland. II. Contributions from the sand, silt and clay Separates to Cation Exchange Properties. J. Soil Sci., 8, 1, pp. 135-140.
- MEANS (R.E.), PARCHER (J.V.) - 1964.- Physical Properties of Soils. Constable and Co., London, XVI, 464 p.
- MEHRA (C.P.), JACKSON (M.L.) - 1958.- Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. National Conference on clays and clay minerals 7 th., Washington, pp. 317-327.

- PAQUET (H.), MAIGNIEN (R.), MILLOT (G.).- 1961.- Les argiles des régions tropicales semi-humides d'Afrique Occidentale. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 14, 4, pp. 111-128.
- ROSS (C.S.) - 1958.- Review of the relationships in the montmorillonite group of clay minerals. Pergamon Press. National Conference on clay and clays minerals 7 th, Washington, pp. 225-229.
- RUELLAN (A.) - 1958.- La capacité d'échange et les cations et anions échangeables. ORSTOM-IDERT, Bondy, 79 p. (multigr.).
- SABATIER (G.).- Discussion de l'article GASTUCHE, FRIPIAT et de KIMPE déjà cité. p. 75.
- SMITH (G.D.) - 1963.- Objectives and basic assumptions of the new soil classification system. Soil Sci., 96, 1, pp. 6-16.
- S.P.I. - 1961.- Réunion sur le projet conjoint n° 11. Carte des Sols. C.C.T.A./C.S.A., 18-21 septembre 1961.
- STEPHEN (I.) - 1953.- A petrographic study of a Tropical Black Earth and Grey Earth from the Gold Coast. J. Soil Sci., 4, 2, pp. 211-219.
- U . S . D . A . - 1960. - Soil Survey. Soil classification. A comprehensive system. 7th approximation U.S.D.A., Washington, VI, 265 p.
- VAN DER MERWE (C.R.) - 1940.- Soil groups and sub-groups of South Africa. Union of South Africa, Département of Agriculture and Forestry. Chemistry series n° 165. Pretoria, 316 p.
- VIGNERON (J.), DESAUNETTES (J.R.) - 1958.- Etablissement d'un indice de compacité. Bull. A.F.E.S., 4, pp. 172-182.