

**RÉPUBLIQUE UNIE
DU CAMEROUN**

**INITIATION A LA PEDOLOGIE
ET AUX SOLS CAMEROUNAIS**



F. X. HUMBEL

INITIATION A LA PEDOLOGIE
ET AUX SOLS CAMEROUNAIS

par F.X. HUMBEL
pédologue de l'O.R.S.T.O.M.

Ce cours a été donné en 1971 et 1972 aux étudiants du
département de Géographie de l'Université de Yaoundé

P 193
CENTRE ORSTOM DE YAOUNDE
SECTION DE PEDOLOGIE
Octobre 1972

RESUME

Le sol est formé d'un mélange de minéraux cristallisés ou amorphes, de matière organique, d'eau, de gaz et de vie. L'énergie reçue du soleil en fait un milieu dynamique et évolutif dont l'organisation est originale : le sol diffère ainsi de plus en plus de la roche-mère à la place de laquelle il s'est formé. Il contient des minéraux hérités qui forment l'essentiel de son squelette et des minéraux "néoformés" dont les plus importants sont des argiles, des hydroxydes et des carbonates.

Les argiles se lient à l'humus pour former le complexe absorbant. Celui-ci fixe des cations qu'il échange avec les solutions du sol. Les racines des végétaux viennent puiser leurs éléments nutritifs dans ces solutions.

La description d'un "profil" de sol effectuée sur le terrain "horizon par horizon" est complétée par l'étude micromorphologique de lames minces et par des analyses chimiques et minéralogiques au laboratoire. En fait le sol forme à la surface des terres un véritable continuum dont les caractères et les organisations peuvent être topographiquement ordonnés. C'est pourquoi le sol doit être décrit à la fois dans ses variations verticales et latérales et dans ses relations avec le modelé. Le "paysage pédologique" est ainsi le cadre normal de l'étude de ses caractères et de sa dynamique.

Les variations saisonnières d'humidité modifient l'aération du sol ainsi que sa "structure" et sa porosité en y provoquant des phénomènes de gonflement et de retrait des argiles. En s'infiltrant ou en s'évaporant cette eau déplace ou concentre des substances qu'elle a pu mettre en solution ou en suspension. Une différenciation verticale et latérale apparaît ainsi par éluviation - illuviation, faisant succéder aux horizons "lessivés" des horizons d'accumulation.

Mais l'histoire du sol complique beaucoup les organisations résultantes en y inscrivant des caractères dus aux variations des facteurs externes et des caractères dus à son auto-développement. Les sols Camerounais, notamment ceux du nord du pays qui sont les mieux connus, illustrent bien cette complexité.

ABSTRACT

The soil is formed of a mixture of crystallized or amorphous minerals, organic matter, water, gas and bio-organisms. The energy received from the sun makes this a dynamic and evolutive milieu with an original organization : the soil thus increasingly differs from the parent-rock in the place of which it was formed. It contains inherited minerals which form the main part of its skeleton and "neoformed" minerals the most important of which are clays, hydroxides and carbonates.

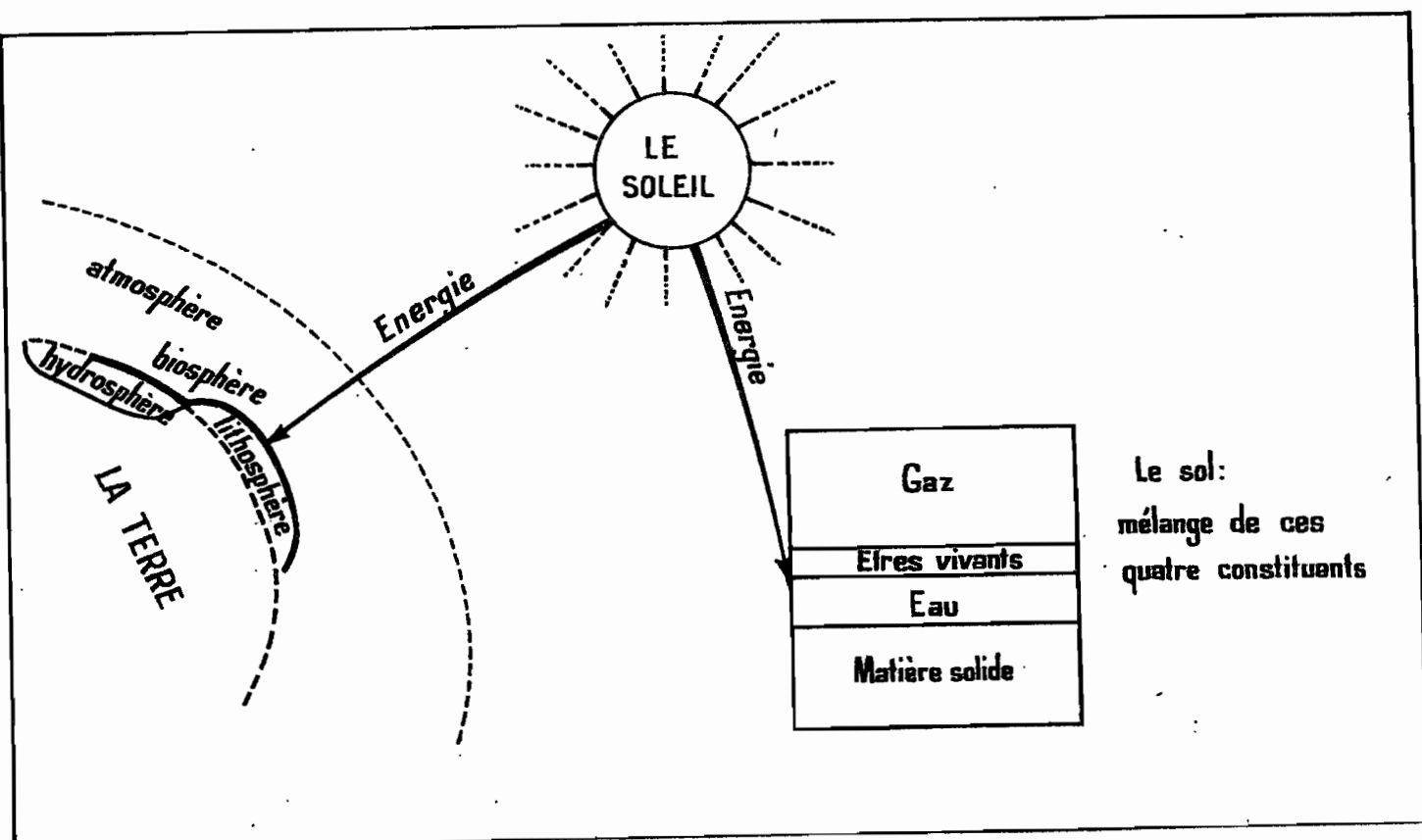
The clays combine with humus to form an absorbent complex. The latter fixes cations which it exchanges with soil solutions. The roots of plants draw their nutritive elements from these solutions.

The description of a soil "profile" made on the ground, "horizon by horizon", is completed by a micromorphological study of slides and by mineralogical and chemical analyses in the laboratory. As a matter of fact, the soil forms on the surface of the land a veritable continuum the characteristics and organization of which can be topographically arranged. This is why the soil should be described both in respect of its vertical and lateral variations and its relations with the relief. The "pedological landscape" is in this way the normal framework for the study of its characteristics and dynamics.

The seasonal variations in humidity modify the aeration of the soil as well as its "structure" and its porosity by provoking swelling phenomena and the shrinkage of clays. By infiltrating or evaporating this water removes or concentrates the substances it was able to put into solution or suspension. A vertical and lateral differentiation thus appears by eluviation-illuviation, causing accumulation horizons to replace "leached" horizons.

But the soil history considerably complicates the resulting organizations by giving them characteristics due to variations in the external factors and characteristics due to self-development. Cameroonian soils, especially those of the North of the country which are the best known, give a good illustration of this complexity.

PRESENTATION



Considérons une planète (notre terre) formée de roches et d'eau (lithosphère et hydrosphère) où des végétaux et des animaux croissent et se multiplient (biosphère), qui est entourée de gaz (atmosphère) et qui reçoit de l'énergie par le rayonnement d'un astre voisin, le soleil. Que s'y passe-t-il ; une partie de l'énergie rayonnée par le soleil va atteindre la surface de contact entre l'atmosphère et la lithosphère et y provoquer des réactions physico-chimiques et biologiques qui vont transformer et mélanger les constituants de ces quatre milieux, lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère pour former à la surface des continents un milieu particulier appelé sol.

Ce milieu est original parce qu'il ne résulte pas d'un simple mélange de minéraux de la lithosphère, d'eau de l'hydrosphère, de gaz de l'atmosphère et d'animaux de la biosphère. Il contient en effet non seulement des minéraux résistants empruntés à la roche mais aussi des minéraux nouveaux synthétisés à partir des produits de démolition des minéraux altérables de celle-ci. Son eau contient en solution des ions dont les concentrations ne sont pas les mêmes que dans la mer et les rivières, ses gaz n'ont pas la même composition que l'air, enfin les animaux ont dû pour s'y adapter se différencier en espèces particulières.

De plus comme l'énergie solaire ne cesse pas de bombarder de ses rayonnements la surface du sol, celui-ci est en perpétuelle transformation, ses constituants ne sont jamais en repos, c'est un milieu dynamique. Et c'est ce milieu formé de matière solide, d'eau, de gaz et de vie, agité et modifié par l'énergie qu'il reçoit que nous allons étudier.

Historique.

Au lieu de se demander comment les hommes en sont arrivés à s'intéresser au sol et à faire de son étude une discipline scientifique la pédologie, on devrait plutôt se demander pourquoi la science du sol s'est développée si tardivement : C'est en 1877 qu'une société savante russe a demandé au géologue DOKOUCHAEV d'étudier les effets d'une sécheresse catastrophique en Ukraine ce qui amena celui-ci à étudier les sols de steppe (chernozem) et, quelques années plus tard, le gouverneur de la région de Gorki à l'Est de Moscou lui demanda d'établir une carte des qualités des terrains de cette région (podzols) afin de répartir équitablement les impôts fonciers. Ceci permit à Dokouchaev de comparer des sols de régions fort différentes. La pédologie était née et elle n'a cessé de se développer ensuite.

Il n'a pas fallu bien sûr attendre la deuxième moitié du 19^e siècle pour que les hommes s'intéressent au sol sur lequel ils marchent, avec lequel ils construisent leurs habitations et auquel ils confient les cultures qui les nourrissent : la bible nous rapporte une discussion pertinente et documentée entre un père et sa fille au sujet des terrains qui constituent sa dot. Les romains avaient remarqué qu'une substance noire, l'humus conférait au sol sa fertilité. La première usine d'engrais fut construite en Europe en 1842 et neuf ans plus tard un premier laboratoire agronomique fut créé en France à Nantes pour vérifier la qualité de ces engrais et analyser les terres.

Mais, vous le voyez, cette science du sol est restée longtemps dominée par le souci d'améliorer les rendements agricoles : ce n'est que vers 1930 en France, 1937 en Afrique du Nord et 1945 en Afrique intertropicale que le sol commence à être étudié en tant qu'objet de recherche fondamentale.

Si le développement de la pédologie en tant que discipline scientifique indépendante a été si tardif c'est que :

1) on n'a pas compris tout de suite que c'est un milieu original, différent par exemple des formations superficielles quaternaires avec lesquelles on l'a longtemps confondu.

2) la compréhension du sol fait appel à des phénomènes tellement variés et complexes, participant de la géologie, la minéralogie, la physique, la chimie, la climatologie, la zoologie, la botanique, la microbiologie, l'agronomie, les sciences humaines etc... qu'il a fallu attendre le développement de ces sciences pour tenter avec quelques succès l'étude du sol.

Ses relations avec la géologie sont peut être les plus étroites : la formation du sol, ou pédogénèse, est en effet un maillon essentiel du cycle géologique sédimentaire. Entre la mise à l'affleurement superficiel des roches et l'entraînement de substances en solution ou suspension par le réseau hydrographique, se réalisent dans le sol des néosynthèses, des concentrations et des tris de matières qui orientent nécessairement les nouvelles sédimentations marines. L'organisation et la nature des matériaux préparés dans le sol sont en effet déterminées à la fois par l'héritage géologique, les facteurs externes du milieu et l'auto-évolution propre de la couverture pédologique. La pédologie est ainsi fille de la géologie à qui elle emprunte nombre de ses méthodes ou démarches scientifiques, qu'elle adapte à son objet.

Plan du cours. Puisque le sol est un mélange de minéraux, de solutions, de gaz et d'êtres vivants il nous faudra d'abord décrire chacun de ces constituants pris séparément, puis indiquer leur organisation ~~relative~~ dans le volume - sol puis leur dynamique saisonnière et évolutive. Ensuite on analysera les facteurs externes et internes qui les font réagir entre eux, évoluer et ainsi différencier les sols d'un point à l'autre des paysages camerounais. D'où les chapitres de ce cours :

Plan du cours

I. LES CONSTITUANTS DU SOL	
1. minéraux	1
2. organiques.....	10
3. aqueux	12
4. gazeux	14
5. vivants.....	15
II. L'ORGANISATION DE CES CONSTITUANTS	
1. Les caractères étudiés.....	20
2. Le profil et sa description.....	27
3. Les différents humus.....	34
4. Le complexe absorbant argilo-humique.....	36
5. Les solutions et les gaz du sol.....	39
6. Les racines et les animaux.....	40
7. L'échelle micromorphologique.....	43
III. LA DYNAMIQUE DES SOLS	
1. L'eau.....	45
2. Les matières solides.....	49
3. Les gaz ou atmosphère du sol.....	50
4. Les plantes et les animaux.....	51
5. La dynamique évolutive des horizons.....	53
IV. LES FACTEURS DE DIFFERENCIATION ET D'EVOLUTION	
Matériau, climat, temps.....	59
Topographie, biologie.....	61
V. LA CLASSIFICATION UTILISEE AU CAMEROUN	
1. Son principe et ses différentes classes.....	63
2. Aperçu sur les autres classifications.....	75
3. Lecture des cartes et rapports pédologiques.....	78
VI. LES DIFFERENTS SOLS DU CAMEROUN	
1. Le domaine forestier équatorial.....	85
2. Les régions volcaniques et d'altitude.....	97
3. Les paysages pédologiques du Nord-Cameroun.....	107

CHAPITRE I

PREMIERE PARTIE :

LES CONSTITUANTS DU SOL

I.1. LES CONSTITUANTS MINERAUX DU SOL

Le sol contient des minéraux provenant des roches qui lui ont donné naissance, parfois même des morceaux de roche entiers, et des minéraux nouveaux qui se sont synthétisés dans le sol lui-même à partir des matériaux de démolition (ions) de la roche.

Les premiers, appelés minéraux primaires, sont là soit parce qu'ils n'ont pas encore eu le temps de disparaître (sol jeune peu évolué) soit parce qu'ils sont résistants à toute transformation dans le milieu considéré.

Les seconds se forment parce que le milieu sol réalise des conditions physico-chimiques très différentes de celles dans lesquelles les roches se sont construites, soit au fond des mers, soit dans la profondeur de la couche terrestre à hautes pressions et températures. Par conséquent l'arrangement de leurs atomes entre eux n'est plus stable et ceux-ci cherchent une nouvelle structure qui aboutit à la formation de nouveaux minéraux dits minéraux secondaires, ou de néoformation.

Les minéraux primaires et secondaires résistants, qui ne participent pas aux transformations chimiques du sol constituent ce que l'on appelle le squelette minéral.

Il y a deux points de vue à considérer dans l'étude de ces constituants minéraux : leur taille et leur nature. La granulométrie est l'étude de la taille de ces constituants et la minéralogie celle de leur nature.

1/ GRANULOMETRIE

On a trouvé commode en pédologie de distinguer les classes granulométriques suivantes, présentées dans l'ordre des tailles décroissantes :

blocs > 20 cm > cailloux > 2 cm > graviers > 2 mm

2 mm > sables grossiers > 0,2 mm > sables fins > 50 μ

50 μ > limons grossiers > 20 μ > limons fins > 2 μ > argile

Ce découpage n'est pas entièrement arbitraire, les limites qui séparent ces différentes classes granulométriques correspondent à des solutions de continuité dans les propriétés physico-chimiques ou la nature minéralogique des constituants. Par exemple les minéraux de néoformation qui ont une structure en feuillets susceptibles de gonflement se trouvent en majorité dans la fraction argile ; au-dessus de 50 μ les particules ne sont pas facilement emportées par le vent etc. On dit qu'entre les doigts l'argile colle, le limon est onctueux, les sables crissent. Cette échelle granulométrique diffère donc quelque peu^{de} celle des géologues, des géomorphologues ou des ingénieurs des routes et bâtiments qui s'intéressent à d'autres propriétés.

La granulométrie ou répartition par taille des constituants minéraux du sol a une grande influence sur les propriétés de celui-ci et on appelle texture d'un sol : l'ensemble des propriétés physiques qui résultent directement de la taille de ses constituants. Une texture sableuse permet une percolation rapide des solutions du sol, une texture argileuse retiendra ces solutions au bénéfice des plantes.

On a donc intérêt à connaître les pourcentages relatifs d'argile-limons, sables et graviers de chaque couche homogène de sol. Habituellement on exprime d'abord sous le nom de refus le pourcentage de constituants de taille supérieure à 2 mm (graviers et cailloux) le reste constituant la terre fine ou terre tamisée à 2 mm. Les pourcentages des cinq autres classes granulométriques sont exprimés alors non par rapport au sol total mais par rapport à cette terre fine. Exemple : refus 50 % puis argile 60 % limon fin 10 % l.grossier 5 % sable fin 20 % s.grossier 5 %. Si l'on veut inclure le refus dans cette comptabilité on multiplie les cinq pourcentages par $(100 - R)/100$ et on le précise par la notation "refus inclus" ce qui donne ici :

R 50%, A 30%, LF 5%, LG 2 5% SF 10%, SG 2,5% (refus inclus)

A noter que ces pourcentages sont des taux pondéraux c'est-à-dire qu'ils expriment la fraction du poids unité occupée par chaque fraction granulométrique, sans renseigner donc sur le nombre de grains ou le volume occupé par chaque fraction. Ici par exemple, ce taux pondéral de 30 % signifie que dans un kilogramme de terre totale il y a 300 g d'argile.

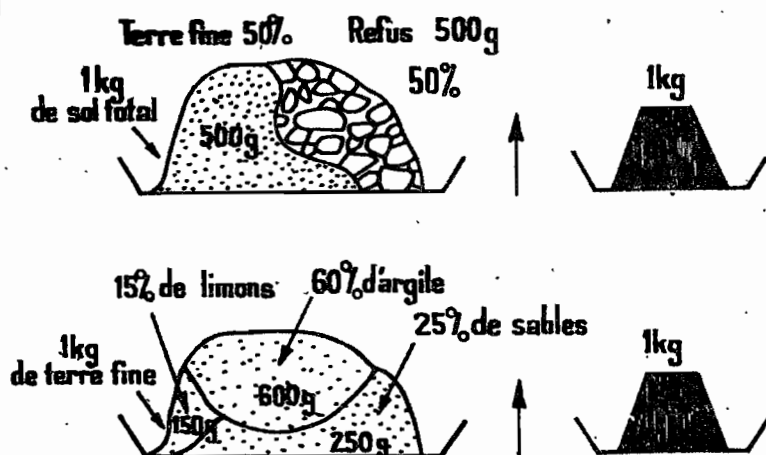
Si l'on veut connaître le volume occupé dans le sol sec par les particules d'une fraction granulométrique donnée il faut multiplier le taux pondéral refus inclus T_p par d/D où d est la densité apparente du sol sec et D la densité réelle moyenne des particules de cette fraction. On obtient ainsi le taux volumique $T_v = T_p \times d/D$.

Exemple: si le sol contient 30 % d'argile de densité réelle 2,5 et que la densité apparente du sol sec est 1,25 (c'est-à-dire qu'1 dm³ de sol pèse 1,25 kg et non 1 kg comme l'eau) son taux volumique d'argile est $30 \times 1,25/25 = 15 \%$ c'est-à-dire que si cette argile était rassemblée en un point du dm³ elle occuperait 15 % du volume, soit 150 cm³. La densité apparente s'obtient en mesurant le poids P d'un volume V de sol (prélevé par un cylindre creux à base coupante) séché à l'étude à 105° : $d = P/V$ (poids spécifique). On peut aussi déterminer le volume d'une cavité quelconque, dont on a pesé la terre extraite, à l'aide de sable jaugé ou d'eau retenue par une membrane élastique (densitomètre à membrane). On peut aussi opérer par poussée d'Archimède sur des mottes enrobées d'un enduit imperméable.

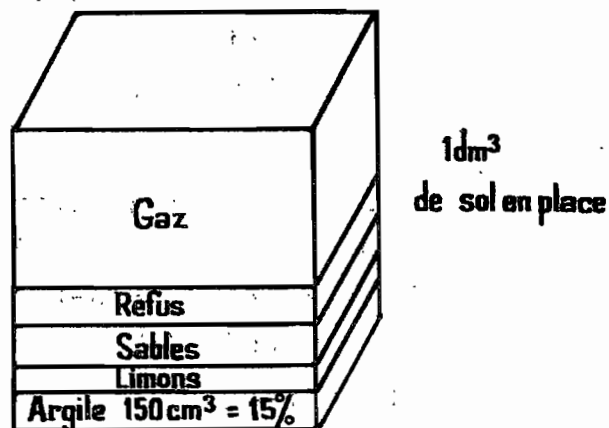
La densité réelle se mesure au laboratoire sur un échantillon finement broyé introduit dans un "pycnomètre" de volume connu. C'est le poids spécifique de la matière solide seule, dégazée.

- La densité réelle est indépendante de l'état d'hydratation du sol et varie peu (2,6 à 2,8). La densité apparente varie largement dans le sol (0,5 à 2,2) et selon l'état d'hydratation de celui-ci. La densité des roches saines est de 2,5 à 2,7 environ.

TAUX PONDÉRAUX



TAUX VOLUMIQUES



Renseigner sur la granulométrie d'un sol par six chiffres de pourcentages c'est précis mais indigeste. Aussi a-t-on défini des classes de texture qui diffèrent selon les pays ou même les pédologues, par exemple :

(pour les terres fines contenant moins de 20 % de limons)

texture sableuse	:	0	à	20 % d'argile
" sablo-argileuse	:	20	à	35 % "
" argilo-sableuse	:	35	à	50 % "
" argileuse	:	50	à	100 % "

(pour les terres fines contenant moins de 20 % de sables)

texture limoneuse	:	50	à	100 % de limons
" limono-argileuse	:	35	à	50 % "
" argilo-limoneuse	:	20	à	35 % "

(pour les terres fines contenant moins de 20 % d'argile)

texture limono-sableuse	:	35	à	50 % de limons
" sablo-limoneuse	:	20	à	35 % "

S'il existe des graviers en quantité importante (plus de 20 %) on l'exprime accolée à la fraction la plus importante ex.: texture sablo-graveleuse.

Détermination de la composition granulométrique : Un pédologue exercé et habitué à une région peut déterminer approximativement la classe texturale par malaxage de terre mouillée.

Sa détermination précise peut être faite par deux méthodes :

1/. méthode internationale par sédimentation : La vitesse de sédimentation dans l'eau d'une particule est proportionnelle au carré de son rayon

$$V = KR^2 \text{ avec } K = 34\,700 \text{ à } 20^\circ \text{ (loi de STOKES)}$$

ex.: une particule de 20μ (0.002cm) a une vitesse de chute de :

$$V = 34.700 \cdot 10^{-6}\text{cm/s} = 0.0347 \text{ (R} = 10^{-3}\text{cm)}$$

c'est à dire que pour parcourir 10cm elle mettra le temps :

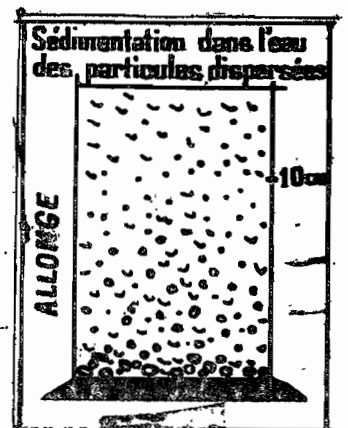
$$t = e/V = 10/0.0347 = 282,4 \text{ s} = 4' \text{ et } 42''$$

une particule de 2μ , c'est-à-dire 10 fois plus petite mettra un temps cent fois plus long c'est-à-dire près de 8 heures.

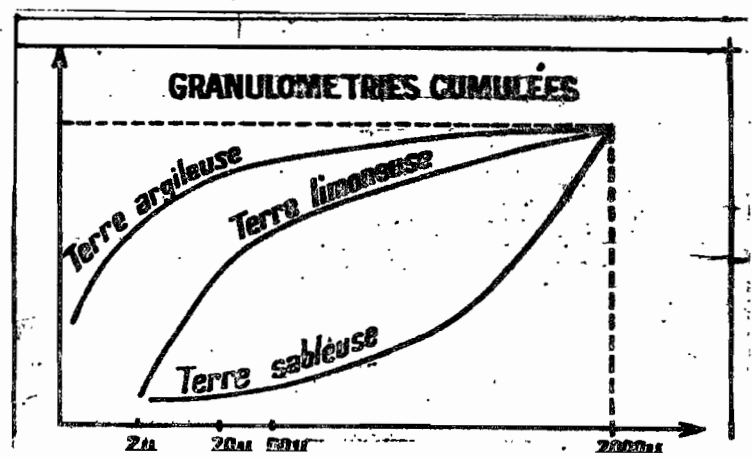
En prélevant à 10cm au bout de $4'42''$ toutes les particules supérieures à 20μ seront éliminées et au bout de 8 heures toutes les particules supérieures 2μ . Le premier prélèvement nous donnera donc $(A + L_f) \%$ le second $A \%$ tout seul d'où $L_f \%$ par différence.

Les classes granulométriques plus grossières sont séparées par tamisage et pesées.

Pour effectuer cette analyse granulométrique il est nécessaire de décoller les particules les unes des autres (on dit les disperser) ce qui s'obtient d'abord en éliminant à chaud la matière organique par un traitement à l'eau oxygénée H_2O_2 puis en agitant la terre longuement en présence d'un dispersant énergétique tel que l'hexamétaphosphate de soude.



2/. Méthode densimétrique : La densité du mélange sol-eau varie au cours de la sédimentation précédente et on la mesure avec un densimètre qui s'enfonce plus ou moins selon la composition granulométrique. Cette méthode a l'avantage de donner les divisions granulométriques que l'on désire. Les pourcentages sont des pourcentages cumulés c'est-à-dire qui représentent tous les éléments inférieurs à un diamètre donné.



2/ MINERALOGIE

Les minéraux du sol sont soit cristallisés (structures moléculaires ordonnées) soit amorphes (structures désordonnées). Les premiers sont les plus abondants mais les seconds peuvent influencer profondément les propriétés du sol.

1/. Les minéraux primaires : Ce sont ceux de la roche qui a donné naissance au sol :

- le quartz SiO_2 constituant avec les feldspaths une grande partie des sables et graviers mais qui se rencontre, finement divisé jusque dans la fraction argile.

- les feldspaths, alumino-silicates soit potassiques (orthose, microcline) soit calco-sodiques (plagioclases) dont le plus sodique est l'albite et le plus calcique l'anorthite.

- les alumino-silicates du métamorphisme comme le disthène abondant à Yaoundé.

- les minéraux ferro-magnésiens comme le mica noir, les pyroxènes, les amphiboles, l'olivine.

- les oxydes et hydroxydes de fer (magnétite, hématite, goethite) ou de manganèse.

- enfin certains minéraux phylliteux appelés argiles sont hérités de roches sédimentaires argileuses.

2/. Les minéraux de néoformation :

Il se forme dans le sol, à partir des solutions qui y circulent, des minéraux carbonatés, ferro-manganiques etc. Mais les minéraux de néoformation les plus importants sont les minéraux phylliteux appelés argiles, ce qui nous fait rencontrer une deuxième signification du mot argile. En fait il en a quatre :

- 1 granulométrique : particule inférieure à 2μ
- 2 minéralogique : cristaux microscopiques dont les atomes sont disposés suivant des plans (feuillets)
- 2 agronomique : sol contenant plus de 50 % d'argile granulométrique
- 4 géologique : roche sédimentaire contenant plus de 50 % d'argile minéralogique.

Les argiles minéralogiques sont formées de couches de tétraèdres et de couches d'octaèdres, la couche tétraédrique étant formée d'ions silicium réunis entre eux et par l'intermédiaire d'atomes d'oxygène formant ensemble un réseau hexagonal, la couche octaédrique d'ions aluminium réunis par des ions O^{--} et OH^- .

Dans certaines argiles il y a des substitutions d'atomes, Si^{4+} peut être remplacé par Al^{3+} dans les couches tétraédriques, Al^{3+} par Mg^{2+} dans les couches octaédriques ce qui leur confère un caractère électro-négatif et par conséquent la possibilité de fixer des cations électro-positifs comme le Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ (capacité d'échange de cations).

- la kaolinite dont le feuillet élémentaire est épais de 7 \AA comprend une couche tétraédrique sur une couche octaédrique (ce qui lui confère un rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 de 2) ne présente pas de substitutions de cations donc pas de charge "moins" libres sauf à l'extrémité des feuillets. Sa capacité d'échange est donc très faible (moins de 12 mé/100 g d'argile donc 6 mé pour une terre contenant 50 % d'argile). Un équivalent est égal au poids moléculaire divisé par la valence. Par exemple 39 g pour K^+ , $40/2 = 20$ g pour Ca^{++} . 1 mé de $Ca^{++}/100$ g de terre signifie que 100 g de terre séchée à 105° contiennent 20 mg de calcium (mé symbole de milli-équivalent).

- la montmorillonite est formée de deux couches tétraédriques enserrant une couche octaédrique ce qui lui donne une épaisseur de 14 \AA et un rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 de 4 avec des charges négatives sur toutes les faces internes et externes des feuillets ce qui lui confère une capacité d'échange élevée de 120 mé/100 g d'argile et une nature gonflante à l'eau (variation d'épaisseur du feuillet de 10 à 19 \AA).

- l'illite a une structure analogue mais avec des ions K^+ piégés entre les feuillets ce qui limite leur capacité d'échange à 40 mé/100 g. L'épaisseur du feuillet est fixée à 10 \AA tandis que les vermiculites s'ouvrent jusqu'à 14 \AA .

- les attapulgites et sépiolites ont des structures non plus exactement en feuillets mais en rubans étroits et allongés.

- les argiles interstratifiées présentent des alternances de feuillets de types différents, gonflantes (illite-montmorillonite) ou peu gonflantes (illite-vermiculite).

Propriétés des argiles : Les argiles présentent des propriétés très importantes : elles peuvent attirer les cations que transportent les solutions des sols à condition de laisser échapper une quantité électriquement équivalente de cations déjà fixés. C'est leur capacité d'échange des cations. Elles partagent cette propriété avec les matières organiques auxquelles elles se lient fréquemment et intimement. Elles réunissent par ailleurs les particules du squelette entre elles pour former des agrégats. Enfin elles gonflent à l'humectation et se rétractent à la dessiccation ce qui provoque une fragmentation de la masse terreuse.

Etat électrique et comportement : Bien que finement cristallines les argiles présentent comme l'humus des propriétés colloïdales : leurs molécules portent des charges électriques qui conditionnent leur état en solution et dans le sol : dans l'état dispersé les molécules portent une charge de même signe et se repoussent mutuellement - dans l'état floculé leurs charges sont neutralisées ce qui fait que les molécules s'agglomèrent les unes aux autres pour former un ciment qui soude entre elles les particules plus grosses (limons et sables) en agrégats.

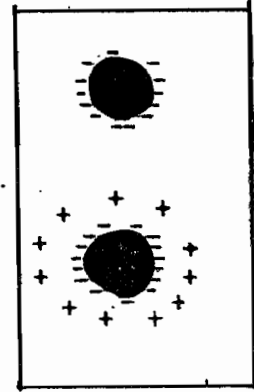
- les sesquioxides de fer et d'aluminium sont chargés positivement et se comportent en bases faibles : ils se dispersent en milieu acide et flocculent en milieu alcalin.

- les argiles minéralogiques et les acides humiques sont chargés négativement et ont des propriétés d'acides faibles : dispersés en milieu alcalin ils sont floculés en milieu acide.

- en réalité pour certain pH appelé point isoélectrique la charge change de signe et la tendance à la floculation est maximum (pH 4 pour la kaolinite).

- Cette charge électrique est plaquée autour de la molécule.

Les ions adsorbés forment une couche de charges de signe opposé attirées par les charges de la molécule. Cette seconde couche est lâche, de plus en plus diffuse en s'éloignant de la molécule. Les ions qui les portent sont susceptibles d'être remplacés par d'autres, on dit qu'ils sont échangeables.



Méthodes d'étude des argiles : L'identification des argiles peut se faire par l'analyse chimique, l'analyse thermique différentielle, l'analyse thermo-pondérale, les spectres de rayons X et le microscope électronique. Il est nécessaire de faire appel simultanément à plusieurs de ces méthodes car le sol est un mélange d'argiles différentes qui ne sont pas toutes révélées par chaque méthode.

Autres minéraux de néoformation :

Les oxydes et hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse tiennent une place importante dans les sols tropicaux où ils atteignent parfois des teneurs exploitables. Ils apparaissent à l'état cristallisé (minéraux) ou amorphe (gels) soit sous forme "figurée" ou "individualisée" dans des nodules, concrétions, cuirasses soit sous forme liée aux argiles auxquelles ils confèrent leur couleur rouge ou jaune (fer). La gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ est l'hydroxyde d'alumine (incolore) le plus répandu dans les sols tandis que la boémite AlOOH apparaît souvent dans les bauxites. L'hématite Fe_2O_3 est un sesquioxyde anhydre de fer auquel on attribue parfois la couleur rouge des sols. Cette coloration rouge pourrait provenir aussi d'un enrobage de gels amorphes d'hydroxydes hydratés autour des argiles. La goethite, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ est un hydroxyde de fer de teinte jaune très répandu dans les sols.

Les carbonates. Le carbonate de calcium appelé souvent "calcaire" figure sous forme de calcite, CaCO_3 , dans des nodules, amas ou encroûtements des sols formés sous climats à saisons contrastés. Il peut précipiter aussi au coeur des termitières même en région équatoriale.

I.2. LES CONSTITUANTS ORGANIQUES

Comme les constituants minéraux les constituants organiques sont de deux sortes : 1 des débris végétaux (morceaux de feuilles, brindilles, troncs, racines) ou animaux (cadavres d'insectes) qui ne sont pas encore transformés (matière organique fraîche) ou qui ne s'altèrent pas dans le milieu considéré (ex.: lignine dans les tourbes) et des produits nouveaux synthétisés à partir des produits de dégradation des précédents. On appelle matières humiques ou colloïdes organiques ou plus simplement humus ces produits de néoformation. Tous ces constituants organiques sont formés de carbone C, d'azote N, d'oxygène O, d'hydrogène H, de soufre S et d'une petite quantité de cations (Ca, Fe, Al).

On distingue dans ces matières humiques deux fractions, les acides fulviques et les acides humiques.

Les acides fulviques (F) ont des petites molécules solubles, très peu polymérisées qui entraînent le fer et l'argile (lessivage) et qui attaquent les feuillets argileux (dégradation). Ils sont formés en milieu acide, pauvre en cations.

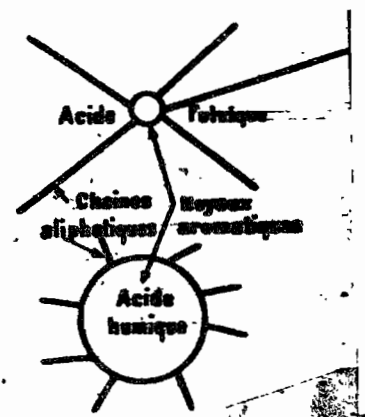
- Les acides humiques (H) sont de deux sortes : les acides humiques libres ou bruns qui sont encore mobiles et peu liés aux argiles, pauvres en azote, et qui ne donnent pas une structure stable.

Les acides humiques gris qui ont des grosses molécules polymérisées formant un complexe très stable avec l'argile par l'intermédiaire de Ca^{++} ou Fe^{++} ou Al^{++} .

Le rapport entre les fractions mobiles F et les fractions stables H est une caractéristique importante des sols.

Tous ces composés ont une structure du type suivant : un noyau sphérique aromatique et des chaînes aliphatiques périphériques. Dans les acides fulviques le noyau est peu important en regard des chaînes et c'est l'inverse dans les acides humiques.

Le rapport carbone/Azote (C/N) qui renseigne sur la richesse en azote de l'humus est une caractéristique importante de l'humus. Son optimum agromomique est de 10-12.



Propriétés de l'humus

- Les colloïdes humiques sont électro-négatifs comme les argiles mais hydrophiles c'est-à-dire qu'ils s'entourent de molécules d'eau qui rendent leur floculation difficile par les cations. Seuls les cations bivalents Ca^{++} et Mg^{++} les floculent (difficilement) les cations monovalents K^+ , Na^+ étant sans effet. Par contre les alternances successives d'humectation et de dessiccation leur confèrent une structure en grumeaux stables.

- L'humus* possède une capacité d'échange des cations qui peut atteindre cinq fois celle de l'argile. Ils retiennent également beaucoup d'eau et ils augmentent de volume et s'hydratant.

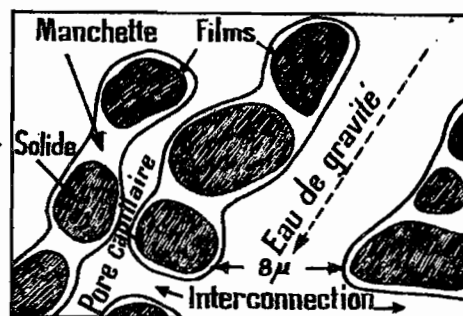
- L'humus, spécialement les acides humiques gris se lient intimement à l'argile : l'union de l'argile et de l'humus, tous deux colloïdes électro-négatifs, forme le complexe argilo-humique ou complexe absorbant du sol qui fixe des ions positifs (cations). Cette association des matières organique et minérale du sol a une très grande importance pour les propriétés de celui-ci.

* Le taux de matière organique (MO %) s'obtient en multipliant, conventionnellement le taux pourcent de carbone C par 1,724.

I.3. LES CONSTITUANTS AQUEUX

Les états de l'eau

Le sol contient de l'eau qui contient elle-même des ions ou molécules en solution. On parle donc plus souvent des solutions du sol. L'eau du sol s'y trouve en différents états :



eau hygroscopique qui forme une pellicule si mince et si énergiquement retenue autour des particules qu'elle n'est susceptible d'aucun mouvement et d'aucune absorption par les racines des plantes.

eau capillaire non absorbable qui remplit les pores capillaires les plus fins, inférieurs à $0,2\mu$. Elle circule, mais difficilement et ne peut être absorbée par les plantes.

Lorsque la teneur en eau du sol devient inférieure à la somme eau hygroscopique + eau capillaire non absorbable tous les végétaux se flétrissent on dit que le sol est en dessous du point de flétrissement permanent. Il est de 8 à 15 % d'humidité pondérale, exceptionnellement 50 % (tourbes).

eau capillaire absorbable remplit les pores compris entre $0,2$ et 8μ . Elle est absorbable par les racines et constitue même la principale source d'alimentation des plantes en saison sèche car c'est celle qui reste lorsque le sol est ressuyé c'est-à-dire que toute l'eau qui peut circuler a été entraînée per descensum.

La somme des trois formes précédentes d'humidité constitue ce qu'on appelle la capacité de rétention (ou humidité équivalente lorsqu'on la mesure par une méthode indirecte).

eau de gravité à écoulement lent : c'est l'eau qui remplit après les pluies les pores plus grossiers du sol mais dont l'écoulement demande plusieurs jours après les pluies.

Le taux d'humidité du sol après 48 heures de ressuyage seulement est appelé capacité aux champs, c'est la somme des quatre fractions précédentes.

eau de gravité à écoulement rapide qui utilise les pores les plus grossiers. Lorsqu'elle ne peut s'écouler (sous-sol imperméable) le sol est à l'état de saturation qui est très néfaste à la flore et à la faune s'il se maintient longtemps.

C'est la mesure au laboratoire du potentiel capillaire* qui permet de situer la teneur en eau d'un sol par rapport à ces différentes formes. On l'exprime par la notation pF : le point de flétrissement est au pF 4,2, celui de la capacité de rétention est voisin de 3 pour un sol argileux.

eau hygroscopique	} point de flétrissement permanent	} capacité de rétention humidité équivalente	} capacité aux champs (48 h.)	} sol à l'état de saturation
eau capillaire non absorbable				
eau capillaire absorbable.....				
eau de gravité à écoulement lent				
eau de gravité à écoulement rapide.....				

2/ Les ions en solution : Ils proviennent des processus d'altération des minéraux primaires, des dégradations des argiles néoformées mais surtout de la décomposition (on dit minéralisation) des composés organiques (humus et débris de végétaux). Ce sont des anions (CO_2H^- par exemple) ou des cations (H^+ , Ca^{++} , Mg^{++} etc.). Ils peuvent être absorbés directement par les racines pour la nutrition des plantes ou adsorbés par les molécules du complexe argilo-humique (cations essentiellement). La couche d'eau qui entoure ces molécules jointe à celle des ions hydratés adsorbés constitue la solution interne par opposition à la solution externe qui reste libre. Les concentrations de ces deux solutions ^{sont} différentes mais l'équilibre entre elles est maintenu par les phénomènes d'échange qui sont lents.

Les alternances saisonnières de teneur en eau font varier la solution externe dans le sens de la dilution (pluies) ou de la concentration (saison sèche) ce qui entraîne des modifications dans la solution interne.

* On dit maintenant aussi : potentiel matriciel.

I.4. LES CONSTITUANTS GAZEUX

Il existe des petites bulles de gaz emprisonnées dans les pores capillaires et des gaz qui circulent dans les pores non capillaires sous l'action des variations de pression atmosphérique et des phénomènes internes de gonflement, de retrait, déplacement de l'eau de gravité. Ces gaz proviennent de l'air atmosphérique mais leur composition est modifiée par la respiration des plantes et des animaux, les fermentations, la minéralisation de l'humus, le dégazage des eaux de nappe etc. En particulier ils sont plus riches en gaz carbonique CO_2 (1 %) que l'air atmosphérique : 1 m² de sol émet environ 5 g de CO_2 par jour en région tempérée.

L'oxygène joue un rôle essentiel pour la respiration des plantes et des animaux qui peuvent mourir d'asphyxie si une mauvaise structure ou un engorgement empêche les gaz de se renouveler. Certaines espèces peuvent toutefois respirer quelques temps aux dépens de l'oxygène dissous dans l'eau (les roseaux, les vers de terre) de rares autres comme le saule des régions tempérées peuvent résister très longtemps à l'asphyxie : on pense que l'oxygène de l'air est capté par les feuilles et transporté jusqu'aux racines !

La porosité totale d'un sol est le pourcentage du volume de sol sec qui n'est pas occupé par la matière solide (c'est donc un taux volumique).

Elle est occupée par de l'eau et des gaz en proportions variables selon les saisons. La porosité non capillaire ou macro-porosité est celle qui correspond au volume des pores les plus grossiers (> 8 μ) occupés par l'air après ressuyage des pluies (c'est la capacité en air) la porosité capillaire ou micro-porosité correspond au volume des pores capillaires qui retiennent l'eau après ressuyage (< 8 μ).

porosité totale = micro-porosité + macro-porosité

Elle se mesure ou se calcule : $P = \frac{D - d}{D} \times 100$ où D est la densité réelle et d la densité apparente du sol.

Exemples: un sol jaune d'Ebolowa de densité réelle 2,71 de densité apparente 1,30 a une porosité de $\frac{1,41}{2,71} \times 100 = 52 \%$

un sol hardé de Maroua de D = 2,69 d = 1,71 a une porosité totale de $100 \times \frac{2,69 - 1,71}{2,69} = \frac{0,98}{2,69} \times 100 = 36 \%$.

I.5. LES CONSTITUANTS VIVANTS

Le sol contient des racines et des animaux.

Les racines :

Les racines servent à l'ancrage des végétaux et à leur nutrition en eau et en éléments minéraux. Par exemple le système racinaire du caféier comprend :

- un pivot robuste mais court (30 à 50 cm, 1 m dans les terres profondes) qui sert à la fixation de l'arbuste.

- des racines axiales prenant naissance sur le pivot, s'enfonçant verticalement et servant à l'alimentation hydrique.

- des ramifications latérales : presque horizontales qui se prolongent par un réseau de radicelles et qui explorent les couches superficielles pour assurer la nutrition minérale.

au total 90 % des racines sont situées entre 0 et 30 cm.

- le pivot du cacaoyer peut atteindre 2 m il est dépourvu de racines latérales dans sa partie inférieure. Les racines latérales superficielles remontent vers la surface où elles se ramifient. Elles prospectent jusqu'à 5 ou 6 m autour du cacaoyer.

Le bananier possède un bulbe qui émet latéralement des rejets en comprimant la terre avoisinante. Les racines qu'ils émettent ont une puissance de pénétration faible. Le bananier se développe mal dans les terres trop caillouteuses ou trop compactes.

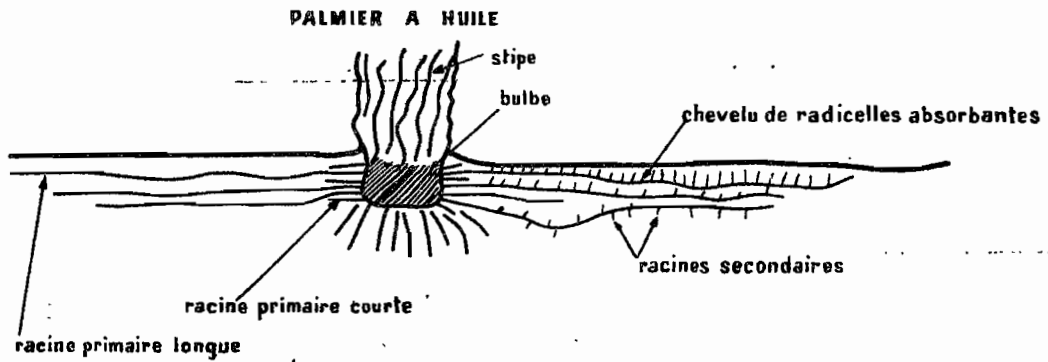
- En forêt équatoriale les racines d'ancrage forment un lacis horizontal peu profond. On y rencontre encore des radicelles à plus de 5 mètres de profondeur mais c'est surtout dans la couche superficielle qu'elles sont abondantes.

- Sur roche fissurée, les racines pénètrent profondément et peuvent prélever directement des ions aux minéraux altérés sans passer par l'intermédiaire des solutions du sol.

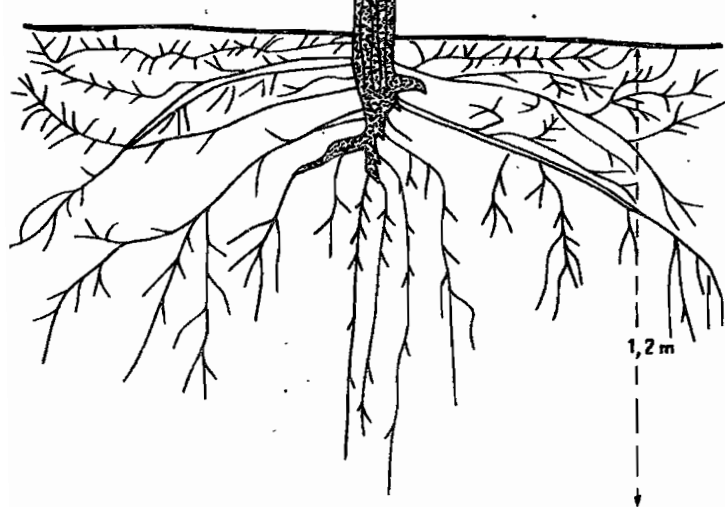
Les animaux : La faune du sol est en grande partie localisée aux premiers centimètres du sol et plus spécialement dans la litière. Les vers, termites et animaux fouisseurs pénètrent cependant très profondément. Par contre la microflore est mieux répartie. Certains animaux passent toute leur vie dans le sol (vers, acariens,

QUELQUES TYPES D'ENRACINEMENT

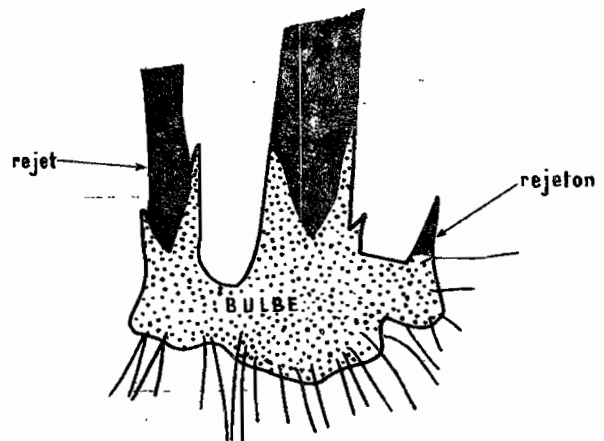
Figure 1



**SYSTEME D'UN CAFEIER
RACINAIRE DE 5 ANS**



BANANIER

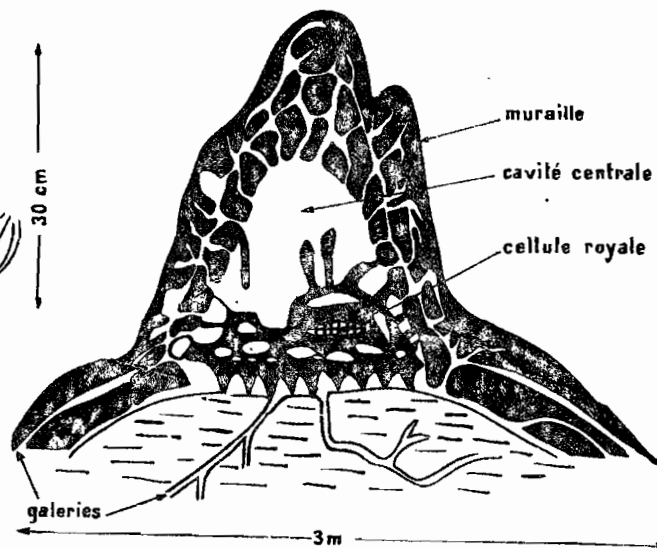


QUELQUES CONSTRUCTIONS FAUNIQUES

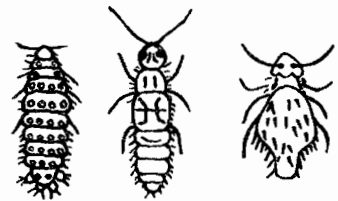
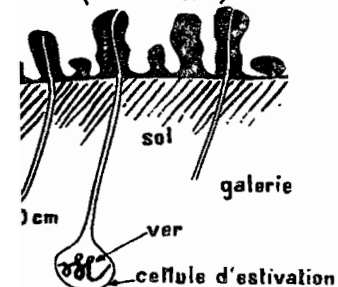
**termitière champignon
(cubitermes)**



**grande termitière épigée
(bellicositermes)**



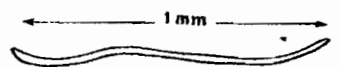
**rejets de vers
(sol dentelle)**



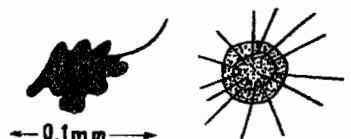
collembolés



acaridien



**nématode
(ver cylindrique filiforme)**



protozoaire

collembolles) d'autres qu'une partie (larves). Les espèces vivant dans le sol minéral présentent une adaptation morphologique et physiologique : pattes fouisseuses, perte des yeux et de l'appareil saltatoire, organes sensoriels particuliers. On distingue : la microfaune ($< 0,2$ mm) est constituée d'espèces souterraines qui vivent dans l'eau des capillaires du sol. En cas de sécheresse ces animaux ralentissent leur activité, se déshydratent ou s'enkystent. Ce sont essentiellement des protozoaires et de nématodes.

la mésopfaune $0,2 < - < 4$ mm est constituée d'espèces qui supportent la sécheresse ou ont besoin seulement d'un air humide. Ce sont essentiellement les collembolles et les acariens.

la macrofaune $4 < - < 80$ mm comprend les vers, les insectes supérieurs (termites, fourmis) des myriapodes, des arachnides etc.

la mégafaune 80 mm $< - < 1,60$ m renferme les animaux de grande taille qui remontent la terre pour chercher leur nourriture (oryctéropes) ou pour creuser leurs terriers.

DEUXIEME PARTIE

ORGANISATION DES CONSTITUANTS DU SOL

Page

II.1.	LES CARACTERES ETUDIES	
	Humidité, Couleur, Texture, Minéralogie, Structure	
	Porosité, Consistance, Enracinement, Activité.....	
II.2.	LE PROFIL ET SA DESCRIPTION.....	
	Réalité et notion d'horizon et de profil.....	
	Etude du sol par les profils.....	
	Distinction et nomenclature des horizons.....	
II.3.	LES DIFFERENTS HUMUS.....	
	Humus formés en milieux aérobies : mull, moder, mor...	
	Humus formés en milieux anaérobies: tourbe et anmoor...	
II.4.	LE COMPLEXE ABSORBANT ARGILO-HUMIQUE.....	
	Le complexe argilo-humique, ses caractéristiques et	
	ses lois	
	Localisation et importance des différents ions.....	
II.5.	LES SOLUTIONS ET LES GAZ DU SOL	
II.6.	LES RACINES ET LES ANIMAUX	
II.7.	L'ETUDE MICROMORPHOLOGIQUE	

GENERALITES

L'étude du sol s'effectue actuellement en cinq approches successives :

- Le contact direct par les sens, dont les impressions sont précisées par des mensurations ou des comparaisons. C'est la description ou étude morphologique du sol.

- Son étude micromorphologique au microscope polarisant qui affine les observations précédentes, notamment la minéralogie et l'organisation des constituants.

- L'étude au laboratoire de ses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et biologiques qui sont exprimées sous le nom de résultats analytiques.

- L'observation ou la mesure des transformations saisonnières ou évolutives du sol en place pour connaître sa dynamique actuelle. A ce stade des dispositifs expérimentaux sont souvent nécessaires pour mesurer la réaction du sol à des sollicitations naturelles ou imposées.

- La synthèse des données précédentes et leur confrontation avec les facteurs écologiques en vue d'une compréhension, d'une expression et d'une classification des caractères étudiés.

Les trois premières approches de l'étude du sol ont pour but de déterminer à un moment donné l'organisation spatiale des constituants minéraux, organiques, aqueux, gazeux et vivants du sol en place. Les caractères choisis à cet effet : humidité, couleur, texture, minéralogie, structure, porosité, consistance, enracinement et activité renseignent sur le mélange de ces différentes matières pédologiques. Leur étude fait apparaître une organisation du sol en couches successives ou horizons dont l'ensemble est appelé un profil, dont la description a été codifiée. Les horizons supérieurs contiennent de la matière organique qui selon la nature de l'humus leur donne des aspects très variés. L'association de l'humus et de l'argile permet au sol de retenir des éléments minéraux et de les mettre à la disposition des plantes

et des animaux par l'intermédiaire de ses solutions aqueuses. La répartition de ces dernières commande celle des gaz. Enfin la consolidation d'échantillons de sol par des résines durcissantes, permet depuis quelques années d'observer le sol en lame mince au microscope polarisant. Cette étude micromorphologique prolonge vers l'infiniment petit les renseignements donnés par l'étude macroscopique.

II.1. LES CARACTERES DU SOL

Le contact direct par les sens de la vue, du toucher et de l'odorat constitue l'approche première et déterminante de l'étude du sol. Un premier niveau de regroupement ou de synthèse y est en effet déjà nécessaire pour découper le volume-sol en unités cernables et les caractériser. Il oriente donc le choix des échantillons et des caractères à soumettre aux stades ultérieurs de l'étude.

L'humidité modifie les autres caractères du sol, notamment la couleur, la structure, la porosité et la consistance. Ceux-ci devront donc être déterminés aux différents états d'hydratation par lesquels passe le sol et principalement à ses maxima de dessiccation et d'humectation.

Le degré d'hydratation du sol est estimé d'ailleurs par ces transformations qu'il provoque : avec l'augmentation de l'humidité la couleur devient plus sombre (constituants organiques) parfois plus vive (hydroxydes), le toucher plus frais, la consistance plus molle (argile), la cohésion diminue ou augmente (sable fin) la porosité se transforme, puis l'échantillon exprime de l'eau par pression ou même spontanément. On parle successivement d'états sec, frais, humide, trempe.

La couleur est déterminée par comparaison avec des échantillons de couleur disposés dans un code, le plus utilisé étant le code Munsell, américain (Munsell color soil charts).

Dans ce code les différentes teintes observées dans les sols sont figurées par des petits rectangles qui sont répartis par planches, correspondant chacune à une même couleur de base (hue), les teintes étant de plus en plus vives lorsque l'abscisse (chroma) croît et de plus en plus délavées lorsque l'ordonnée (value ou valeur) augmente. Par exemple 7,5 YR 6/4 désigne une teinte dont la hue est 7,5 YR (mélange de jaune Yellow et de rouge Red), la valeur 6 et le chroma 4 : 7,5 YR 6/8 est plus teintée, 6/2 moins vive, 8/4 plus blanche, 4/4 plus sombre.

La couleur des sols tropicaux est souvent sombre à la partie supérieure, claire ou polychrome en profondeur dans la roche altérée, vive dans la partie moyenne. En allant du plus rouge au plus jaune les différentes "hues" sont : 5 R, 7,5 R, 10 R, 2.5 YR, 5 YR, 7.5 YR, 10 YR, 2.5 Y 5 Y. Les teintes à base de rouge et (ou) de jaune sont en effet les plus répandues, mais il existe aussi des teintes à base de bleu (B) et de vert (G), par exemple 5 BG 5/1.

La couleur doit être notée à l'état sec et à l'état humide, une grande différence entre les deux étant caractéristique de certains types de sols. Broyée finement la terre rouge peut devenir plus jaune, ce caractère important doit être également noté (couleur de poudre).

La texture de la terre fine est appréciée en malaxant une prise de terre à l'état humide, les différentes classes granulométriques réagissant différemment à ce test, mais une certaine expérience est nécessaire. La taille et le pourcentage des constituants grossiers est estimée ou mesurée, à l'oeil nu ou à l'aide d'une loupe. Dans les sols rouges l'argile est souvent agglomérée en très petites boulettes consolidées, de la taille des sables, que l'on appelle des pseudo-sables et qui peuvent même résister au dispersant de l'analyse granulométrique. Ces pseudo-sables peuvent aussi être considérés comme de très petits "agrégats" c'est-à-dire des constituants de la "structure".

La minéralogie

Dans le sol les minéraux hérités ont rarement gardé la forme extérieure et l'éclat qu'ils présentaient dans la roche-mère mais on peut encore souvent les identifier en les cassant ou par leur mode d'altération. La loupe est nécessaire pour les plus petits. Les minéraux néoformés sont reconnus également à leur aspect extérieur et à celle de leur cassure ou à l'aide de quelques tests: les carbonates par exemple font effervescence à l'acide chlorhydrique. L'examen macroscopique permet difficilement d'identifier les minéraux argileux hérités ou néoformés autrement que par certains de leurs effets: par exemple le gonflement ou le retrait pour les argiles montmorillonitiques.

La présence de constituants amorphes à côté des minéraux cristallisés peut être soupçonnée depuis peu par les caractères structuraux qu'ils déterminent.

La structure

C'est une des plus importantes caractéristiques du sol en place. La structure est la manière dont les particules élémentaires du sol sont associées entre elles pour former ou non des agrégats. Les agrégats sont des assemblages naturels cohérents, tridimensionnels des particules élémentaires du sol. Il ne faut pas les confondre avec les mottes qui sont artefacts dûs à l'outil du cultivateur.

On dit que la structure est particulaire s'il y a une absence totale de cohésion entre les particules élémentaires (celles que révèle l'analyse granulométrique). Elle est massive au contraire si ces particules forment un assemblage continu, cohérent, sans plans de dissociation naturels. Enfin la structure est fragmentaire si les particules élémentaires sont organisées en agrégats: volumes cohérents, de forme et de taille variées, séparés par des plans de dissociation naturels.

On distingue différents types de structure fragmentaire selon que les faces des agrégats sont planes ou courbes, leurs arêtes anguleuses ou émoussées et leur orientation verticale, horizontale, ou quelconque.

Si les faces sont planes et orthogonales et les arêtes anguleuses la structure est prismatique si les plus grandes faces sont verticales, lamellaire si elles sont horizontales, en plaquettes obliques si elles sont obliques (et en outre gauchies, lissées et striées), cubique si les faces sont également horizontales et verticales. Enfin une structure colonnaire est une structure prismatique dont le sommet est arrondi, une structure squameuse est une structure lamellaire à bords relevés. Si les faces sont planes et nombreuses, à angles variés et sans orientation privilégiée la structure est dite : polyédrique si les arêtes sont anguleuses, polyédrique sub-anguleuse si elles sont émoussées.

Si les faces sont courbes donc sans arêtes ni orientations privilégiées la structure est grenue. S'il y a à la fois des faces courbes et des faces planes mamelonnées elle est qualifiée de grumeleuse.

Les structures anguleuses sont plutôt dues aux phénomènes de retrait et gonflement du sol, ce sont des structures de fragmentations naturelles, les structures arrondies au travail de la faune.

Certaines appellations anciennes sont abandonnées soit qu'elles associent à la fois une indication de taille et de forme des agrégats : nuciforme (de noix) est devenue polyédrique sub-anguleuse, feuilletée est devenue lamellaire; poudreuse, farineuse ou cendreuse sont des structures particulières, soit qu'elles intègrent des indications de porosité : vésiculaire, spongieuse. Les appellations de meuble et fondue (ou continue) ont été remplacées respectivement par particulière et massive.

La forme des agrégats (ou unités structurales) étant définie il importe d'indiquer leur taille moyenne ou leurs dimensions extrêmes (en mm, cm ou selon le code qui figure dans les glossaires) puis la netteté de leur forme, la régularité de leur taille, la facilité avec laquelle on les sépare les unes des autres, le pourcentage de terre agrégée : Toutes ces données sont condensées dans une appréciation synthétique globale qui est la netteté ou le degré de développement de la structure : une structure est faiblement, moyennement ou fortement développée (on dit maintenant

peu nette, nette ou très nette). Enfin la structure fragmentaire peut être plus ou moins stable au choc et à l'humectation : on apprécie donc la cohésion des agrégats en les soumettant à des compressions ou extensions entre les doigts et leur comportement à l'humectation. L'indice d'instabilité structurale I_s est une mesure de laboratoire sur de la terre tamisée à 2 mm. Il caractérise donc les très petits agrégats ou l'assemblage élémentaire des plus gros. I_s varie de 1 (bonne stabilité) à 3 (mauvaise stabilité structurale).

Notons enfin que deux types de structure peuvent être associés dans le même volume. On l'exprime par le terme : juxtaposé à. Si l'une est moins développée on la décrit comme sur-structure ou sous-structure selon qu'elle englobe ou est contenue dans l'autre. Exemples : Structure fragmentaire nette généralisée polyédrique moyenne (10 à 20 mm) à sur-structure prismatique grossière. Structure fragmentaire peu nette localisée grumeleuse fine (1 à 2 mm) juxtaposée à une structure polyédrique. On omet, le plus souvent, l'adjectif fragmentaire et il est impropre mais courant de dire qu'un horizon est "structuré" lorsqu'il présente une structure fragmentaire.

L'organisation de la matière solide du sol en unités structurales doit être logiquement complétée par l'étude de l'organisation des "vides" au sein des agrégats ou entre ceux-ci. C'est la porosité du sol qui est en réalité occupée par des gaz ou des solutions aqueuses. Les propriétés mécaniques de l'assemblage ainsi formé de terre, de gaz et d'eau sont exprimées par la notion de consistance. Structure, cohésion, porosité et consistance, qui forment la structure au sens large, varient avec l'humectation du sol et doivent donc être étudiées aux différentes saisons.

La porosité

La porosité est à la fois le pourcentage du volume unitaire occupé par les "vides" du sol (voir plus haut) et la description de la forme, de la taille et de la disposition de ceux-ci. Ces vides sont occupés en réalité par de l'air ou de l'eau. Les plus petits ne sont visibles qu'au microscope sur des "lames minces" de sol (celui-ci doit être durci par une résine plastique avant d'être

scié et usé jusqu'à une épaisseur de quelques microns) les autres sont étudiés à l'oeil nu ou à la loupe.

Les pores peuvent être tubulaires (porosité "ouverte" cylindrique) ou intergranulaires (espaces entre les grains du squelette) ou vésiculaires (porosité "fermée" sphérique) ou vacuolaires (formes irrégulières). Enfin les espaces entre les agrégats, les fentes de retrait, les cavités biologiques sont des formes plus grossières de porosité.

Les pores tubulaires peuvent s'organiser en un réseau d'affluents hiérarchisés assurant l'écoulement de l'eau de gravité. Dans les plus fins appelés des capillaires l'eau est au contraire fortement retenue par des forces de rétention (tension superficielle). On indique le diamètre moyen des pores, leur abondance (nb/dm²) et leur orientation (verticale, horizontale, etc.).

La porosité interagrégats et les fentes de retrait qui apparaissent en saison sèche dans les sols argileux sont une forme saisonnière de porosité qui disparaît lorsque la pluie réhumecte le sol et le fait gonfler (la limite de retrait est la teneur en eau qu'il faut dépasser pour que le sol commence à gonfler). On doit noter la largeur, la hauteur et l'écartement des fentes (réseau polygonal dans les karals du Nord-Cameroun). Pour les espaces interagrégats il importe de noter si les pores tubulaires intérieurs aux agrégats débouchent ou non à la surface de ceux-ci (lissage et striage des faces de glissement). La surface des agrégats ou des cavités biologiques a un aspect parfois différent de la matière interne : stries, effacement des pores, couleur plus claire ou plus sombre, aspect lissé ou strié, brillant ou au contraire cireux, pellicule plus sableuse ou plus argileuse etc. Ces différenciations sont dues soit aux phénomènes de tension et glissement résultant du gonflement et du retrait (cutanes de contrainte) soit à un entraînement ou un dépôt sélectif de matière (revêtements).

La consistance est l'expression synthétique de l'ensemble des propriétés mécaniques du sol : Elles englobe la plasticité qui est l'aptitude de la matière à subir et conserver une déformation, l'adhésivité qui exprime son adhérence aux instruments de culture,

sa fragilité qui exprime sa résistance à l'écrasement entre les doigts. Tous ces comportements qui sont fonction du degré d'humidité, sont d'une grande importance pour le choix des pratiques culturales et du moment optimum de travail du sol.

Enracinement

L'abondance, la forme, la nature et la disposition des racines, bulbes et radicules par rapport aux taches colorées, aux cailloux et aux agrégats sont étudiées dans les différentes couches ou horizons du sol et au passage de l'une à l'autre. Outre son intérêt agronomique le tracé des racines renseigne en effet sur la texture, la structure et les discontinuités du sol. Il est plus finement ramifié dans les secteurs qui servent à l'alimentation des plantes en eau et en éléments minéraux. Il peut donc renseigner sur la localisation de ces éléments (horizon humifère, revêtements de certains agrégats, diffusion des engrais). On dit que l'enracinement est adapté à la structure lorsqu'il utilise les espaces entre les agrégats. La porosité tubulaire du sol est en partie construite ou utilisée pour la pénétration des racines et l'activité biologique.

Activité

Comme l'enracinement l'activité de la faune du sol s'adapte aux caractéristiques du sol tout en les modifiant : elle utilise la porosité existante et creuse des galeries et cavités, évite les cailloux et les agrégats trop durs ; elle diminue dans les parties engorgées ou au contraire stérilisées par les feux et le soleil. Elle renseigne donc sur ces caractéristiques du sol et peut aider à les expliquer. Elle présente comme l'enracinement et presque toutes les caractéristiques du sol d'importantes variations saisonnières.

II.2. LE PROFIL ET SA DESCRIPTION

1 - REALITE ET NOTION D'HORIZON ET DE PROFIL.

Le sol apparaît constitué de couches superposées, relativement régulières, homogènes et parallèles à sa surface et qui se distinguent les unes des autres par des caractères de couleur, texture, minéralogie, structure, porosité, consistance, enracinement, activité de la faune, humidité... etc. On appelle ces **couches** horizons pédologiques lorsque leur différenciation paraît résulter de l'action de facteurs dynamiques d'évolution dont les principaux sont : la transformation physico-chimique et biologique des matières organiques qui se déposent à la surface du sol, les déplacements internes de matière par l'eau d'infiltration, les animaux et la gravité, les alternances de retrait et de gonflement saisonniers, la néosynthèse d'argile, de sesquioxydes, de carbonates, l'altération des minéraux primaires.

On appelle profil pédologique l'ensemble des horizons observés sur une même coupe verticale. Le profil cultural est l'ensemble des couches individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines des végétaux cultivés et des facteurs naturels réagissant à ces actions. Ce profil cultural se sur-impose à la partie supérieure du profil pédologique. L'analyse, au laboratoire, d'échantillons de terre prélevés dans chaque horizon permet de compléter par des caractères analytiques (pH, capacité d'échange des cations, teneurs en cations échangeables et totaux, taux de carbone, azote, phosphore, fer, etc.) les caractères révélés par l'examen morphologique du profil.

2 - ETUDE DU SOL PAR LES PROFILS.

L'étude morphologique effectuée sur le plan vertical d'une coupe doit être complétée par une exploration latérale du volume que constitue chaque horizon : on dégage par exemple la surface de contact entre deux horizons pour déterminer si ses ondulations

Lorsque la roche-mère comporte un banc sub-horizontale différant par sa lithologie l'évolution pédogénétique s'adapte généralement à cette discontinuité qu'elle aménage en horizon pédologique. D'ailleurs même quand ces bancs apparaissent dans l'altération on les appelle souvent encore des horizons (voir ci-dessous la nomenclature en CII CIII).

éventuelles s'organisent en poches ou au contraire en chenaux, on creuse les plages colorées pour préciser si ce sont des surfaces ou des volumes etc. L'examen de plusieurs profils sur le même interfluve est nécessaire pour étudier les variations progressives ou brutales des horizons d'un point à l'autre, notamment du haut en bas des versants réguliers, de l'extérieur vers l'intérieur d'un collecteur secondaire du ruissellement ou sur des plages différant par leur couverture végétale (îlot forestier dans une savane, plage nue dans un tapis herbacé, peuplement pur d'une espèce particulière, zone sans végétation ligneuse, etc.).

On appelle toposéquence de sols une succession de profils échelonnés du haut en bas d'un versant pour étudier les variations latérales des horizons et les déplacements de matière le long de la pente (chaîne de sols).

L'étude morphologique du profil à partir de ses horizons doit être faite à différentes saisons pour suivre les variations saisonnières de ses caractères, la structure sensu lato et la répartition de l'humidité notamment. Il faut se méfier des transformations provoquées par l'ouverture de la fosse ou l'établissement de la coupe d'étude : c'est l'effet de talus qui peut révéler avantageusement certains caractères naturels peu accentués mais qui peut aussi créer des différenciations qui ne pré-existaient pas dans le sol. L'idéal est d'assister au creusement de la fosse et d'y revenir après dessiccation.

L'étude d'un profil en vue de sa description se fait traditionnellement de la manière suivante :

On repère de haut en bas pour chaque caractère considéré dans l'ordre couleur, texture, structure ... etc. tout changement brusque ou toute variation nette de nature ou d'intensité. On juxtapose alors les différents "profils" obtenus de couleur, texture, porosité, etc. par exemple :

Profondeur	Couleur	Texture	Structure	Porosité	Enracinement
0	10 YR 3/2	sablo-arg.	grumeleuse	inter-agrégats	chevelu
15	10 YR 4/3	10 argilo-S.	nette	forte	15 -racines horizon- tales
40	et lan- gues 3/2		massive	13 fentes de retrait	
100 -	10 YR 5/4 5/6	graveleuse	polyédri- que gros- sière peu nette	cavités de termi- tes	nombreuses radicelles pénétrant les agrégats
200 - cm	7,5 YR 5/6 + taches 5 YR 6/7	argilo- limoneuse	particu- laire	intergrana- ulaire	rares ra- dicelles adaptées à la struc- ture
			polyédri- que fine, nette	tubulaire fine	

et l'on décide alors d'un découpage du profil en horizons et sous-horizons que l'on décrit de haut en bas en énumérant tous les caractères qui les différencient ainsi que la netteté et la forme de leurs transitions, ce qui donne dans l'exemple précédent :

0 - 15 cm : Horizon de couleur grise 10 YR 3/2, de texture sablo-argileuse à argilo-sableuse, de structure grumeleuse nette, de porosité inter-agrégats forte, armé par un chevelu radicellaire dense. Limite brutale (moins de 1 cm) horizontale, soulignée par des grosses racines.

Lorsque un caractère d'un horizon est identique à celui de l'horizon sus-jacent on omet parfois de le répéter ou on indique simplement par exemple: Même structure. On peut aussi exprimer une comparaison : Plus frais, plus poreux, moins caillouteux (sous-entendu que l'horizon sus-jacent).

3 - DISTINCTION ET NOMENCLATURE DES HORIZONS :

Le découpage du profil en horizons n'est pas entièrement codifié car l'horizon est à la fois une unité naturelle et un cadre descriptif commode, l'objectif important restant de transmettre au lecteur le plus clairement et le plus minutieusement possible la connaissance du sol acquise par l'observateur. Une certaine logi-

que dans les critères utilisés est toutefois hautement souhaitable. Par exemple : Un horizon est déterminé par toute variation brusque ou importante d'au moins un caractère majeur, couleur, texture ou structure avec en coïncidence un changement dans certains caractères mineurs (porosité, enracinement etc.).

Un sous-horizon est déterminé par une variation nette de caractères mineurs ou par une variation minime d'un caractère majeur.

Une certaine discontinuité dans la variation d'un caractère est souvent attachée à la notion d'horizon. Si la variation est régulière et progressive on la signale dans la description d'un horizon individualisé à l'aide d'autres caractères, par exemple : couleur passant progressivement de 10 YR 5/4 à 5/6.

S'il y a un léger décalage entre les changements de caractère c'est la variation de la couleur qui l'emporte, ou la plus importante. On décrit en effet généralement les caractères des horizons dans l'ordre suivant :

Couleur qui est notée à l'aide du code Munsell sur échantillon sec, puis humide et sur une prise réduite en poudre. Si la teinte n'est pas homogène on note les différentes nuances du bariolage ainsi que les formes, dimensions et dispositions des surfaces ou volumes colorés. S'il s'agit de taches parsemant un fond uniforme on note leur abondance (% en volume) leur coloris, leur forme (volume ou surface ?), leur orientation, la netteté de leurs contours, leur cohésion, leur ressemblance avec les horizons encaissants et d'une manière générale toutes leurs relations avec les autres caractères (les taches rouges sont parfois plus cohérentes et plus sableuses que le reste de l'horizon par exemple).

Texture et minéralogie : On note la proportion et si possible la nature des constituants appartenant à chaque classe granulométrique. On indique également la forme et la répartition des constituants discernables à l'oeil ou à la loupe ainsi que l'aspect de leur surface (caries, cupules, patine, cuticule etc.) et leur résistance à l'écrasement (concrétions "cassables à la main"). Le pourcentage volumique des constituants grossiers denses (concrétions ferrugineuses par exemple) peut différer nettement du refus pondéral donné par l'analyse granulométrique (d'autant

plus que les blocs et cailloux ne sont pas inclus dans le prélèvement).

Structure : on note successivement le type, la taille, la netteté, la cohésion et l'aspect de la surface des agrégats et s'il y a lieu les structure, sur-structure, ou sous-structure associées, enfin une appréciation synthétique sur le degré de développement de cette structure. La vitesse d'humectation et la stabilité des agrégats à l'état trempé sont intéressantes à noter et en relation avec la stabilité structurale.

Porosité : on indique chaque type de porosité, sa taille, son orientation préférentielle et on estime son pourcentage en volume.

Consistance : on teste avec les doigts et à différents états d'humectation la plasticité, l'adhésivité ou la cohésion de la matrice fine de l'horizon. (Ne pas confondre avec la compacité qui est l'inverse de la porosité).

Enracinement : on signale la nature des racines, leur grosseur, leur abondance, et leur disposition par rapport aux agrégats, aux éléments grossiers et aux limites d'horizons.

Activité : on décrit les terriers, édifices, galeries, déjections de la faune du sol et on identifie si possible ses représentants: vers, termites, fourmis, oryctéropes, etc.

Profil cultural et indices d'activité humaine : on repère les artefacts dûs aux instruments de culture ainsi que les morceaux de poterie, charbon de bois, etc. Les outils préhistoriques peuvent fournir des renseignements intéressants sur l'histoire du sol et du paysage.

Transition avec l'horizon sous-jacent : on termine la description de chaque horizon en indiquant la netteté (brutale ou progressive) et la forme (horizontale ou ondulée) de la limite avec l'horizon inférieur en précisant si nécessaire le caractère concerné : limite brutale de couleur, graduelle de texture.

Cas des caractères liés : Les différents caractères énumérés ci-dessus sont fréquemment liés entre eux, par exemple certains volumes colorés sont plus denses, plus argileux, plus cohérents, moins "structurés" etc. que la matrice qui les entoure. On peut indiquer pour chaque caractère ses relations avec les caractères précédemment étudiés. Il est possible aussi de distinguer différentes "phases" dans la matière d'un horizon. Par exemple ici une phase rouge, argilo-sableuse, massive dense et cohérente occupant 30 % du volume, une autre phase jaune...etc.

Etat du profil lors de l'observation : Il est indiqué au début de la description par la date, la saison, l'état d'humidité et l'ancienneté de la coupe.

Nomenclature des horizons :

De plus il est utile à la fin d'une longue description de résumer les caractères originaux de l'horizon, par exemple :

"Horizon homogène de couleur, texture et structure"

"Horizon caillouteux bouillant blanchissant au séchage"

"Horizon rouge à pseudo-sables et cavités termitiques"

"Horizon noir à séquence de structure" (successivement cubique puis prismatique fine puis prismatique grossière par exemple).

Pour condenser les principaux traits morpho-génétiques de chaque horizon les pédologues utilisent enfin un code alpha-numérique. Cette nomenclature des horizons, qui intègre à la fois une observation et une interprétation, prépare la classification du profil. Il importe donc d'en connaître la signification.

Les horizons A sont des horizons occupant la partie supérieure du profil et présentant au moins un des deux caractères suivants:

- présence de matière organique donnant une couleur foncée
- appauvrissement en argile, fer ou alumine

A₀₀ est la litière formée de débris végétaux identifiables,

A₀ désigne une couche de débris végétaux non identifiables

A₁ a une couleur foncée due à un mélange de matières organique et minérale

A_p désigne un horizon de surface modifié par les pratiques culturales (donc perturbé)

A₂ a une couleur claire et est appauvri en argile ou en fer avec concentration corrélative de minéraux résistants du squelette. Certains auteurs l'appellent horizon d'éluviation et le notent E.

Les matières enlevées des horizons A sont entraînées à l'état dissous ou dispersé pour être déposées dans les horizons B ou être exportées hors du profil.

Les horizons B sont des horizons nettement différents des horizons A et C par leur couleur qui est plus homogène (souvent aussi plus vive), leur texture qui est plus argileuse, leur structure qui est mieux exprimée, et par la nature et l'abondance des constituants néoformés. Cette différenciation provient soit d'une néoformation in situ d'argile, carbonate, oxydes ou hydroxydes de fer, alumine, manganèse, soit de l'accumulation de substances venues des horizons supérieurs (humus, argile, fer transporté à l'état réduit, complexé ou très finement cristallisé), ou apportés par une nappe (sels solubles, carbonate, cations). Une lettre minuscule placée après le B précise alors la nature de l'enrichissement ou de la différenciation (t pour l'argile, ca pour les carbonates, fe ou s pour les sesquioxides de fer... etc.).

Le symbole (B) signale un horizon B différencié uniquement par néoformation ou par des caractères structuraux.

Certains sols n'ont pas d'horizon B, c'est le cas des sols peu évolués notamment.

Les horizons C sont formés de roche en voie d'altération et affectée de transformations chimiques. C'est l'horizon d'altération ou horizon de départ.

Il arrive que la roche altérée observée à la base d'un profil ne soit pas celle dont dérivent les horizons A et B supérieurs. On la note alors C II, C III ... etc. Enfin la roche d'apparence saine est notée R.

II.3. LES DIFFERENTS HUMUS

On distingue dans le sol plusieurs sortes d'humus d'après la morphologie de la couche humifère de surface, la nature des composés humiques, les vitesses relatives de minéralisation et d'humification des matières organiques et leur degré de liaison avec la matière minérale.

La couche humifère de surface comprend plusieurs strates ou horizons : A₀₀ est la litière formée de composants végétaux facilement identifiables. A₀ est formé de débris végétaux morcelés et décomposés, non reconnaissables. A₁ est un mélange plus ou moins intime de matière organique sombre et de matière minérale claire ou colorée.

Les humus sont très différents selon qu'ils se forment en milieu aéré (aérobiose) ou mal aéré (anaérobiose) par engorgement d'eau.

1/ Humus formés en milieux aérobies.

En milieu aéré, saturé en cations et à forte activité biologique il se forme un type d'humus appelé mull calcique : pas d'horizon A₀₀ et A₀ du fait d'une décomposition rapide des débris végétaux, horizon A₁ épais, bonne liaison avec la matière minérale et structure stable à cause de la formation d'acides humiques gris fortement polymérisés. pH voisin de 7, rapport C/N de 10 en A₁. On les observe sur roche-mère calcaire en pays tempéré ou sous végétation stéppique en climat subaride.

Le mull forestier est plus acide (pH 5,5), plus désaturé, moins bien humifié : C/N de 10 à 20.

Le moder comporte un horizon A₀ mince sur un horizon A₁ assez épais mal structuré et à mauvaise liaison des matières organique (boulettes d'excréments d'arthropodes) et minérale, avec un rapport C/N de 15 à 25, et des acides humiques bruns peu polymérisés.

Le mor ou humus brut présente un horizon Ao épais subdivisé en trois couches notées L, F, H, (litière, fermentation, humification) avec une limite inférieure tranchée. Cette accumulation vient de ce que la minéralisation de la matière organique fraîche est lente ainsi que l'humification. Les acides fulviques formés sont entraînés en profondeur. Il se forme en milieu acide, biologiquement peu actif, désaturé (10 %) et son rapport C/N est supérieur à 20.

2/ Humus formés en milieux anaérobies

La tourbe se forme en milieu saturé d'eau, donc mal aéré, pauvre en organismes vivants : les matières organiques s'accumulent en couches épaisses imbibées d'eau, à décomposition et humification très lentes. Elle peut être calcique ou acide selon la richesse des eaux en ions Ca^{++} . C'est de la matière organique uniquement, d'où sa légèreté.

L'anmoor se forme dans les sols à engorgement temporaire d'où le développement de deux faunes successives : aquatique en période de saturation par l'eau, aérobie en période d'assèchement. Il en résulte une humification assez poussée et un bon mélange des matières organique et minérale sur une épaisseur de 20 à 30 cm.

II.4. LE COMPLEXE ABSORBANT ARGILO-HUMIQUE

L'humus, spécialement les acides humiques gris, se lie intimement à l'argile : l'union de l'argile et de l'humus, tous deux colloïdes électro-négatifs forme le complexe argilo-humique ou complexe absorbant du sol. Cette association des matières organique et minérale du sol a une très grande importance pour les propriétés de celui-ci : Ces colloïdes électro-négatifs attirent et retiennent en effet autour de leurs molécules un essaim d'ions positifs ou cations qui les accompagnent dans leurs mouvements. Dans les sols acides ces ions absorbés sont essentiellement H^+ et Al^{3+} . Dans les sols basiques ce sont principalement Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ . On rencontre aussi, mais en faibles quantités, NH_4^+ , M^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} etc. Or ces cations absorbés sont en fait échangeables avec les cations contenus dans les solutions du sol, c'est-à-dire qu'ils forment avec ceux-ci un équilibre qui peut être déplacé d'un côté ou de l'autre. Ce sont les phénomènes ou réactions d'échange.

Lois qui régissent les phénomènes d'échange des cations

Les molécules d'eau retenues par les ions "hydratés" absorbés et par les molécules du complexe absorbant forment autour de celles-ci une couche liée appelée solution interne. Sa concentration en chacun des cations présents y est différente de celle de la solution libre qui l'entoure (solution externe) mais il existe un équilibre entre les deux : toute modification de l'une entraîne une modification de l'autre par réaction d'échange. Cette réaction est réversible mais la vitesse de déplacement devenant de plus en plus lente à mesure qu'on approche de l'équilibre celui-ci n'est jamais complètement établi. Elle est même en fait cinétique c'est-à-dire que les passages des ions d'une solution à l'autre sont continuels même à l'équilibre, donc lorsqu'il n'y a plus de modification des concentrations.

Les différents ions ne sont pas absorbés avec la même intensité : les ions lourds et polyvalents Cu , Mn , Zn , sont fortement absorbés et difficiles à échanger sauf par l'ion Al^{3+} dans les sols très acides. Les ions hydratés comme Na^+ sont au contraire

faiblement retenus et les ions monovalents moins que les polyvalents. L'ordre décroissant d'absorption est le suivant :



Mais d'autres facteurs interviennent aussi, le type d'argile ou d'humus, l'ordre dans lequel les ions ont été apportés, les interactions avec les autres cations présents etc. Par exemples : un excès d'ions Ca augmente l'échangeabilité des ions K - Un ion apporté par un engrais est toujours plus échangeable, donc plus assimilable par les plantes, qu'un ion absorbé préalablement - La dilution de la solution externe par les pluies favorise l'absorption des cations bivalents, le lessivage affectant préférentiellement les monovalents.

Le caractère le plus important de ces phénomènes d'échange est qu'il s'agit de réactions ioniques : les quantités équivalentes pour ces réactions sont donc les masses atomiques divisées par les valences ou équivalents-gramme. Ainsi l'échange d'un ion bivalent comme Mg^{2+} nécessite deux ions monovalents comme K^+ . Par conséquent un atome-gramme de Mg^{2+} , soit 24g, est échangé contre deux atomes-gramme de potassium soit $2 \times 39 = 78\text{g}$. De même l'échange d'un atome-gramme de sodium Na^+ (23g) nécessite un demi atome-gramme de calcium Ca^{++} soit $40/2 = 20\text{g}$. On exprime habituellement la teneur en cation d'un échantillon de sol en milli-équivalents (millième d'équivalent) pour 100g de terre (ou d'argile parfois) dont le symbole est m.eq/100g ou plus simplement mé. On peut ainsi additionner les teneurs des différents cations (somme des cations en mé).

Expression globale de l'état du complexe absorbant :

La quantité totale de cations (en mé) que peuvent fixer en position échangeable 100g d'une couche de sol donnée est appelée sa capacité d'échange des cations (on dit encore "CE des bases"). La quantité de cations effectivement fixée en position échangeable est la somme des cations échangeables (ou somme des bases). Le rapport entre cette somme (symbole S) et la capacité d'échange (symbole T) est le taux de saturation noté V %.

Exemple : Un sol rouge de Yaoundé a, en surface, une capacité d'échange de 10 mé et il contient effectivement 1,5 mé de calcium, 1,1 mé de magnésium 0,3 mé de potassium et 0,1 mé de sodium. Sa somme des cations est donc 3 mé et son taux de saturation $3/10 = 30 \%$.

Un sol de Garoua a une capacité d'échange en surface de 2,70 mé et il contient 1,3 mé de Ca, 0,4 mé de Mg, 0,07 de K et 0,2 de Na. Donc $S = 1,97$ mé et $V = 1,97/2,70 = 73 \%$

Localisation et importance des différents ions

Le cation Ca^{++} . Les minéraux qui contiennent du calcium sont les plagioclases, les pyroxènes et les amphiboles. Les roches calcaires en contiennent sous forme de carbonate $CaCO_3$. On appelle calcaire actif le carbonate qui est finement divisé (fraction argile ou limon) et facilement solubilisable dans l'eau chargée de gaz carbonique CO_2 .

L'altération des minéraux calciques libère des ions Ca^{++} dont une partie est retenue par le complexe absorbant, l'autre entraînée par les eaux de percolation. Les ions absorbés sur le complexe argilo-humique peuvent passer ultérieurement dans les solutions du sol et y être extraits par les racines pour la nutrition des plantes.

L'ion calcium détermine en outre le type de matière organique et la nature des argiles néoformées, le mode d'assemblage du complexe argilo-humique et donc la stabilité de la structure du sol. L'ion calcium a donc un rôle capital. Les espèces végétales elles-mêmes se répartissent en calcifuges et calcicoles. Les calcifuges ne peuvent tolérer une concentration élevée en calcium des solutions du sol.

Le cation Mg^{++} . Le magnésium peut provenir des minéraux noirs ou ferromagnésiens ou de la dolomie, carbonate double de calcium et de magnésium. Libéré par l'altération il est, comme le calcium, retenu partiellement par le complexe absorbant. Il est cependant généralement moins abondant que le calcium sauf dans certains horizons hydromorphes.

Le cation K^+ . Le potassium forme une maille entre les feuillets des micas (biotite, muscovite) et de l'illite (argile). Au cours de l'altération les ions K^+ des illites peuvent soit entrer profondément dans les mailles cristallines (on parle de rétrogradation) soit au contraire passer en position échangeable sur les bordures des feuillets. La dessiccation, l'élévation du pH et l'abondance du calcium favorisent la rétrogradation du potassium. L'absorption des ions K^+ par les plantes et l'hydratation des argiles ont l'effet contraire.

Le cation NH_4^+ . L'ion ammonium provient de la minéralisation de la matière organique fraîche ou humifiée. Il est retenu par les argiles soit sous forme fixée dans les feuillets des argiles soit sous forme échangeable. Il est très énergiquement retenu en milieu acide et désaturé. En milieu biologiquement actif, peu acide et bien aéré au contraire l'ammonification (formation d'ammoniac gazeux ou d'ion NH_4^+ en solution) est suivie d'une nitrification qui donne des nitrites et des nitrates solubles mieux absorbés par les racines.

Les oligo-éléments. Ce sont des éléments indispensables à la nutrition des plantes (catalyse des diastases et vitamines) mais à l'état de traces seulement. On les exprime en ppm, parties pour million. Ce sont Cu, Zn, Co, Mo, B etc... La plante souffre de carence si ces éléments sont en quantités insuffisantes ou bloqués sous une forme non échangeable. S'ils sont en excès au contraire il peut y avoir toxicité (manganique par exemple).

Le soufre S : est un élément essentiel à la nutrition des plantes notamment des légumineuses. Contenu dans la matière organique il est libéré sous forme de sulfate soluble lors de la minéralisation de celle-ci. Une partie est perdue par lessivage, perte qui est compensée par l'apport pluvial et l'oxydation des minéraux sulfureux des roches. L'autre partie est absorbée par les plantes.

Le phosphore P : Le phosphore provient d'une minéralisation de la matière organique et de l'altération des minéraux. Une partie du phosphore ainsi libéré est piégée sous forme insoluble dans les concrétions ferrugineuses ou alumineuses (latérites du Sud-Cameroun) ou à l'état de phosphate d'alumine et de fer, ou même dans les feuillets de certaines argiles. Le reste est retenu sous forme d'anion PO_4^{3-} à la surface des colloïdes par l'intermédiaire de cations Ca^{2+} , Fe^{3+} ou Al^{3+} mais surtout par les hydrates colloïdaux de fer et d'alumine. C'est ce phosphore assimilable qui maintient constante la teneur des solutions du sol. La teneur en phosphore total des sols du Cameroun est souvent bien inférieure à 1 % sauf dans les sols dérivés de basalte.

Autres propriétés du complexe argilo-humique

En agissant sur les teneurs ioniques des solutions du sol le complexe argilo-humique commande l'alimentation chimique des plantes en constituant un "volant" de substances nutritives immédiatement disponibles. Ces éléments directement assimilables proviennent des réserves minérales ou cations totaux (ou bases totales) par une lente et irréversible dégradation des structures cristallines des minéraux primaires ou secondaires du sol.

Outre ce pouvoir absorbant qui a un effet tampon sur l'équilibre chimique du milieu en retenant une partie des ions apportés par les eaux de percolation ou libérés par l'altération et en ravitaillant "en continu" les solutions nutritives, le complexe argilo-humique détermine d'autres propriétés fondamentales du sol notamment sa structure sensu lato.

Dans le complexe argilo-humique les petites molécules d'humus se groupent autour d'une micelle argileuse et s'entourent elles-mêmes de molécules d'eau qui empêchent les cations d'approcher. L'humus entrave ainsi la floculation de l'argile mais lorsque cette floculation s'est produite il la stabilise au contraire. Il constitue donc un ciment de choix pour la formation d'agregats stables.

II.5. LES SOLUTIONS ET L'ATMOSPHERE DU SOL

Les solutions et les gaz du sol occupent la porosité totale du sol qui s'ouvre à la partie supérieure sur l'atmosphère terrestre et ses eaux superficielles et souvent à la partie inférieure sur une nappe phréatique d'arène. Ces fluides pénètrent plus ou moins les constituants du squelette minéral et sont associés aussi au complexe argilo-humique (eau hygroscopique ou solution interne) mais ils occupent surtout des "vides" complexes, tubulaires ou d'assemblage bordés à la fois de particules du squelette et de fond matriciel argileux, ou argilo-organique ou hydroxydique. Ils y sont en communication aussi avec les radicelles des plantes qui y viennent puiser l'eau ou les éléments nécessaires à leur croissance.

- Outre leur composition chimique détaillée certaines des propriétés globales de ces fluides sont utilisées pour les caractériser, notamment l'acidité ou pH et le potentiel redox ou rH_2 .

L'acidité du sol est la concentration en ions H^+ des solutions du sol. On l'exprime par le pH qui varie de 0 à 14 : en dessous de 7 le pH est dit acide, au-dessus de 7 on dit que la réaction du sol est basique. Les sols du Sud-Cameroun sont fortement acides (pH de 4 à 5), dans le Nord on peut rencontrer des sols basiques (pH de 8 à 9). Autour de 7 le pH est dit neutre. On mesure le pH avec un pH mètre de terrain ou de laboratoire sur un mélange terre-eau dans le rapport 1/1. Il existe aussi des indicateurs colorés (papier pH). L'acidité du sol varie notablement d'une saison à l'autre.

Le potentiel redox ou rH_2 renseigne sur le caractère oxydant ou réducteur du sol. Sa mesure est délicate. L'équilibre est réalisé pour un rH_2 de 27. le rH_2 peut descendre en dessous de 20 dans les sols réducteurs de bas-fond.

- La fabrication et l'organisation des vides utilisés pour le stockage et la circulation des fluides résultent des processus physico-chimiques (caries de dissolution) et surtout des processus biologiques déterminés par ces derniers (tracé des racines et des galeries). Des gaz peuvent être piégés dans les fins capil-

laires tandis que les plus gros pores sont rarement entièrement envahis par des solutions. Seul le réseau de pores interconnectés qui est ouvert sur l'atmosphère sert au déplacement des fluides sous l'action des facteurs dynamiques mais les autres sont le siège de lents phénomènes d'échanges ioniques.

II.6. LES RACINES ET LES ANIMAUX

Les racines

- Les racines assurent l'ancrage des plantes et leur nutrition en eau et ions. Leur domaine de prospection peut atteindre plusieurs mètres de profondeur. Elles consomment de l'oxygène et secrètent des acides qui facilitent leur pénétration et échangent leurs ions H^+ avec les cations des solutions du sol. Elles écartent par pression les interstices dans lesquels elles s'insinuent mais doivent contourner les cailloux et les secteurs durcis. Le retrait à la dessiccation peut les briser et les animaux les détruire.

- Leur tracé et la dynamique de leur croissance sont commandés par ces exigences : d'où le développement d'un chevelu superficiel dense pour exploiter un horizon humifère riche ; ou au contraire une pénétration profonde si les horizons supérieurs sont pauvres et secs ; contour ou perforation des agrégats selon la consistance de ceux-ci et la localisation des substances nutritives ; changement de direction pour éviter une nappe d'eau asphyxiante ; enfoncement rapide pour suivre un front d'humectation ; placage sur des surfaces d'agrégats ou de cavités biologiques enrichies en cations et humus etc. D'une manière générale les herbes graminéennes (steppe) ont un système racinaire plus uniformément réparti dans le sol que celui de la forêt qui forme plutôt un lacis superficiel dense.

Bien que les racines soient capables de faire leur chemin dans la masse d'un horizon pas trop compact ou durci elles utilisent de préférence les chenaux existants : anciennes galeries de vers, de larves ou de petits mammifères remplies de terre humifère éboulée par les eaux - anciens passages de racines décomposées

par la faune, fentes de retrait et espaces inter-agrégats, etc...

A leur tour les racines, celles de graminées notamment, contribuent à créer une porosité tubulaire qui oriente des circulations préférentielles d'eaux, de gaz, de matières et d'animaux.

- Les radicelles assurent le plus souvent la nutrition minérale des plantes en échangeant leurs ions H^+ contre les cations des solutions du sol en équilibre avec le complexe absorbant mais elles peuvent aussi parfois prélever directement ces cations dans les minéraux en cours d'altération (sols jeunes ou peu épais).

La nutrition des végétaux est correctement assurée si la capacité d'échange est suffisante, le taux de saturation pas trop bas et s'il n'existe pas d'antagonisme entre les cations métalliques présents.

La capacité d'échange est assurée par les éléments colloïdaux, argile et surtout l'humus qui joue en outre un rôle catalytique.

Le taux de saturation ne doit pas être trop bas car les cations échangeables, mêmes s'ils sont en quantité notable, sont alors plus énergiquement retenus. Certaines plantes sont adaptées aux milieux très désaturés (bruyère).

Il ya antagonisme entre les ions si l'un d'eux est en proportion trop importante ce qui nuit à l'absorption d'un autre par les plantes. L'optimum correspond à 75 % de calcium 10 % de magnésium, 5 % de potassium. Si le taux de magnésium ou de potassium dépassent celui du calcium la nutrition en calcium peut être déficitaire. S'il y a excès de calcium (sols riches en calcaire actif) on observe une carence en fer et en manganèse (chlorose) par insolubilisation de ceux-ci, carence en phosphore à pH supérieur à 8, carence en magnésium, rétrogradation du potassium. Cependant certaines plantes sont mieux tolérantes. L'excès de sodium est néfaste à la majorité des espèces.

Les animaux

- Les animaux ne présentent pas une importance comparable dans tous les types de sol et cette importance décroît généralement de la litière vers la profondeur. Certains sols engorgés sont pratiquement "abiotiques" alors que d'autres peuvent être qualifiés de fauniques tellement y est grand le rôle de la faune dans leur organisation.

- Les vers, termites, fourmis, Oryctéropes etc. édifient en surface du sol des monticules terreux qui sont ensuite étalés par l'érosion puis réincorporés au sol. La matière de ces constructions épigées a été prélevée à différentes profondeurs où elle est remplacée par des galeries ou des cavités. D'autres constructions de la faune sont hypogées (termites du sol par exemple). La faune est très abondante dans la litière dont elle morcelle les feuilles et brindilles pour les ingérer. Les débris végétaux passent généralement par plusieurs tubes digestifs au cours de leur dégradation car chaque animal y trouve un composant que les précédents n'ont pu digérer.

- Le sol est le support minéralogique qui détermine l'installation de la flore et de la faune mais l'activité biologique qui en résulte aménage et modifie le milieu où elle s'exerce. Cette activité peut provoquer des réactions physico-chimiques, la précipitation de carbonates dans une termitière par exemple. La matière vivante agit comme transformateur d'énergie.

II.7. L'ETUDE MICROMORPHOLOGIQUE

- La loupe de poche, la loupe binoculaire, le microscope polarisant, le microscope électronique, le microscope à balayage sont les systèmes optiques et électroniques qui permettent d'accéder à une connaissance de plus en plus intime de l'organisation fine de la matière du sol et à la détermination minéralogique de ses constituants. La nature des minéraux néoformés ou hérités, leur présentation et leur organisation (notamment leur disposition relative entre eux et vis-à-vis des pores, qui indique l'ordre d'apparition des différentes composantes) ne sont en effet totalement perceptibles qu'à l'échelle microscopique qui se révèle ainsi être celle des mécanismes physico-chimiques affectant le milieu sol.

- De ce fait l'examen à fort grossissement n'est pas seulement un complément utile de l'examen macroscopique mais un maillon essentiel de la compréhension du sol. Son développement est très récent en ce qui concerne les sols camerounais mais il amène déjà et amènera encore des révisions importantes de nos connaissances.

- L'étude au microscope polarisant est la plus répandue des méthodes de microscopie des sols. Elle s'effectue sur des lames minces (ou plaques minces) de sol. L'échantillon est d'abord consolidé par une résine durcissante (imprégnation) puis usé par frottement jusqu'à une épaisseur de quelques microns et examiné en transparence d'abord avec un éclairage de lumière équivalente à la lumière naturelle puis en lumière polarisée (observation "entre nicols croisés"). C'est en fait le moyen utilisé depuis longtemps par les pétrographes pour déterminer la nature minéralogique des constituants des roches et cette technique convient aussi évidemment à ceux du sol. Comme pour les roches on peut aussi déduire de l'organisation élémentaire du plasma et du squelette du sol des indications sur l'ordre relatif d'apparition des différents minéraux néoformés ainsi que des pores.

- Différents types d'organisation ont été ainsi distingués : par exemple des organisations de type éluvial qui peuvent être ultérieurement envahies par des organisations de type illuvial (séparations plasmiques appelées cutanes d'illuviation parmi lesquelles on distingue selon leur nature minéralogique des ferranes, des argillanes, des ferro-argilanes, des organo-argilanes etc.).

- A noter que pour l'examen au microscope polarisant l'échantillon a dû être séché (contraction) puis a subi une coupe dans une section plane. Si l'on veut observer le relief des faces naturelles il faut faire appel à la loupe binoculaire et pour les forts grossissements au microscope à balayage (Stéréoskan). Dans le microscope électronique les particules à observer sont dispersées dans un liquide et l'organisation originelle est donc perturbée. Enfin le microscope électronique à émission de rayons X (microsonde) permet de doser les éléments chimiques contenus dans un très petit volume ou de donner une image de la répartition d'un élément donné dans l'échantillon préparé.

TROISIEME PARTIE

LA DYNAMIQUE DES SOLS

III.1. LA DYNAMIQUE DE L'EAU

Une partie de l'eau de pluie frappe directement le sol, l'autre est interceptée par le couvert végétal d'où elle s'évapore ou rejoint la surface du sol en gouttant des feuilles ou en ruisselant le long des branches et des troncs.

L'eau qui atteint finalement la surface du sol est partagée en trois :

- une partie s'évapore
- une partie ruisselle
- une partie s'infiltré.

L'eau qui s'évapore est sans action notable et perdue pour le sol.

L'eau qui ruisselle forme des filets d'eau parallèles ou des filets anastomosés ou une nappe continue ou une nappe ravinante. Elle exerce un effet érosif global en entraînant toute la terre du sol ou sélectif en se limitant aux parties fines colloïdales (argile et humus). Elle "écrème" ou "burine" le sol en laissant généralement un résidu sablo-graveleux à sa surface. Cette eau de ruissellement s'infiltré dans le sol de bas en pente ou rejoint le réseau hydrographique.

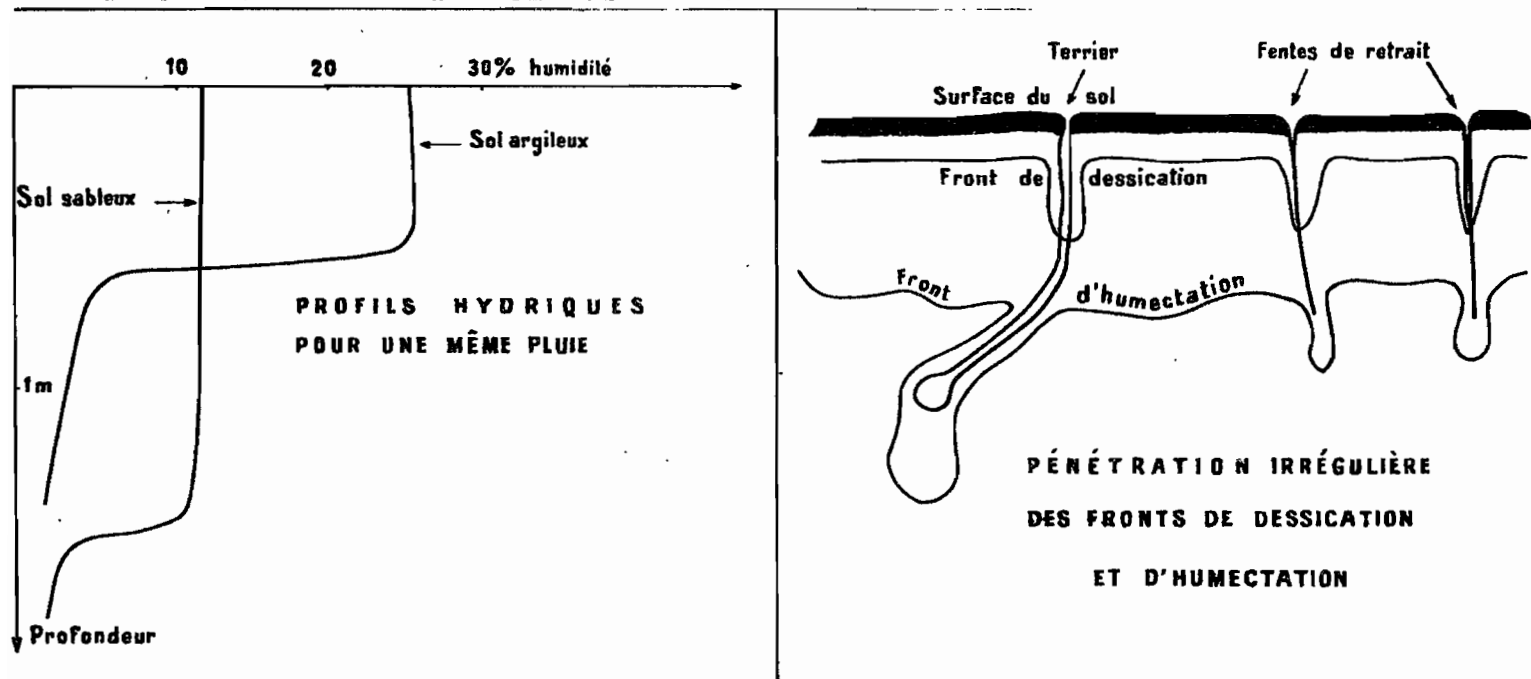
L'eau qui s'infiltré peut avoir ruisselé pendant quelques décimètres avant de rencontrer un secteur perméable qui l'absorbe. Elle a trois devenir :

- s'évaporer par remontée capillaire jusqu'en surface du sol ou après absorption par les racines et transport jusqu'aux parties aériennes de la plante (évapotranspiration).

- humecter le sol sec et y être retenue par les forces capillaires jusqu'à la saison sèche. Cette eau sert à reconstituer le stock saisonnier d'humidité du sol. Elle est déterminée par la capacité de rétention du sol.

- circuler per descensum et rejoindre lentement une nappe phréatique ou un niveau imperméable qu'elle suivra alors obliquement. Cette eau de gravité à écoulement lent ou rapide échappe ainsi au sol et rejoint le réseau hydrographique (mouillère des versants) ou les nappes profondes. Sa circulation est commandée par la perméabilité verticale et latérale de chaque horizon du sol (macroporosité tubulaire) et elle susceptible d'entraîner des matières en suspension.

L'humidité du sol est fournie par la pluie ou les nappes et sa dynamique est régie par trois forces : l'évaporation, la tension capillaire et la gravité. C'est pourquoi, après une même pluie uniformément répartie, le front d'humectation (puis le front de dessiccation) n'est pas exactement parallèle à la surface du sol et n'atteint pas la même profondeur d'un type de sol à l'autre. Le profil hydrique (courbe d'humidité en fonction de la profondeur) d'un sol argileux à bonne capacité de rétention diffère de celui d'un sol sableux :



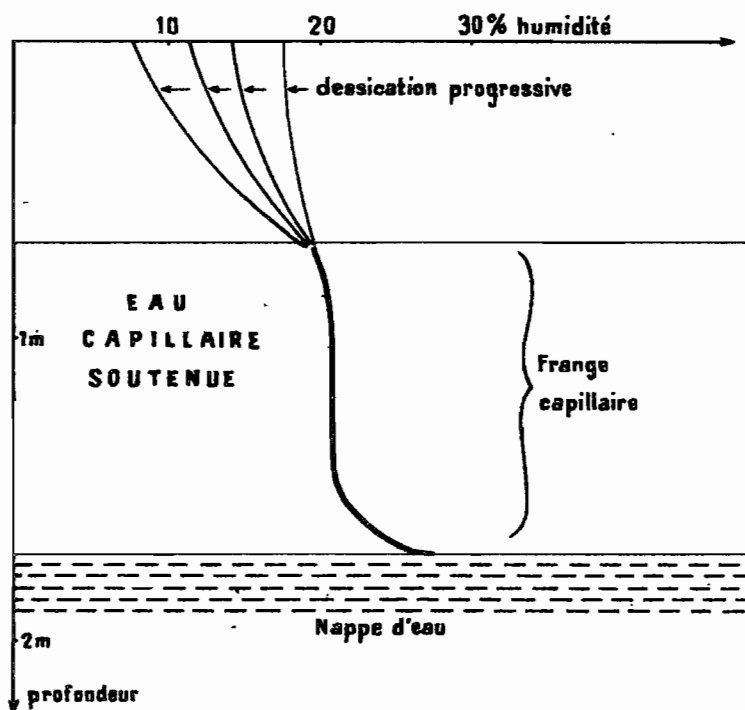
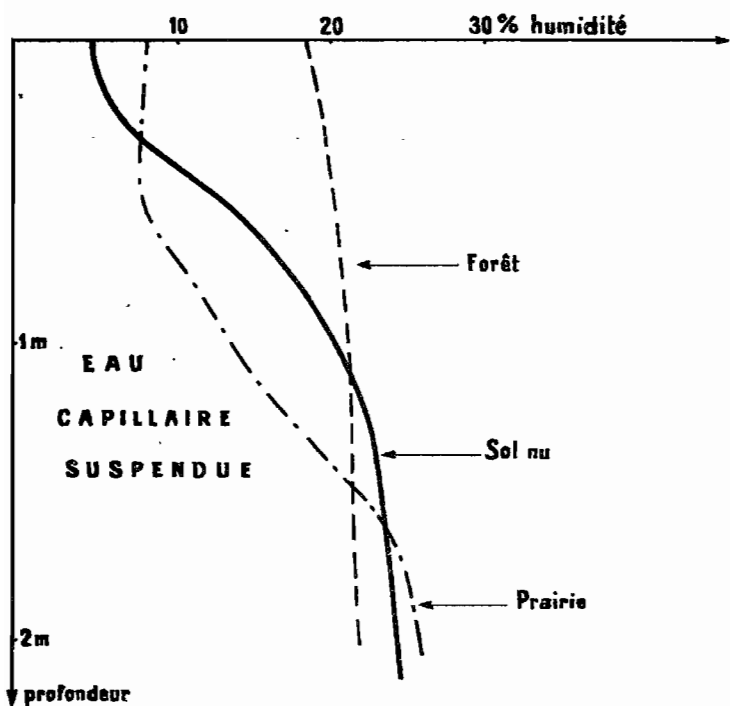
Les fentes de retrait et les passages de racines ou d'animaux sont des cheminements préférentiels pour l'eau de gravité : le front d'humectation (puis le front de dessiccation) forme des indentations à leur endroit.

- l'ascension capillaire : L'évaporation de l'eau des horizons superficiels crée de nouvelles forces capillaires qui provoquent un mouvement ascendant de l'eau stockée dans le sol. Ce mouvement est trop lent pour compenser les pertes par évaporation et même, si l'évaporation est brutale (sol nu sous le soleil et par temps sec) il peut y avoir arrêt de cette ascension par rupture du lien capillaire (ou self-mulching).

Dans un même sol on peut observer des profils hydriques très différents selon la couverture végétale et la profondeur de la nappe :

sol profondément drainé :

sol à nappe peu profonde :



S'il y a une nappe d'eau l'ascension capillaire peut compenser toutes les pertes par évaporation (mais très lentement) sur une certaine épaisseur au-dessus de la nappe : 50 cm en sol sableux 1,5 m en sol argileux par exemple. Plus haut l'humidité décroît selon le couvert et l'évaporation.

- En sol profondément drainé la lente ascension capillaire persiste si le sol est couvert de végétation et l'évaporation lente. Ainsi le sol à la longue s'y assèche plus profondément.

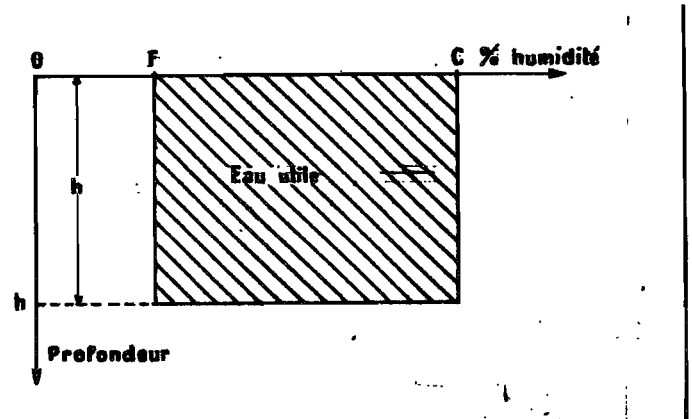
Nutrition en eau des plantes

L'eau fortement retenue en dessous du point de flétrissement permanent n'est pas disponible pour les plantes. L'eau utile est donc la différence entre l'humidité à la capacité de rétention (C) et celle au point de flétrissement (f). Si la densité apparente est d et la hauteur du sol h la réserve du sol est :

$$\text{eau utile} : \frac{(C - f)}{100} \times d \times h$$

Exemple : C = 20 % f = 10 %
 d = 1,5 h = 1000 mm :

$$\begin{aligned} \text{eau utile} &= \frac{(20 - 10)}{100} \times 1000 \times 1,5 = \\ &= \boxed{150 \text{ mm}} \end{aligned}$$



Cette eau utile est de plus en plus difficile à absorber par les plantes à mesure qu'elle s'épuise. Certaines plantes dites hydrophiles ont besoin de beaucoup d'eau faiblement retenue alors que les plantes dites xérophiles savent réduire leur consommation.

Economie de l'eau

En agronomie il est nécessaire de contrôler l'humidité du sol qui se trouve soit en excès soit en défaut (sécheresse).

1/ excès d'eau : on lutte contre l'excès d'eau en améliorant le drainage du sol en agissant soit par le modelé du champ (ados, planches, billons) soit par le drainage du champ (fossés, drains) soit par le contrôle de la nappe si elle existe : une remontée de la nappe asphyxie les racines qui s'en étaient approchées.

2/ sécheresse : on lutte contre la sécheresse par l'apport d'eau (irrigation par aspersion, submersion, infiltration latérale ou souterraine) ou en obligeant l'eau de pluie à s'infiltrer sur place (petits creux, diguettes) ou en limitant l'évaporation (paillage, mulching, qui limite l'évaporation directe, binage qui en détruisant les plantes adventices limite la transpiration végétale).

Importance de la dynamique de l'eau :

L'eau chasse les gaz du sol quand elle pénètre et est remplacée par des gaz de l'atmosphère lorsqu'elle s'évacue. Elle entraîne des matières en solution ou suspension puis les dépose ensuite. Elle déclenche la germination et la croissance des végétaux ainsi que l'activité de la faune. L'étude de sa dynamique présente donc une importance fondamentale.

III.2. LA DYNAMIQUE DES MATIERES SOLIDES

Elle est conditionnée d'une façon directe ou indirecte par la dynamique de l'eau :

- L'érosion superficielle déplace des particules colloïdales et même des sables.

- Un gonflement tend à se produire lorsque l'humidité dépasse la limite de retrait : s'il est contenu la structure devient massive et la macroporosité est partiellement effacée au profit d'une porosité plus fine qui retient mieux l'eau. La perméabilité diminue et l'aération devient déficiente. Le retrait ultérieur lors du dessèchement du profil facilite au contraire l'infiltration mais il peut rompre des racines.

- L'eau de gravité entraîne en suspension de l'humus, de l'argile et des limons, en solution des cations, de la silice, du fer réduit ou complexé par les matières organiques etc. Elle dissout des sels, carbonates, sulfates, chlorures etc s'ils sont présents. Une modification des conditions d'oxydoréduction ou un ralentissement de la vitesse d'infiltration peut provoquer le dépôt ultérieur des particules ou ions mis en mouvement. Ce dépôt a lieu dans l'horizon B sous-jacent ou dans un horizon B du sol de bas de pente lorsqu'il a circulation oblique dans la séquence.

On appelle lessivage ce processus d'entraînement en suspension de substances colloïdales (argile, humus, fer) suivi d'un dépôt dans l'horizon sous-jacent. L'horizon de départ noté A₂ est un horizon lessivé, l'horizon de dépôt noté B₂ est un horizon d'accumulation (oblique ou verticale).

S'il y a départ d'argile des horizons A mais sans qu'on observe d'accumulation dans les horizons sous-jacents on dit qu'il y a appauvrissement en argile. L'argile ainsi enlevée peut s'accumuler en bas de pente s'il s'y produit un ralentissement du drainage dû à un bouchon d'argile néoformée par exemple.

Mais les remontées de terre fine par les termites peuvent compenser les pertes d'argile par le lessivage ou l'appauvrissement. L'examen micromorphologique montre alors l'existence de cutanes d'illuviation (argilanes) sans qu'il y ait pour autant un ventre dans la courbe granulométrique de l'argile. En fait les causes de la différenciation texturale peuvent être variées : la texture des horizons A est souvent plus sableuse, les causes pouvant être : un départ d'argile ou un apport de sable par l'érosion, une dégradation ou un entraînement sélectif de l'argile, une néoformation préférentielle d'argile dans les horizons sous-jacents etc.

- L'ascension capillaire suivie d'évaporation ou de dessiccation autour des racines peut provoquer la concentration et le dépôt des sels dissous (nodules carbonatés) ou des oxydes de fer (concrétions ferrugineuses). Une croûte de sels en surface du sol peut même apparaître.

- La faune et la végétation contribuent à cette dynamique des matières: vers, termites, fourmis, fouisseurs remontent de la terre que l'érosion entraîne ensuite on ré-incorpore aux horizons supérieurs. Les vents ou chablis (chute des arbres) arrachent la terre autour des racines et la redéposent en surface. Les passages de racines et d'animaux se remplissent de terre éboulée etc.

III.3. LA DYNAMIQUE DES GAZ.

Le front d'humectation en pénétrant dans le sol peut comprimer momentanément les gaz du sol puis ceux-ci s'échappent vers le haut. Les variations diurnes de pression atmosphérique font également osciller l'atmosphère du sol. Inversement le départ de l'eau par infiltration ou évaporation est compensée par une arrivée de gaz. Ainsi l'eau chasse le gaz et le gaz remplace l'eau, la teneur en gaz pouvant ainsi être déduite à

chaque instant de la teneur en eau. La dynamique des gaz est en outre compliquée par la dissolution de gaz dans l'eau (oxygène, CO₂ etc) et par les échanges ou synthèse de gaz dûs à la respiration animale et végétale ainsi qu'aux fermentations microbiennes.

III.4. DYNAMIQUE DES PLANTES ET ANIMAUX

Les végétaux installent progressivement leur système racinaire dans les horizons du sol en utilisant préférentiellement les galeries existantes. Les racines empruntent au complexe absorbant du sol des éléments qui servent à la construction des parties aériennes des plantes. A la mort de celles-ci ces éléments sont restitués au sol (cycle des éléments). Sur les sols peu épais ou peu évolués les racines participent à la désagrégation de la roche et à son altération chimique. En assèchant le sol elles y provoquent des précipitations chimiques ou des phénomènes de retrait.

La faune du sol est de poids négligeable mais elle joue un rôle important dans le cycle des éléments chimiques par son métabolisme (activité respiratoire, nutrition, déjections, cadavres). La faune déplace et transforme les matières minérale et végétale.

Les vers de terre et les termites jouent un rôle important : Les vers homogénéisent la terre fine des sols, mélangent les constituants minéraux et organiques, dispersent les germes de la microflore et microfaune, améliorent la stabilité structurale et la résistance des terrains plats à l'érosion, augmentent la capacité de rétention d'eau et la teneur en azote des sols, favorisent l'humification des débris végétaux etc.

Leurs galeries à dominante verticale facilitent l'aération et l'humectation du sol ainsi que la pénétration des racines et des autres animaux. Un lessivage de l'argile peut se produire lorsque la terre est fluidifiée par les vers. Les horizons travaillés par ceux-ci ont souvent une texture sableuse et homogène.

Au total les vers améliorent la fertilité du sol et les exemples illustres abondent : ils incorporent au sol les limons déposés chaque année par le Nil. Les vers européens introduits en Nouvelle Zélande y ont triplé la production de trèfle blanc dans des sols carencés en Molybdène assimilable. Ils ont triplé le rendement en céréales d'un agriculteur américain etc.

Toutefois certaines espèces augmentent la compacité des sols donnant une structure massive défavorable. C'est ce qui paraît se passer aux Indes et dans la Benoué où ils prolifèrent d'une manière exceptionnelle (sols "dentelles").

Les termites détruisent les litières végétales, contre-carrent l'humification et pour certaines espèces détruisent même la matière organique. Leurs édifices épiés sont formés de terre remontée d'horizons souvent profonds, et leur matière est plus argileuse et plus riche en cations que l'horizon supérieur qu'ils recouvrent. Ils participent ainsi au cycle des éléments chimiques. Ils peuvent provoquer des précipitations de carbonates sous forme de nodules, même dans des sols fortement désaturés en calcium. L'activité termitique peut être un puissant facteur d'homogénéisation du sol qui est alors peu différencié par la couleur et la texture. Les petites boulettes façonnées par les termites (délicats moulages des débris végétaux) paraissent peu stables et bien différentes des pseudo-sables de facture physico-chimique.

III.5. DYNAMIQUE EVOLUTIVE DU PROFIL

1 - DEVELOPPEMENT DES HORIZONS ET LEURS RELATIONS

Tout horizon de sol résulte de mécanismes de formation et de mécanismes de destruction ou de transformation. Par exemple un horizon B peut être attaqué à sa partie supérieure par le lessivage ou la dégradation de l'argile qui le transforment en horizon A2 tandis qu'il s'épaissit à sa partie inférieure par argilisation ou illuviation dans l'horizon C sous-jacent. De même l'horizon supérieur humifère se forme par apport de matière organique fraîche en surface du sol (litière, cadavres) ou dans sa masse (racines, activité biologique) et par l'humification progressive de ces substances. Sa destruction est déterminée à la fois par la minéralisation de la matière organique, par l'entraînement de celle-ci en profondeur (acides fulviques principalement) et par le décapage dû à l'érosion superficielle.

L'horizon A2 qui apparaît dans certaines pédogénèses entre ces horizons A1 et B s'épaissit à sa base aux dépens de l'horizon B tandis que l'horizon A1 l'envahit petit à petit par le haut. Ainsi, en milieu ouvert, s'établit un mécanisme d'évolution "normale" du paysage pédologique où l'érosion superficielle abaisse constamment la surface du sol, amenant l'horizon A1 à pénétrer progressivement le squelette minéral de l'horizon A2, où l'horizon A2 se forme par entraînement ou dégradation du plasma de l'horizon B, cet horizon B par argilisation ou illuviation dans l'horizon C, l'horizon C par altération de la roche R.

Mais ce schéma simplifié où tous les horizons se déplacent lentement dans le sens vertical descendant, R devenant C, C devenant B, B devenant A2 ou A1, A2 devenant A1, A1 partant à la rivière, ne s'applique déjà plus partout où la surface du sol reçoit plus de matière qu'elle n'en perd. C'est le cas des terrains que recouvrent lentement des alluvions, colluvions, éboulis, cendres volcaniques, poussières éoliennes, etc. Il se complique également là où le lessivage oblique, ou les nappes perchées et phréatiques, apportent latéralement des substances dissoutes. C'est pourquoi dans les paysages fermés, ou dans

certaines parties confinées d'un paysage ouvert sur un réseau hydrographique, un fonctionnement inverse du précédent a été constaté, l'argilisation envahissant par exemple un ancien horizon A2 ou du moins une organisation de type éluvial. En fait de nombreuses organisations illuviales paraissent s'être formées dans d'anciennes structures éluviales ou de "départ", dont la facture est nettement pédologique. C'est là un enseignement récent et capital des études micromorphologiques : entre le départ en solution dans l'horizon C où l'architecture de la roche est conservée et l'accumulation de matière fine de l'horizon B le sol acquiert donc une organisation éluviale de type pédologique.

Il n'est donc pas toujours, ni tout-à-fait, exact de considérer chaque horizon comme une tranche d'épaisseur e qui se fabrique à la vitesse V_f à la partie inférieure et qui se détruit à la vitesse V_d à la partie supérieure, et dont l'épaisseur e au temps t est déterminée non par les valeurs absolues de V_f et V_d mais par toutes les variations de leur différence $V_f - V_d$ avant l'instant t . En effet la concentration comme la destruction de la substance diagnostique d'un horizon (matière organique en A1, minéraux argileux en B etc...) peuvent s'effectuer simultanément dans toute la masse de l'horizon et la matière pédologique se déplacer à contre-gravité (vers et termites apportent puis incorporent directement à l'horizon A1 de la terre argileuse prélevée dans les horizons B et C profonds. Les carbonates ou les sels solubles peuvent s'individualiser par remontée capillaire de solutions du sol, l'hydromorphie et les néosynthèses qui l'accompagnent peuvent gagner aussi de bas en haut ou vers l'amont etc.).

Il importe cependant de garder à l'esprit deux notions essentielles que le schéma simpliste précédent (*) aide à comprendre :

(*) Dans un but didactique on peut ramener l'étude dynamique d'un horizon à un problème de robinets du certificat d'étude :
au temps t la baignoire (l'horizon) est à un certain stade de remplissage (épaisseur) qui dépend de l'activité antérieure du robinet de remplissage (vitesse de formation) et de la vidange (vitesse de disparition)
à ce même temps t l'équilibre tend à se déplacer ou à se maintenir selon les vitesse relatives de remplissage et de vidange.

- 1 - la présentation actuelle d'un horizon est la résultante non pas des vitesses actuelles mais du travail antérieur de ses multiples mécanismes de formation et de destruction. A ce point de vue les vitesses relatives ont plus d'importance dans l'épaississement résultant que les vitesses absolues, ou que la nature des processus qui déterminent plutôt, quand à elles, ses autres caractères morphologiques.
- 2 - au temps t actuel les vitesses de ces mécanismes peuvent être différentes des précédentes et tendre soit à épaissir, soit à amincir, soit à maintenir l'horizon hérité de ces actions antérieures, voire même à modifier sa composition si la nature des processus a également changé.

2 - EXEMPLES CAMEROUNAIS

Cette notion schématique de vitesses actuelles et passées, absolues et relatives permet d'expliquer la superposition dans un même profil de caractères pédologiques qui pourraient paraître à première vue contradictoires ou exclusifs. En voici quelques exemples :

1/ Les sols ferrallitiques à accumulation humifère des régions d'altitude de l'Ouest-Cameroun peuvent être en outre rajeunis par l'érosion. Il n'est pas nécessaire pour comprendre ce double aspect de dissocier ces deux phénomènes dans le temps en les attribuant à deux périodes successives différentes : le rajeunissement résulte d'une vitesse d'altération en C, ou de néoformation d'argile en B, qui n'a pas été le plus souvent supérieure à celle de l'érosion superficielle en A1. La déclivité et l'absence d'écran forestier protecteur expliquent cela.

L'accumulation humifère indique que la vitesse d'apport végétal et animal a été naguère le plus souvent supérieure à la somme des vitesses d'élimination de la matière organique par minéralisation, lixiviation et érosion.

Ainsi, bien que ces différentes vitesses soient liées de façon complexe ou indirecte, la vitesse d'apport organique peut être supérieure à la somme des différentes vitesses des mécanismes de destruction dont fait partie l'érosion, la vitesse de cette dernière restant cependant supérieure à celle de l'altération et des néosynthèses ferrallitiques. Accumulation humifère et rajeunissement sont ainsi compatibles non seulement dans une morphologie héritant d'évolutions passées différentes mais même dans un stade d'équilibre actuel et stable.

2/ Un horizon caillouteux peut se former en place dans un profil tout en restant constamment enfoui sous un horizon fin de facture biologique.

Une couche de constituants grossiers se forme en effet lorsque le matériau originel libère, ou lorsque la pédogénèse fabrique en abondance, des corps solides relativement résistants à l'altération (quartz filonien, concrétions ferrugineuses, nodules carbonatés etc.) et que l'érosion superficielle est plus rapide que le morcellement et la dissolution de ces solides.

L'enfouissement de cet horizon grossier dépend, lui, des vitesses relatives de l'apport de terre fine remontée par les vers ou les termites d'une part et de l'entraînement de celle-ci par l'érosion superficielle d'autre part.

Or cette fourniture par les animaux peut être, et avoir été, plus rapide ou égale à l'enlèvement par l'érosion en nappe, celle-ci restant cependant plus rapide que l'amenuisement des cailloux mais moins toutefois que la libération des quartz filoniens par l'altération !

3 - STABILITE DE L'EQUILIBRE

Ce dernier exemple aide à comprendre que les différentes vitesses en jeu ne sont généralement pas constantes mais qu'elles varient à chaque instant comme les vitesses d'une réaction chimique réversible, même en l'absence de toute modification externe ; ainsi l'épaississement progressif de l'horizon grossier précédent gêne de plus en plus l'activité biologique. Le recouvrement de terre fine tendrait alors à diminuer d'épaisseur si l'affleurement des cailloux ne ralentissait à son tour l'érosion.

L'augmentation consécutive de l'infiltration accélère alors l'altération et le morcellement des cailloux. Par suite l'épaisseur de l'horizon caillouteux est limitée à deux à quatre décimètres environ.

Si les vitesses relatives des mécanismes créateurs et destructeurs de matière diagnostique influent sur l'épaisseur d'un horizon, l'action des vitesses absolues et la nature des processus en jeu se traduisent dans d'autres caractères pédologiques : par exemple deux horizons humifères de même épaisseur peuvent résulter de l'équilibre entre des vitesses d'apport et d'élimination de matière organique toutes deux très élevées dans le premier et toutes deux très faibles dans le second, leurs différences ayant présenté même signe et même valeur. Le premier cas pourrait caractériser la grande forêt équatoriale où l'apport annuel de litière atteint plusieurs tonnes à l'hectare mais où la minéralisation de l'humus et la lixiviation des acides fulviques sont également très rapides. Le second peut représenter un sol brunifié du Nord-Cameroun où l'apport organique est très faible mais où le stock organique est consolidé par la formation d'humates - ca stables.

Ces deux horizons A1 de même épaisseur diffèrent fondamentalement par les caractères de leur matière organique et les caractères morphologiques que celle-ci détermine (structure etc.). Et surtout la stabilité de leur équilibre actuel n'est pas du tout la même. Dans le premier cas le défrichement de la forêt supprimera brutalement l'apport organique sans pour autant diminuer la minéralisation du stock d'où une rupture d'équilibre catastrophique. Dans le second les modifications apportées par la mise en culture seront beaucoup plus lentes.

L'impact provoqué par les interventions humaines pourra donc être très différent selon la nature de l'équilibre et surtout la stabilité de celui-ci. L'instabilité peut avoir deux causes, les grandes vitesses des mécanismes comme dans l'exemple précédent ou un changement entre les conditions passées et actuelles devant normalement amener une transformation irréversible mais qui n'a pas encore été déclenchée.

Par exemple la protection exercée autrefois par une végétation forestière dans l'Adamaoua a permis un épaississement considérable du solum rouge et meuble de sols ferrallitiques climatiques. La disparition de cette forêt (par intervention humaine ou par un changement climatique) a rendu cette couverture argileuse très vulnérable à l'incision linéaire. La rupture de cet équilibre précaire est maintenant provoquée par un simple tassement superficiel dû au piétinement des troupeaux : l'imperméabilisation de la surface du sol qui en a résulté a déclenché une importante érosion en ravines et lavaka par l'eau refusée à l'infiltration, phénomène hors de proportion avec la cause excitatrice.

4 - VITESSES DES DIFFERENTS PROCESSUS

Les vitesses des différents mécanismes pédologiques sont rarement mesurées ou estimées avec certitude et précision. Ont pu être déterminées les vitesses d'apport de litière sous forêt tempérée et sous forêt équatoriale, de lessivage des colloïdes et de lixiviation des cations dans quelques cases lysimétriques, de l'altération de certaines roches-mères, de l'érosion hydrique, du travail des vers de terre etc.

D'une manière générale les processus biologiques, et plus encore ceux qui résultent des interventions humaines paraissent agir beaucoup plus rapidement que les lents phénomènes physico-chimiques responsables de l'altération et des néosynthèses et qui déterminent les précédents. L'existence d'une couverture pédologique à la surface des terrains pas trop accidentés et pas trop abîmés par l'homme indique qu'un équilibre s'établit généralement entre la pédogénèse et l'érosion et que cette dernière est par conséquent relativement lente en conditions naturelles.

L'intense activité biologique, souvent observée, et due principalement aux vers, termites et fourmis, ne doit pas faire négliger, bien au contraire, les autres processus plus lents car seules les résultantes sont à considérer pour le développement du profil : les termites du sol peuvent déplacer de volumes considérables de terre fine sans contrarier le lent lessivage vertical de l'argile si leurs actions restent limitées latéralement à un horizon ou si leur résultante est nulle. Au contraire l'étalement des édifices épigés formés par les remontées profondes de certains termites peut compenser totalement le lessivage vertical de colloïdes, qui n'en existe pas moins et est responsable d'autres caractères pédologiques (séparations plasmiques).

QUATRIEME PARTIE

LA DIFFERENCIATION DES SOLS

L'étude géographique des sols indique qu'il existe à la surface de la terre des types de sols très différents par leur morphologie et leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les facteurs qui diversifient ainsi la pédogénèse d'un point à l'autre des paysages sont au nombre de 5.

1 - Le matériau : Le matériau à partir duquel se sont formés les constituants minéralogiques du sol/soit une formation géologique en place, appelée roche-mère, soit une formation superficielle d'origine géomorphologique (colluvions, alluvions) soit même parfois un ancien sol tronqué par l'érosion. En outre des poussières cosmiques ou éoliennes se déposent en surface du sol.

Le matériau influence la pédogénèse à la fois par ses propriétés chimiques et ses propriétés physiques. Les propriétés chimiques sont liées à la composition des minéraux altérables notamment les proportions relatives de cations. Les propriétés physiques à considérer sont la taille et l'abondance des grains résistants qui constitueront le squelette minéral du sol, la disposition des minéraux altérables, les possibilités de circulation des solutions (perméabilité) : si le matériau reçoit peu d'eau et que celle-ci circule lentement dans un milieu libérant beaucoup de cations on observe la néoformation d'argile à forte capacité d'échange (montmorillonite). Si elle reçoit au contraire beaucoup d'eau circulant plus facilement les solutions restent diluées et il se forme essentiellement de la kaolinite et de la gibbsite.

2 - Le climat qui préside à l'évolution du sol joue un rôle considérable et la carte mondiale des sols recouvre assez précisément la carte des climats. Sur des roches identiques mais sous climats différents on trouve des sols différents et il arrive que sous un même climat des roches différentes portent des sols assez comparables. Les facteurs climatiques à considérer sont la pluie et la chaleur. La température du sol et des solu-

tions qui percolent agit sur la vitesse des réactions chimiques et sur l'activité biologique. Elle conditionne en outre l'évaporation (soit directe soit par les plantes) et par conséquent diminue plus ou moins la quantité d'eau qui percole à travers le sol.

Cette quantité d'eau dépend de la pluviométrie annuelle mais surtout de la pluviosité ou répartition des pluies : les petites pluies espacées restent sans effet parce qu'aussitôt évaporées ; lors des fortes averses il peut y avoir refus à l'infiltration et une partie de l'apport pluvial est perdu par ruissellement. Le ruissellement et les circulations internes d'eau font que la quantité d'eau qui percole effectivement à travers un horizon de sol peut être très différente d'un point à l'autre de la séquence.

Comme par ailleurs le sol amortit les écarts thermiques de l'atmosphère et que sa conductivité thermique dépend de la nature et de l'organisation de ses constituants le climat propre du sol ou pédo-climat peut être fort différent de celui de l'atmosphère. Il importe de caractériser l'un et l'autre.

3 - Le temps

- On entend par là deux notions assez différentes :
- C'est d'abord la durée d'évolution ou âge du sol : au cours des années qui suivent la mise à l'affleurement d'un nouveau matériau le sol se différencie progressivement en passant successivement par des stades de jeunesse, maturité et vieillesse. Cette évolution se produit même en l'absence de modification des facteurs externes et certains caractères du sol, observables dans son état actuel, peuvent être hérités de ces stades antérieurs et être ainsi juxtaposés à des caractères "actifs".
- C'est aussi le passé ou l'histoire antérieure du paysage pédologique (modélé et sols) qui se traduit non pas seulement par des héritages inertes mais en conditionnant activement l'action présente des facteurs pédogénétiques, à partir de leur action passée : ainsi le climat récent Z aura des effets différents selon que la succession des climats antérieurs X et Y aura été X puis Y ou Y puis X.

Les trois facteurs, roche-mère, climat et durée sont en effet indépendants dans leurs causes mais leurs actions s'ajoutent pour rendre complexe la répartition actuelle et la différenciation des types de sol : le climat a pu changer plusieurs fois perturbant ainsi l'évolution du sol dans le temps - Le matériau du sol peut être "rajeuni" par érosion ou apport provoqués par des changements climatiques ou de niveau de base etc.

- Deux autres facteurs de différenciation des sols, la topographie et la biologie sont dépendants des trois précédents et interdépendants.

4 - La topographie : On constate que le sol est généralement différent en haut et en bas des versants ou selon l'exposition de ceux-ci, leur forme, leur longueur etc. Ces données influent effectivement sur le pédo-climat et sur la nature et l'intensité de l'érosion superficielle et des mouvements internes causés par la pesanteur (creep). L'observation des photographies aériennes au stéréoscope sert au pédologue à distinguer différentes caractéristiques du relief qui peuvent être en relation avec une différenciation du sol. Sur le terrain le microrelief (petites ondulations ou irrégularités de la surface du terrain) est un élément important du diagnostic aboutissant à la classification du sol.

Il ne faut pas perdre de vue que le modelé des paysages est lui-même partiellement conditionné par l'évolution du sol sous l'influence des cinq facteurs précédents. Sauf dans les régions tectoniquement actives il existe donc une harmonie entre le modelé et le sol que l'on exprime par la notion de paysage pédologique.

5 - La biologie : La végétation, la faune, les micro-organismes et dans une moindre mesure l'activité humaine sont des facteurs pédologiques qui à la fois dépendent des précédents et orientent à leur façon la pédogénèse.

Les plantes modifient le pédo-climat, remontent des éléments chimiques et fournissent la plus grande partie de la matière organique fraîche. Chaque espèce crée donc dans la tranche de sol qu'elle prospecte un type de sol légèrement différent. La diffé-

renciation peut devenir très importante pour certaines plantes introduites, les conifères dans une forêt de feuillus par exemple. En conditions naturelles on observe une certaine association de plantes caractéristiques du sol et de son stade d'évolution. La végétation sert donc également au diagnostic pédologique.

La faune du sol est également déterminée par les autres facteurs, climat, roche-mère, topographie, végétation, et la durée d'évolution (colonisations successives par des espèces différentes). A son tour elle influe sur les caractères du sol : par exemple les vers de terre entravent par leurs rejets de surface l'érosion des secteurs presque horizontaux, l'accélèrent au contraire sur les fortes pentes, favorisent l'humification en mélangeant les débris végétaux à la terre, modifient la porosité, le profil hydrique etc. Les termitières épigées supportent certaines espèces végétales et détruisent les autres, fournissent en s'étalant de la terre argileuse aux horizons superficiels, participent au cycle des éléments chimiques etc.

Les micro-organismes interviennent dans de nombreux cycles d'éléments chimiques, azote, carbone, fer, soufre. Ce sont essentiellement des transformateurs des substances chimiques. On appelle leur étude la microbiologie du sol.

L'homme enfin est un puissant agent pédogénétique qui détruit ou modifie la végétation naturelle, bouleverse par le feu, le pâturage ou les techniques culturales les premiers horizons du sol. Ce faisant il modifie le ruissellement, l'évaporation et l'infiltration de l'eau, accélérant ainsi ou réduisant l'érosion, l'entraînement des substances dissoutes ou en suspension, changeant l'apport de matière organique fraîche et son humification etc.

Inversement les propriétés originelles du sol influent sur le type d'intervention anthropique qu'il subit : pâturage, type et méthode de culture etc.

CINQUIEME PARTIE

LA CLASSIFICATION DES SOLS UTILISEE AU CAMEROUN

V.1. PRINCIPE.

Les sols forment, à la surface des continents, un véritable **continuum** dont les variations sont généralement progressives et où toute coupure présente un caractère plus ou moins arbitraire.

La classification française, qui est actuellement utilisée au Cameroun, est basée sur la notion d'orthotype ou de profil-type qui nécessite un découpage du volume sol couvrant chaque interfluve en volumes élémentaires présentant de faibles variations par rapport aux profils-types ou à leurs intergrades.

C'est donc une classification des profils mais dont l'ambition est morphogénétique c'est-à-dire qu'elle veut classer les facteurs de genèse des sols à travers leur expression morphologique. Les caractères morphologiques pris en considération doivent donc traduire de manière effective et harmonieuse les processus évolutifs. Les critères fondamentaux qui ont été retenus sont :

1/ le développement du profil, dans la mesure où il traduit le degré d'évolution du sol, ce qui amène à distinguer quatre grands types :

profil (A) C : sols minéraux bruts

profil A C : sols peu différenciés

profil A(B)C : sols à horizon B structural ou
d'argilisation

profil A B C : sols à horizon B d'illuviation.

Nota : 1/ Un horizon (A) est un horizon supérieur qui ne diffère de la roche-mère que par une simple désagrégation mécanique.

2/ Un horizon (B) ou B "structural" diffère de la roche-mère par un degré d'altération plus fort et de l'horizon A par une structure différente.

- 2/ le mode d'altération des minéraux primaires et la nature des minéraux néoformés qui renseignent sur les conditions physico-chimiques induites par le climat qui a présidé à la formation du sol.

Les sols des climats équatoriaux présentent en particulier une altération extrêmement poussée de presque tous les minéraux primaires, une libération importante de sesquioxides et une néoformation massive de kaolinite et souvent de gibbsite (hydroxyde d'aluminium). Cette dernière apparaît lorsque le drainage est intense et continu tandis que la néoformation de la kaolinite s'effectue par combinaison des ions SiO_2 et Al_2O_3 là où le drainage est défectueux.

- 3/ La nature et la répartition de la matière organique qui différencient les profils par les vitesses relatives de minéralisation et d'humification et en provoquant la migration des colloïdes minéraux avec lesquels ils forment des complexes plus ou moins stables.

- 4/ L'intervention prédominante de processus particuliers comme l'hydromorphie et l'halomorphie lorsqu'ils déterminent entièrement le mode d'évolution du sol.

- 5/ Les caractéristiques de la roche-mère lorsque celles-ci sont tellement particulières qu'elles influencent de manière évidente et accentuée les propriétés du sol. C'est le cas des sols calci-magnésiques et des vertisols. La classification américaine met à part en outre les "Psamment" qui comprennent tous les sols sableux plus ou moins évolués.

La classification française des sols combine et hiérarchise ces critères fondamentaux à travers leur expression morphologique dans des unités majeures qui sont :

CLASSE-SOUS-CLASSE-GROUPE-SOUS GROUPE

Le découpage et l'organisation du phénomène-sol qu'elle donne s'arrête à un niveau de généralisation assez élevé mais elle propose ensuite, pour la compréhension de tous les sols reconnus du globe, un cadre d'unités mineures, d'expression libre, qui sont :

la famille la série le type la phase

Entre les unités majeures et mineures la notion de faciès permet en outre de signaler une particularité génétique qui n'est pas nommément exprimée dans la classification actuelle.

Du fait de son ambition génétique cette classification est sujette à des fluctuations et à des révisions périodiques. L'exploration de nouveaux paysages amène en outre la découverte de nouveaux types de sols. Celle qui sera exposée a été proposée en 1967 par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols avec la collaboration de l'ORSTOM pour les sols des pays tropicaux. Cette classification est actuellement en cours de révision.

Pour pouvoir rendre compte de certains aspects de la distribution des sols, les unités simples précédentes doivent être complétées par des unités complexes qui sont utilisées en cartographie pédologique lorsque l'échelle utilisée ne permet pas de faire apparaître à sa place chacune des unités simples ou pour indiquer les liens génétiques existant entre des sols très différents. Ce sont les

juxtapositions de sols-Séquences de sols-Chaînes de sols.

Cette classification des profils (unités simples) complétée par celle des paysages pédologiques (unités complexes) permet à la systématique (science des classifications des formes vivantes) des sols de résoudre son double problème :

- Grouper les grands types de sols mondiaux en fonction de leur génèse, de leurs propriétés fondamentales, c'est-à-dire servir de cadre à la science pédologique.
- Former un outil commode pour la cartographie à grande échelle, et donc utilisable à des fins pratiques.

Les critères qui sont pris en considération pour chacune des unités taxonomiques précédentes sont :

CLASSE. Ce sont les cinq critères fondamentaux précédemment indiqués qui servent à la distinction des unités majeures du sommet de la pyramide. Il est distingué douze classes :

- I Classe des sols minéraux bruts
- II Classe des sols peu évolués
- III Classe des vertisols
- IV Classe des andosols
- V Classe des sols calci-magnésiques
- VI Classe des sols isohumiques
- VII Classe des sols brunifiés
- VIII Classe des sols podzolisés
- IX Classe des sols à sesquioxides
- X Classe des sols ferrallitiques
- XI Classe des sols hydromorphes
- XII Classe des sols sodiques.

Les classes largement représentées au Cameroun sont les classes I, II, III, IV, VII, IX, X, XI, XII.

Les sols minéraux bruts ont un profil (A)C ou R. Ils ne contiennent que des traces de matière organique, l'altération chimique y est insensible, on y observe seulement une désagrégation et une fragmentation mécaniques de la matière minérale. Ils s'observent au Cameroun sur des matériaux récemment apportés ou mis à nu (blanc alluvial, dalle rocheuse) ou bien constamment rajeunis par l'érosion (certaines fortes pentes, ravines d'érosion, etc).

- les sols peu évolués ont un profil A C et donc un horizon humifère distinct mais l'altération chimique y est encore peu poussée, seuls les sesquioxydes de fer peuvent y être faiblement individualisés et les cations y être déplacés. Cette faible différenciation est due ici non pas à des conditions climatiques défavorables mais, comme pour les sols minéraux bruts, à la jeunesse du matériau ou à son rajeunissement par l'érosion. Ils occupent de grandes superficies sur les modelés jeunes du Nord-Cameroun.

- les vertisols ont un profil A (B) C, l'absence de différenciation par la couleur et la texture provenant d'une homogénéisation par des mouvements internes (vertisols vient de vertere, tourner, mélanger) résultant de la néoformation massive d'argiles gonflantes de la famille des montmorillonites. Leur couleur foncée est due à la formation d'un complexe argilo-humique stable et non pas à de fortes proportions d'humus. Ils se différencient saisonnièrement par leur structure qui est large (prismatique puis plaquettes obliques) et leur très faible micro-porosité. Les mouvements internes qui les affectent provoquent souvent en outre la formation d'un micro-relief particulier "d'effondrements" appelé "relief gilgai".

Les vertisols sont abondants au Nord-Cameroun partout où la concentration en cations alcalino-terreux (Ca et Mg) est suffisante c'est-à-dire dans de nombreuses zones déprimées et sur les roches-mères basiques pas trop riches en fer.

- les andosols ont un profil A C ou A (B) C, leur originalité provenant essentiellement de l'abondance et de l'influence, dans leur fraction minérale, de produits amorphes particuliers, alumino-silicatés, les allophanes qui forment des complexes très stables avec la matière organique. La présence d'allophane est détectée par un test au fluorure de sodium. Elle se marque aussi par les caractères morphologiques et analytiques suivants :

- très faible densité apparente, inférieure à 0,9 due à une structure fine à très fine, grumelleuse, d'aspect "soufflé", sans cohésion inter-agrégats à l'état sec.

- Capacité très élevée pour l'eau, donnant un ~~toucher sa-~~vonneux et des propriétés thixotropiques, mais avec une déshydratation irréversible en dessous de pF 4.2
- une dispersion difficile qui nécessite l'emploi des ultrasons (l'hexamétaphosphate provoquant au contraire la floculation) et due à la grande stabilité du complexe argilo-humique.
- une forte capacité d'échange qui s'exerce également pour les anions.
- des andosols ont déjà été signalés dans la région du mont Cameroun sur les roches volcaniques riches en "verres".

Les sols calci-magnésiques ont un profil AC ou A (B) C et dérivent de roches carbonatées fournissant en abondance du calcaire actif et des ions alcalino-terreux. Ils diffèrent des vertisols, sols isohumiques et sols brunifiés, qui peuvent se former sur les mêmes matériaux, par leur structure grenue ou finement polyédrique, leur matière organique de type mull calcique à contact net entre les horizons A et (B). Leur complexe argilo-humique très stable à base d'argiles de type 2/1 est saturé à plus de 90 % en cations alcalino-terreux, le pH étant supérieur ou égal à 7 et le rapport C/N bas (8 à 12). Ces sols, dont les mieux typés sont les rendzines, évoluent, par décarbonation progressive des horizons supérieurs, vers les sols bruns.

Quelques rares sols du Nord-Cameroun pourraient être rapprochés de cette classe dans une "unité d'apparentement".

- Les sols isohumiques présentent une répartition caractéristique de la matière organique qui est progressivement décroissante dans le profil et plus élevée que dans les autres sols de la région. Elle est très humifiée et polymérisée avec dominance d'acides humiques gris. Le complexe absorbant est saturé en (B) principalement par le calcium. Leur profil est de type A (B) C et parfois A B C, rarement de type AC, leur

structure est grenue, grumeleuse ou polyédrique subangulaire en A, polyédrique ou prismatique dans les horizons profonds qui comportent souvent en outre un horizon de pseudo-gley, ou une croûte carbonatée ou gypseuse. Ils se forment sous des latitudes plus élevées que le Cameroun, à végétation graminéenne annuelle de type steppe.

- Les sols brunifiés ont un profil A(B)C ou ABC avec un humus à forte activité biologique de type mull. L'horizon textural ou structural conserve une couleur brune parce que le fer, libéré par l'altération en quantité limitée, reste lié au complexe argilo-humique. Le lessivage du fer et de l'argile ne s'y manifeste pas nettement. La structure est bien développée polyédrique subangulaire assez fine et elle englobe généralement de nombreux minéraux ou fragments de roche. Ils se forment sous des climats variés, boréaux, tempérés et tropicaux (où on les appelle SOLS BRUNS EUTROPHES TROPICAUX.) Ce sont en fait des sols de transition entre les sols peu évolués et certaines classes de sols évolués notamment ici les vertisols, sols fersiallitiques et les sols ferrallitiques. On les rencontre en différents points du Cameroun, en particulier sur les roches basiques du volcanisme récent de l'Adamaoua et de l'Ouest.

- Les sols podzolisés sont formés sous l'influence d'un humus très acide de type mor libérant de grandes quantités d'acides fulviques qui dégradent les minéraux silicatés comme les argiles et forment des complexes avec le fer et l'aluminium, ce qui provoque la migration per descensum de ces éléments. Leur profil est fortement différencié du type Ao, A1, A2, Bh, Bfe, C. Ils se forment habituellement sous climat frais et humide sur des roches siliceuses pauvres en cations mais ils ont été signalés localement en côte d'Ivoire sur des sables quaternaires à nappe phréatique mobile.

- Les sols à sesquioxides de fer et de manganèse ont un profil A B C ou A(B)C, les horizons B étant vivement colorés par individualisation des sesquioxides qui peuvent s'y trouver

sous forme figurée dans des concrétions, carapace ou cuirasse. Lorsque les conditions de la pédogénèse favorisent la séparation des sesquioxydes d'avec les particules argileuses et leur migration on observe des sols plus ou moins différenciés par lessivage, qu'on appelle sols ferrugineux tropicaux. Ces sols sont largement répandus au Nord-Cameroun. Lorsque les sesquioxydes accompagnent au contraire l'argile (montmorillonite, illite et kaolinite) les sols sont très vivement colorés en rouge, leur complexe absorbant est presque saturé en cations échangeables et leur profil peu différencié. Ce sont les sols fersiallitiques auxquels on rattache les sols rouges tropicaux du Nord-Cameroun formés sur des matériaux à la fois riches en cations et en fer.

- Les sols ferrallitiques sont caractérisés par une altération complète des minéraux primaires altérables et une néosynthèse massive de kaolinite, gibbsite, goethite, hématite et dans certains cas de produits amorphes. L'horizon B est épais, vivement coloré en rouge ou jaune, sa structure est très fine ou vaguement exprimée, il présente une grande friabilité et une forte porosité. En dessous se développe un horizon Bfe plus souvent concrétionné que cimenté en cuirasse, ou un horizon bariolé susceptible de durcir à l'air. L'horizon C à architecture conservée est lui aussi très épais, friable et léger. L'ensemble du profil jusqu'à la roche-saine peut dépasser 20 m d'épaisseur. Le pH est acide, la capacité d'échange et le taux de saturation sont faibles.

Ces sols se développent actuellement dans les parties humides de la zone intertropicale, sur des matériaux quelconques et sous forêt dense ombrophile ou semi-décidue. Ces sols doivent leur épaissement considérable à la rapidité de l'altération par des eaux tièdes et abondantes et à la protection qu'assure la couverture forestière contre l'érosion. Ils sont de ce fait généralement polygéniques et ils incorporent notamment dans un horizon caillouteux ou une stone line des constituants grossiers hérités d'anciens épisodes de pédogénèse ou de morphogénèse.

Ils occupent la plus grande partie du Cameroun méridional, central et occidental.

- Les sols hydromorphes présentent tous les caractères d'une évolution dominée par l'effet d'un excès d'eau, temporaire ou permanent, dans tout ou partie du profil. Cet engorgement provient soit de l'existence d'une nappe phréatique peu profonde soit d'une longue stagnation des eaux pluviales ou d'inondation. Selon les conditions d'oxydo-réduction cette hydromorphie se traduit soit par une accumulation de matière organique de type tourbeux ou anmoor, soit par la formation d'un horizon de gley ou de pseudo-gley.

Un gley (noté G) est un horizon d'engorgement prolongé où les phénomènes de réduction l'emportant sur les phénomènes d'oxydation le fer est réduit à l'état ferreux qui confère à l'horizon une teinte grise à verdâtre ou bleutée de chroma égal ou inférieur à 2 (Code Munsell).

Un pseudo-gley (noté g) est un horizon à engorgement périodique où se produit une alternance de réduction et d'oxydation avec redistribution du fer. Il présente donc une juxtaposition de plages ou bandes rouille et grises.

Ces sols se forment sous tous les climats dans les zones humides et mal drainées. Ils sont donc largement représentés au Cameroun où on les rencontre non seulement dans les secteurs déprimés (vallées, cuvettes) où ils passent aux vertisols et sol sodiques lorsque la concentration en ions Ca et Na s'élève, mais aussi dans certains milieux "ouverts" (Sud de la chaîne de Poli) dont les sols présentent un horizon imperméable argilisé.

Les sols sodiques ont une évolution dominée soit par une teneur élevée en sels solubles (chlorures, sulfates et bicarbonates de sodium ou de magnésium) soit par une teneur élevée en sodium échangeable fixé sur le complexe absorbant, ces substances modifiant fortement la structure et la végétation. Le sodium en excès provient soit d'une nappe phréatique salée soit d'une

roche-mère particulièrement sodique ou dont l'évacuation de l'ion Na^+ est mal assurée. Certains des sols appelés hardés dans le Nord-Cameroun (naga au Tchad) ont des caractères de sols sodiques. Ils sont rares au Sud de la Benoué, l'augmentation de la pluviométrie assurant une meilleure évacuation du sodium, cation monovalent.

SOUS-CLASSE. Au niveau de la sous-classe la classification fait généralement intervenir des critères mis en relation avec le pédo-climat actuel au sens large : humidité, température, concentration de solutions du sol en certains ions, conditions d'oxydo-réduction.

Par exemple les vertisols sont répartis en deux sous-classes, l'une à drainage externe nul ou réduit (par drainage externe on entend les possibilités d'écoulement de l'eau à la surface du sol donc à la fois par ruissellement et par drainage interne per descensum) où les néosynthèses d'argiles gonflantes proviennent de la concentration cumulée d'ions Ca^{++} et Mg^{++} rassemblés dans une dépression réalisant ainsi un milieu confiné favorable; l'autre à drainage externe possible où le confinement nécessaire provient de la richesse de la roche-mère en cations alcalino-terreux.

- De même dans les sols ferrallitiques, largement étalés en latitude, des différences sensibles de pH, somme des cations et taux de saturation paraissent en relation avec l'intensité du drainage et par conséquent des variétés de climat et de pédo-climat d'où la distinction de trois sous-classes : sols fortement, moyennement et faiblement désaturés en B

GROUPES.

Les groupes sont définis par des caractères morphologiques traduisant soit une différence d'intensité du processus fondamental soit l'intervention d'un processus particulier. Ce processus secondaire peut correspondre ou non au concept central d'une autre classe ou même constituer une variante du processus fondamental.

- Les sols ferrugineux tropicaux dont le processus fondamental est le lessivage du fer et de l'argile comprennent ainsi trois groupes :

peu lessivé (faible intensité du processus)

lessivé (concept central)

appauvri (entraînement non suivi d'accumulation)

- De même les sous-classes des sols ferrallitiques comprennent les groupes :

typique (concept central bien exprimé et sans intervention des processus particuliers suivants).

humifère (accumulation de matière organique bien évoluée en liaison avec un pédo-climat plus froid d'altitude)

remanié (réorganisation de la partie supérieure du profil par des processus biologiques ou géomorphologiques mettant souvent en place un horizon grossier ou une stone line)

rajeuni (troncature du profil par une accélération de l'érosion en nappe ou apport de matériaux contenant des minéraux altérables)

induré (cimentation ou durcissement des horizons inférieurs enrichis en fer)

appauvri (enlèvement de l'argile de l'horizon A sans accumulation corrélative en B)

lessivé (déplacement de l'argile de A en B)

- De même dans la sous-classe des sols hydromorphes minéraux on distingue les groupes suivants :

à gley

à pseudo-gley

à stagno-gley (gley surmontant un pseudo-gley)

à amphi-gley (pseudo-gley surmontant un gley)

à accumulation du fer en cuirasse

à redistribution du calcaire ou du gypse

SOUS-GROUPES. Les sous-groupes expriment soit une variation d'intensité du processus caractérisant le groupe soit l'intervention d'un processus secondaire qui marque ses caractères propres dans la morphologie.

Par exemple dans les sols ferrallitiques le groupe remanié comprend, entre autres, les sous-groupes :

modal (concept central équivalent de typique)

rajeuni

induré

hydromorphe

- Dans les sols ferrugineux le groupe lessivé comprend les sous-groupes :

modal

à concrétions

induré

à pseudo-gley

remanié en A

unités mineures :

la famille : à l'intérieur d'un même sous-groupe toutes les séries formées à partir du même matériau pétrographique constituent une famille. On l'exprime à l'aide de caractères minéralogiques et architecturaux importants du matériau plutôt que par le nom géologique de la roche-mère : arène grossière quartzo-feldspathique plutôt que granite.

la série est une notion très importante empruntée à la classification américaine. C'est l'ensemble des sols qui présentent sur un matériau originel donné et dans des positions comparables dans le paysage le même type de profil. Elle est dénommée d'après le lieu où elle a été caractérisée. Sa définition devrait en théorie s'appuyer sur des critères d'homogénéité statistique.

le type - à l'intérieur d'une série les sols ayant la même texture de l'horizon superficiel appartiennent au même type.

ex. : type argilo-limoneux de la série X

la phase - on exprime au niveau de la phase des modifications temporaires causées aux horizons supérieurs par des actions naturelles (érosion, colluvionnement) ou anthropiques (mises en culture).

V.2. APERCU SUR LES AUTRES CLASSIFICATIONS.

1/ Classifications anciennes.

Certaines classifications admettent que le climat est le facteur décisif de l'évolution des sols. Ce sont les classifications climatiques. Dokuchaev distinguait ainsi à la fin du siècle dernier les sols :

azonaux - sols peu évolués à caractères voisins de ceux de la roche-mère.

zonaux - sols évolués, relativement indépendants de la roche-mère, mais dépendant étroitement du climat et de la végétation.

intrazonaux - sols évolués mais ayant subi une évolution différente de celle qui caractérise l'ensemble de la zone climatique où ils sont observés par suite de certaines particularités physiques ou chimiques de la station.

Par exemple les sols ferrallitiques et les sols à sesquioxides sont des sols zonaux, les sols hydromorphes et halomorphes des sols intrazonaux. Pour définir convenablement un climat dans un but pédologique il convient de comparer chaque mois la pluviosité et l'évapotranspiration potentielle.

D'autres classification s'appuient sur les propriétés chimiques du sol comme la nature du complexe absorbant. Ce sont les classifications chimiques. D'autres enfin combinent les facteurs climatiques et chimiques.

2/ Les classifications récentes.

Les classifications récentes ont une base génétique mais elles utilisent au niveau supérieur (classe ou ordre) non pas les facteurs extérieurs d'évolution, ni même les processus évolutifs qu'ils déterminent mais les caractères pédologiques qui traduisent l'intervention de ces processus.

Classification américaine

La classification américaine est particulièrement importante. Elle a été élaborée par approximations successives dont la septième, révisée elle-même en 1967 est la plus récente. Les sols y sont classés et groupés d'après un ensemble de caractères mesurables, morphologiques et physico-chimiques traduisant leur parenté génétique, c'est-à-dire l'état de leur équilibre actuel avec le milieu. Des horizons de diagnostic servent à la caractérisation et au classement des profils. Ce sont les horizons A de surface appelés épipédon : par exemple l'épipédon mollique est un horizon humifère d'épaisseur supérieure à 10 cm., de couleur foncée, de structure grumelleuse aérée et dont le taux de saturation en cations bivalents est supérieur à 50 % et le rapport C/N inférieur à 17. Il correspond sensiblement à notre définition du mull calcique.

Les autres épipédons sont appelés umbriques (mor, moder, anmoor acides et épais) ochrique (mull ou moder peu épais) histique (tourbe) anthropique (Ap) et leur définition est tout aussi précise.

Les principaux horizons de diagnostic de profondeur sont :

Horizons d'argilisation

Cambique horizon (B) des pays tempérés : enrichi en Fe_2O_3 libre qui lui donne une couleur brune ou ocre; structure polyédrique ou prismatique sans enrobements argileux.

oxique horizon (B) des climats chauds et humides : très enrichi en Fe_2O_3 et Al_2O_3 libres, très pauvre en minéraux altérables, de structure massive ou polyédrique sans enrobements argileux. L'argile caractéristique est la kaolinite.

horizons d'accumulation

natrique : horizon B colonnaire, à enrobements amorphes noirâtres, formé par accumulation d'argile et d'humus sodiques.

argillique horizon B polyédrique à enrobements brillants d'argile ferrugineuse orientée (clay-skin) résultant du lessivage d'argile et de fer en milieu peu acide et biologiquement actif.

spodique : horizons Bh ou Bfe résultant du lessivage de complexes organo-métalliques (fer et aluminium) dans les podzols notamment. S'il durcit par cristallisation du fer on l'appelle alios.

agrique horizon B compact, enrichi en argile et en humus, situé sous un horizon travaillé.

horizons de diagnostic secondaires. Retenons les horizons :

calcique (enrichi en carbonate de calcium)

gypsique (enrichi en sulfate de calcium)

salique (enrichi en chlorure de sodium)

albique (A₂ blanc, cendreaux des podzols et des planosols)

duripan (durci non calcaire)

fragipan (tassé, souvent hydromorphe).

Nomenclature.

La classification américaine utilise au niveau le plus élevé (ordre) la présence ou l'absence des différents horizons de diagnostic précédents.

Les dix ordres fondamentaux sont :

1 entisols (ent) sols très peu évolués, dépourvus d'horizon de diagnostic

2 vertisols (ert) sols à argiles gonflantes

3 inceptisols (ept) sols peu évolués ou en voie d'évolution

4 aridisols (id) sols de climat aride

5 mollisols (ol) sols à épipédon mollique

6 spodosols (od) sols à horizon spodique

- 7 alfisols (alf) sols à horizon argillique et à altération réduite
- 8 ultisols (ult) sols à horizon argillique et à altération poussée
- 9 oxisols (ox) sols à horizon oxique
- 10 histosols (hist) sols hydromorphes organiques

Les sous-ordres sont basés soit sur la présence d'autres horizons de diagnostic soit sur le pédo-climat et en particulier l'hydromorphie, soit sur des caractères particuliers de roche-mère. On les exprime sous forme d'un préfixe (aqu = hydromorphe, ust : de climat chaud, ud de climat humide, Alt de climat froid, xer de climat sec) suivi du suffixe indiquant l'ordre. Par exemple un ustalf indique un alfisol de climat chaud.

Les groupes sont déterminés par la présence d'horizon de diagnostic secondaire et exprimés par un nouveau préfixe. Par exemple un fragudalf est un udalf à fragipan. Les sous-groupes sont exprimés par un adjectif bâti sur les préfixes précédents : udique = de climat humide, aquique = hydromorphe. Enfin orthique signifie typique.

Classification de la F.A.O. Cette classification a été proposée en 1968 pour établir une carte des sols du monde. Elle a cherché un dénominateur commun à toutes les classifications, qui s'est révélé être le groupe et a établi une clef de détermination pour les 79 groupes actuellement reconnus.

V.3. LECTURE DES CARTES ET RAPPORTS PEDOLOGIQUES.

Les différentes échelles.

Les cartes à petite échelle (1/10 000 000 à 1/250 000) ont pour objet de montrer l'influence, sur la pédogenèse, des grands facteurs fondamentaux du milieu. Une carte des sols du monde

au 1/5 000 000 est en cours d'élaboration. Il existe pour le Cameroun une carte au 1/1 000 000 déjà ancienne et peu précise sauf pour l'Ouest et le Nord. Ces cartes de synthèse ne peuvent être utilisées pour les projets de mise en valeur des terres. Il en est de même des cartes de reconnaissance au 1/200 000 qui peuvent toutefois permettre d'orienter le choix de secteurs propices à des cartographies à plus grande échelle et dans un but déterminé.

Les cartes à moyenne échelle (1/200 000 à 1/50 000) sont aussi des cartes de synthèse qui permettent un premier inventaire des sols jusqu'aux sous-groupes et parfois jusqu'aux séries. L'organisation des sols dans la nature est généralement si fine que ces cartes comportent une part importante d'unités complexes, juxtapositions, séquences et chaînes de sols et que les unités simples peuvent comporter jusqu'à 30 % "d'impuretés" (autres sols que celui qui est indiqué). On conçoit donc que ces cartes ne peuvent servir directement à un projet de mise en valeur mais indiquent les principaux types de sols d'une région et leur organisation habituelle dans le paysage.

Les cartes à grande échelle (1/25 000 à 1/2 000) renseignent d'une manière précise sur la distribution locale des différents types de sols et fournissent une analyse encore plus poussée de leurs caractères. Nécessaires aux agronomes qui participent aux projets de mise en valeur, elles leur servent à placer les points d'essai de fertilité pour chaque culture envisagée et à chiffrer et situer les superficies disponibles.

Légende et notice.

Les cartes sont accompagnées d'une légende succincte, imprimée sur le même support, qui explicite d'abord la signification des unités simples, à l'aide des normes essentielles de la classification, puis décrit, sous le nom d'associations, les différentes unités complexes rencontrées.

Une notice explicative ou un rapport pédologique est enfin joint au document cartographique. Cette notice détaillée indique d'abord les principales caractéristiques, géographique, climatique, géologique, hydrographique, hypsométrique, morphologique, végétale et humaine de la région (facteurs du milieu) puis donne la description précise et les caractères chimiques, physiques, hydriques et biologiques de tous les types de sols rencontrés, que ceux-ci figurent en unités simples, en unités complexes ou même occupent des superficies trop réduites ou trop morcelées pour avoir pu être représentés. Elle doit fournir aussi la constitution des unités complexes, indiquer les lois de répartition des sols qui ont pu être dégagées et toutes les corrélations intéressantes avec les facteurs du milieu.

L'établissement d'une carte pédologique nécessite la possession de bons documents topographiques et géologiques à même échelle et des photographies aériennes verticales, panchromatiques ou (et) infra-rouges pour l'étude stéréoscopique (photo-interprétation pédologique).

L'exposé des sols se fait soit en fournissant les descriptions et caractères analytiques des orthotypes et en indiquant leur intervalle de variabilité soit en indiquant le profil moyen synthétique. Les unités complexes sont présentées sous forme de séquences représentatives ou de paysages pédologiques qui sont soit des successions réelles effectivement rencontrées et dont on indique les variantes possibles soit une représentation schématique.

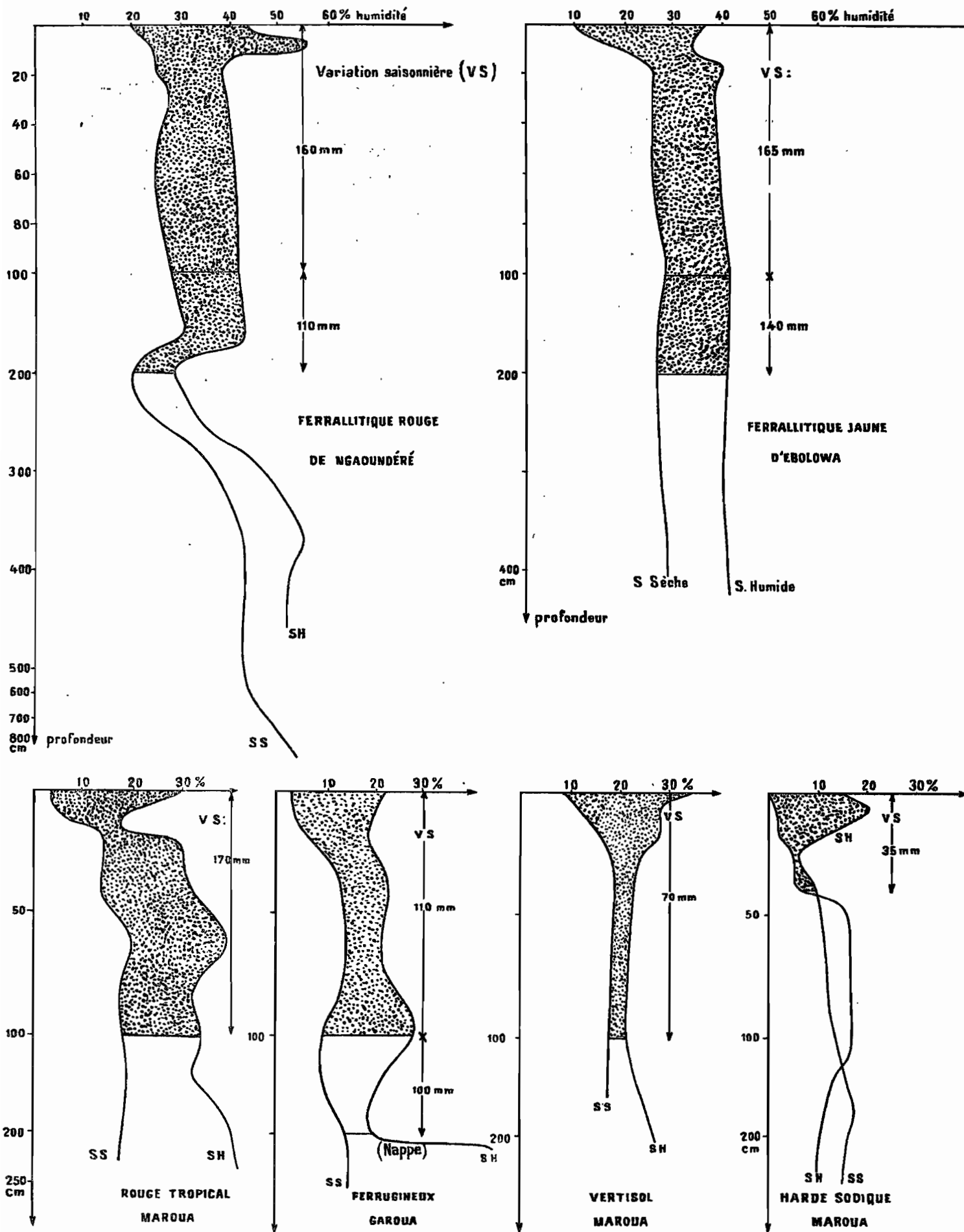
Les fluctuations de la classification, du vocabulaire descriptif, des schémas génétiques d'une part et l'affinement de l'observation morphologique d'autre part rendent parfois délicates à comparer des études anciennes et récentes. Les descriptions de profils constituent alors les données de référence.

Les cartes à grande échelle sont généralement accompagnées de cartes d'aptitudes culturelles ou cartes de vocation des sols ou land utilisation maps. En principe l'étude pédologique seule est insuffisante pour déterminer quelles sont les cultures à faire sur

un sol donné : elle peut seulement indiquer les facteurs favorables ou défavorables à un type de culture (sarclée, arbustive, submergée) en renseignant sur l'épaisseur utile du sol, son profil hydrique saisonnier, ses caractéristiques chimiques, physiques et biologiques. Un sol donné n'a pas en effet une vocation déterminée, il peut convenir à différentes cultures à condition d'effectuer telle ou telle correction et le choix d'une culture fait intervenir des aspects techniques, écologiques, économiques, biologiques (adaptation des variétés) et politiques qui ne sont pas du ressort du pédologue. La formation agronomique de plusieurs d'entre eux et les demandes des bénéficiaires les amènent parfois à orienter ces choix.

Figure 2

HUMIDITÉ VOLUMIQUE EN SAISONS SÈCHE ET HUMIDE



SIXIEME PARTIE

LES PRINCIPAUX SOLS CAMEROUNAIS

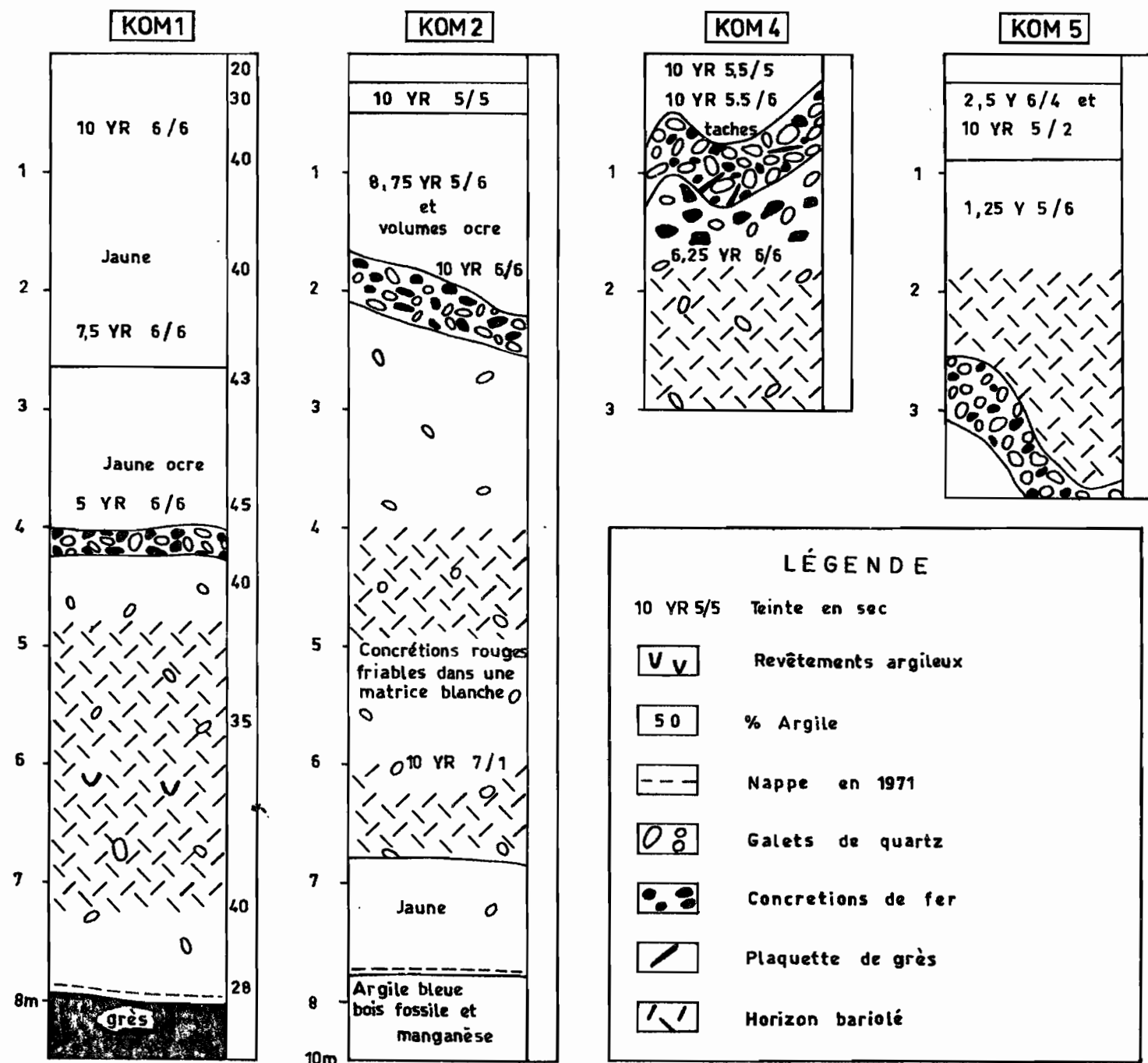
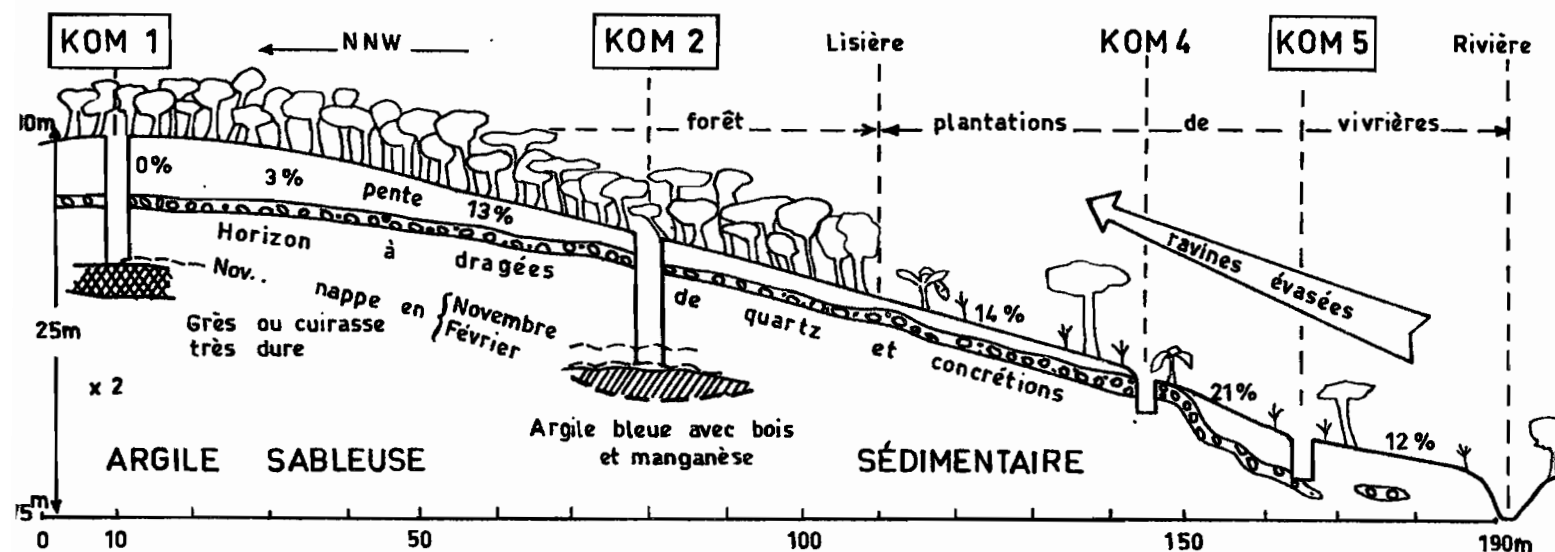
1/ LE DOMAINE FORESTIER EQUATORIAL

2/ LES SOLS DES REGIONS VOLCANIQUES ET MONTAGNEUSES

3/ LES SOLS DU NORD-CAMEROUN

TOPOSÉQUENCE FERRALLITIQUE JAUNE DE KOMPINA

Figure 3



LÉGENDE

10 YR 5/5 Teinte en sec



Revêtements argileux



% Argile



Nappe en 1971



Galets de quartz



Concretions de fer



Plaque de grès



Horizon bariolé

CHAPITRE VI 1

LE DOMAINE FORESTIER EQUATORIAL

On y rencontre quelques sols azonaux (minéraux bruts et peu évolués) sur les fortes pentes des massifs ou des inselbergs, des sols intrazonaux (hydromorphes) dans tous les bas-fonds et vallées mais surtout un grand type de sol zonal, le sol ferrallitique qui couvre l'ensemble des interfluves soit près des 9/10^è de la superficie.

Ces sols ferrallitiques rouges, jaunes et bruns qui constituaient naguère une troisième sous-classe des "sols à sesquioxides" ont été récemment élevés au rang de classe pour mieux rendre compte de leur originalité et de leur vaste extension.

SOLS PEU EVOLUES :

Les dalles rocheuses nues des fortes pentes sont classées en sols minéraux bruts d'origine non climatique d'érosion lithiques (régosolique indiquerait que la roche est meuble et pénétrable en tous points par les racines). Sur les montagnes la roche porte, de place en place, un horizon humifère, épais de quelques centimètres tout au plus, armé par un feutrage de radicelles. Par exemple sur le mont Minloa dominant le barrage de la Mefou cet horizon contient 10 à 20 % de matière organique à rapport C/N de 7 à 13, 10 à 20 % d'argile, 5 mé de cations saturant à 20 % une capacité d'échange de 20 à 30 mé/100 g. Le pH est voisin de 5, les réserves en cations totaux et en fer total sont bonnes. Le tapis herbacé comporte souvent des genres connus dans les marécages, la roche dure jouant malgré la pente le rôle de couche imperméable. Ces sols sont classés sols peu évolués d'origine non climatique, d'érosion, lithiques. Ils ont aussi des caractères des rankers, sols peu évolués humifères de climat humide et frais.

Il existe aussi des sols peu évolués d'érosion (régosolique) qui résultent de l'érosion de sols ferrallitiques jusqu'à l'horizon BC, Bfe ou C. On les rencontre sur les fortes pentes des talwegs.

SOLS HYDROMORPHES. Ces sols ont été peu étudiés au Sud-Cameroun à cause de leur faible utilisation actuelle (raphiales, exceptionnellement riziculture) et de leur approche difficile en toutes saisons: le profil est en effet presque constamment engorgé sauf sur quelques décimètres en saison sèche.

Des sols hydromorphes organiques ont été signalés dans le lit majeur du haut Nyong entre Ayos et Abong-Mbang. Vers Ayos le profil est exondé en saison sèche, situé sous végétation herbacée et formé d'alluvions argileuses grises surmontées d'un horizon argilo-organique acide de 30 cm d'épaisseur, contenant environ 17 % de matière organique à rapport C/N de 17. Il est pauvre en cations mais présente une forte capacité d'échange (donc de fixation d'engrais minéraux) et pourrait être, après neutralisation à la chaux, incorporé utilement à l'horizon supérieur des sols de plantation pour en améliorer la fertilité. En amont d'Atok on observe le passage à une tourbe, sous forêt marécageuse, continuellement inondée. L'horizon organique (qui surmonte la même argile grise) est formé alors de matière végétale mal décomposée accumulée sur 1 à 3 m d'épaisseur et qui constitue 50 % du poids. Son pH est acide et le rapport C/N élevé (40). Elle pourrait être aussi incorporée au sol ou utilisée comme paillage.

Des sols hydromorphes moyennement organiques et des sols hydromorphes minéraux occupent les petites et moyennes vallées. Les premiers sont des sols humiques à gley à anmoor acide les seconds des sols à gley d'ensemble. Ils sont finement associés et ne diffèrent d'ailleurs que par leur horizon supérieur, qui repose sur un horizon de gley gris à blanc de texture variable. L'anmoor des sols humiques à gley est épais de 15 à 20 cm, sa teneur en matière organique de 6 à 18 % à rapport C/N de 10 à 13, sa capacité d'échange est de 10 à 30 mé/100 g et saturée à 20 % environ. Le pH est acide (4 à 5,5) mais on ne connaît pas ses variations saisonnières. L'horizon humifère des sols hydromorphes minéraux à gley d'ensemble est peu humifère (2 à 4 % à C/N de 8 à 13) assez bien structuré et épais de 10 cm environ.

Les sols humiques à anmoor conviennent à la riziculture avec contrôle du plan d'eau mais non les sols minéraux auxquels ils sont trop finement associés pour pouvoir envisager de grands aménagements.

Il existe aussi des sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley (à taches ou même concrétionnés) sur les différentes terrasses de la Sanaga.

Le matériau de ces sols hydromorphes de bas-fond est fréquemment quartzeux, sableux ou graveleux, et il s'observe jusque dans les "têtes de talweg". Dans ce dernier cas au moins il n'est pas d'origine alluviale mais constitue un résidu de démolition des sols ferrallitiques d'interfluve dans un milieu réducteur (disparition des concrétions ferrugineuses) qui assure en outre une élimination partielle des colloïdes (nappe affleurante). Dans les vallées plus importantes et notamment près des massifs (barrage de la Méfou) on a au contraire la preuve d'un remblaiement important (plusieurs mètres ou décamètres). Il est donc difficile de faire la part des processus pédologiques et paléogéographiques dans l'élaboration du modelé actuellement observé : fond plat engorgé bordé de fortes pentes plan-convexes.

LES SOLS FERRALLITIQUES

Les sols ferrallitiques du Sud-Cameroun sont développés sur des roches diverses, granites, gneiss, schistes, micaschistes, amphibolites, argiles sédimentaires des bassins côtiers etc. Ils comportent de haut en bas les 6 "groupes d'horizons" ou horizons majeurs suivants, dont la succession n'est pas immuable, dont certains peuvent faire défaut et qui sont difficiles à cadrer dans la nomenclature ABC par leurs seuls caractères macroscopiques :

1/ Les horizons supérieurs humifères et plus ou moins appauvris en argile et en sesquioxydes par rapport aux horizons sous-jacents. Ils présentent généralement de haut en bas : une litière de branchages, brindilles et feuilles entières (Aoo) puis mor-

celées A₀) puis un feutrage (ou lakis) racinaire, puis un horizon brun organo-minéral (A₁) de quelques centimètres : la liaison des matières organique et minérale est en général bonne sur les sols rouges, parfois mauvaise sur les sols jaunes (Douala, Eséka). Un piquetage blanc de sables grossiers quartzeux lavés y constitue l'expression la plus accentuée d'un appauvrissement en colloïdes. En dessous apparaît un horizon de pénétration humique apparente noté A₃, de couleur terne parfois fortement structurée (Ebolowa, Mbalmayo). Des plages de décoloration à ce niveau y seraient la marque d'un processus de dégradation apparentée à la podzolisation (Gabon). Du Sud (forêt) au Nord (savane) cet horizon est progressivement remplacé par un horizon de compacité ("ventre" de densité apparente) peu épais, de structure massive ou mal exprimée cohérente.

2/ L'horizon de couleur vive, homogène et argileux (kaolinite goethite, parfois gibbsite) sous-jacent est habituellement épais, (plusieurs mètres), poreux (50 à 60 % de porosité totale, 1,2 à 1,4 de densité apparente) friable (structure extrêmement fine et bien développée en pseudo-sables dans les sols rouges, massive ou vaguement polyédrique et de faible cohésion dans les sols jaunes), et le siège d'une forte activité termitique partiellement cause de l'homogénéisation de sa matière. Cet horizon est noté (B), plus rarement Bt lorsqu'il porte la marque d'une illuviation d'argiles (revêtements). Lorsqu'il est jaune des taches rouges peuvent marquer sa partie inférieure.

3/ Les horizons grossiers comportent des cailloux plus ou moins jointifs emballés dans une matrice colorée et argileuse qui diffère progressivement de la matière de l'horizon précédent. Ces horizons grossiers sont parfois annoncés, à la base de l'horizon précédent par une concentration de très petites concrétions "en plomb de chasse" (rondes et à patine noire). La limite supérieure est brutale mais ondulée. On y distingue souvent de haut en bas : un horizon graveleux (stone line, nappe de gravats, lits de cailloux) dont les constituants grossiers sont des morceaux de quartz, de roches résistantes, de cuirasse et des concrétions ferrugineuses. Un horizon concrétionné formé de

concrétions "vraies", sesquioxydiques (et kaolinitiques) de formes arrondies, denses et à cortex souvent différencié (cuticule et patine). Un horizon de fragments de roche ferruginisés formé de morceaux de roche, en toutes dispositions, durcis par les sesquioxydes mais à architecture reconnaissable (gneiss, grès, micaschiste). La matrice terreuse qui emballe ces constituants grossiers est généralement moins homogène et moins argileuse que ci-dessus.

Ces horizons enrichis en sesquioxydes de fer (relativement à l'horizon homogène) sont habituellement notés Bfe ou Bs.

4/ L'horizon induré est un horizon cimenté par les sesquioxydes de fer (c'est donc lui aussi un horizon Bfe) qui remplace ou fait suite aux horizons concrétionnés. Il apparaît pour des teneurs en sesquioxydes très variées et présente une grande hétérogénéité de couleur (violet, rouge, ocre, jaune, blanc) de texture et structure (lacunes, poches terreuses, volumes à pâte dense, réseau de canaux à dominante verticale, nombreux revêtements arçileux) de dureté (carapace ou carasse). Cette hétérogénéité dans la nature et la répartition de la matière solide contraste avec l'homogénéité de l'horizon coloré (B). Elle indique des phénomènes complexes de redistribution des sesquioxydes et de l'argile. Son étude permet parfois d'appréhender la génèse (cimentation secondaire d'un horizon concrétionné, durcissement d'un horizon tacheté) et l'évolution actuelle (dissolution ou enrichissement en fer) de cet horizon. Des données micromorphologiques (lames minces) et minéralogiques fines sont alors nécessaires.

5/ L'horizon bariolé (ou argile tachetée) présente un réseau caractéristique sub-vertical de canaux jaunâtres qui sillonnent en s'anastomosant une masse argileuse rouge qui peut même se réduire en volumes isolés faiblement indurés. Cette organisation réticulée est strictement pédologique (circulation per descensum des solutions du sol utilisant parfois d'anciens tracés de racines ou de termites et déplaçant des argiles et du fer), sans aucune adaptation à celle du

matériau originel. Cet horizon paraît pouvoir évoluer de façons variées : horizon concrétionné par induration et redistribution des volumes rouges en concrétions, horizon induré, horizon de pseudo-gley ou de gley. Il est quelquefois appelé plinthite et noté Bv. Rarement continu il passe brusquement sur le coté à un horizon structuré de profondeur rappelant l'horizon (B).

6/ L'horizon d'altération conserve un agencement plus ou moins proche de celui de la roche, il n'acquiert pas en effet d'organisation structurale de type pédologique telle que les agrégats, concrétions, larges marbrures des horizons précédents. Il est très allégé par rapport à la roche-mère de densité : 2,5 à 2,8, du fait de grandes pertes de substances par dissolution et dégradation des réseaux cristallins et très friable, soit que l'architecture apparente de la roche soit conservée mais les minéraux très finement fragmentés et transformés, soit qu'elle ait été rompue par tassement et néosynthèse argileuse. Sa composition minéralogique varie avec le degré d'altération : à côté des espèces résistantes comme le quartz, disthène, rutilé, zircon on note soit des minéraux altérables peu altérés soit des "argiles" de néoformation : kaolinite, sesquioxides, gibbsite. On y observe parfois d'épais revêtements argileux (argillanes) localisés dans des cavités espacées.

Organisation dans le paysage.

D'une manière générale on observe plutôt les sols ferrallitiques à horizon homogène meuble (B) épais (et donc à horizon grossier profond) en sommet d'interfluve et les sols à horizon grossier proche de la surface sur les pentes des interfluves. Les sommets d'interfluve sont donc plus adaptés aux cultures à enracinement profond pour deux raisons : érosion faible et volume de sol disponible (rétention d'eau et de cations) plus grand. Les petits interfluves en "lanières" sont souvent cependant caillouteux sur toute leur surface. Enfin dans les vallées plus importantes le bas de toposéquence présente de nouveau une pente faible et des sols profonds (sols remaniés ?) qui passent aux sols hydromorphes de bas-fond. Les deux versants d'un talweg sont fréquemment dissymétriques.

La répartition des sols rouges et des sols jaunes est complexe : sous les climats plus longuement humides (à l'Ouest d'Eséka) les sols ferrallitiques sont jaunes (ou brun-jaune) du haut en bas des interfluves et sur toutes roches-mères (même très basiques et ferro-magnésiennes comme les amphibolites ou l'étindite). Ailleurs ils sont rouges sur la plus grande partie de l'interfluve lorsque celui-ci est bien drainé, un jaunissement apparaissant progressivement en bas de versant. Le climat paraît donc être un facteur à considérer, si toutefois le sens Est-Ouest d'augmentation de la pluviométrie ne s'est pas inversé au cours des différents épisodes paléo-climatiques (sols polygéniques).

En dehors de la province jaune les sols sur roches basiques et ferromagnésiennes (amphibolites, gabbros, micaschistes) sont plus rouges que les autres. La teneur de la roche en minéraux basiques et ferro-magnésiens ainsi que la nature et l'organisation de ceux-ci introduisent donc un second facteur à considérer le facteur roche-mère.

Enfin un jaunissement s'observe en bas de pente des toposéquences de sols rouges. Le pédo-climat plus humide qui y règne (nappe phréatique de bas fond, circulation interne oblique, apport d'eau ruisselée ou hypodermique du haut de pente, épaisseur des horizons argileux) paraît donc constituer un troisième facteur de différenciation.

Il semble bien qu'un horizon rouge puisse jaunir par péjoration du drainage interne mais on ignore si l'inverse est possible.

Dynamique saisonnière

La perméabilité de surface est très élevée sous forêt primaire mais les défrichements et mises en culture l'abaissent considérablement. Elle reste cependant alors suffisante, en conditions correctes d'exploitation, pour absorber la plupart des averses. Le ruissellement est donc faible et exceptionnel (sauf sur les pentes dénudées qui se ravinent). En sommet d'interfluve

l'horizon (B) argileux épais stocke ainsi l'apport de chaque saison pluvieuse puis perd lentement une partie de son humidité par infiltration profonde verticale ou oblique puis par évaporation en saison sèche. Il continue donc à alimenter les nappes et le réseau hydrographique en saison sèche. Le sol moins épais des pentes assure une alimentation rapide de ce réseau, ses capacités de stockage étant plus vite atteintes. Le bilan est une alimentation assez régulière du réseau hydrographique.

Les variations saisonnières d'humidité affectent plusieurs mètres de sol mais c'est seulement dans les deux mètres supérieurs que des tensions de confluent se manifestent expliquant peut-être la baisse de perméabilité qui s'observe entre 0,5 et 1,5 m de profondeur environ. Une redistribution des pores doit être envisagée car la porosité totale reste très forte à ce niveau.

Un écoulement latéral interne, en surface de l'horizon induré en cuirasse est possible mais n'a pas été nettement observé. Les réserves d'eau de la couverture pédologique des régions ferrallitisées pourraient être considérables : 3,5 m d'eau sont emmagasinés par exemple dans les 9 mètres supérieurs d'un sol rouge profond près de Mbandjok.

Caractéristiques physiques.

Si l'on excepte les andosols et certains sols bruns ce sont les sols ferrallitiques qui ont les plus faibles densités apparentes et donc les plus fortes porosités totales : 50 à 60 % dans l'horizon (B), plus encore dans les horizons A (sauf l'horizon de consistance). Structure très fine en pseudo-sables et activité biologique intense en sont les causes principales. La plus grande légèreté des sols rouges serait due à leur structure plus fine et à la présence de produits amorphes dans les pseudo-sables.

La perméabilité Müntz est sous forêt très élevée en surface (10 à 100 cm/h) puis elle diminue vers 1 cm/h de 50 à 150 cm de profondeur environ avant de remonter légèrement ensuite.

La perméabilité latérale n'est pas nettement supérieure à la perméabilité verticale, donc seul un engorgement par ralentissement du drainage vertical pourrait y produire un drainage latéral.

L'humidité volumique atteint 40 % sur plusieurs mètres d'épaisseur en fin de saison pluvieuse puis redescend vers 20 % en saison sèche. La variation du stock d'humidité des 5 premiers mètres du solum meuble peut dépasser 500 mm à chaque saison des pluies.

La texture de l'horizon coloré homogène est assez constante. La teneur en argile y est élevée, 50 à 60 % (exceptionnellement 80 % sur basalte) et elle y augmente légèrement de haut en bas. Dans l'horizon A₁ elle descend à 20-35 % dans les sols jaunes. Dans les sols rouges l'appauvrissement en argile est généralement moins marqué; par ailleurs la granulométrie réelle y est difficilement obtenue, les pseudo-sables résistant aux dispersants (nécessité de les écraser aux doigts sur le tamis).

Caractéristiques chimiques.

Les sols ferrallitiques du sud-Cameroun sont fortement désaturés en cations échangeables dans leur horizon (B), parfois moyennement désaturés dans le cas des sols rajeunis par érosion. Parmi les cations échangeables le sodium est pratiquement absent le potassium faible (0,1 mé); le calcium l'emporte nettement sur le magnésium sauf parfois dans les horizons profonds.

La teneur en matière organique de l'horizon A₁ est de 2 à 4 % avec un rapport C/N de 12 à 15.

Le pH est franchement acide (4 à 5,5) dans tout le profil. Il est souvent un peu plus élevé en surface, mais parfois aussi plus bas (Ebolowa, Nanga-Eboko, Bertoua etc).

Les réserves en cations totaux sont faibles en (B), 2 à 6 mé, plus rarement 10 mé. Les réserves en sodium et potassium sont très faibles. Ces sols sont par contre moyennement pourvus en phosphore total (10/100).

Variations régionales :

Dans la région entre Nanga-Eboko et Bertoua les sols ferrallitiques, qui sont rouges, sont très souvent indurés en cuirasse mais le niveau cuirassé est généralement profond et n'entrave pas trop les cultures. Dans le bassin sédimentaire de Douala (sols jaunes) l'appauvrissement en argile de l'horizon A₁ est important, la liaison des matières organique et minérale y est mauvaise. On observe parfois en profondeur un horizon grossier formé de dragées quartzeuses.

Dans la région d'Edéa (surface morphologique plus récente ?) et d'Eséka les sols (jaunes) sont peu épais (2 m environ pour l'horizon (B) en sommet d'interfluve) et peu concrétionnés.

Les sols sur schistes de Mbalmayo (jaunes) sont tachés à la base de l'horizon (B) et hydromorphes en profondeur.

Aptitudes culturales

Généralement épais, meubles et argileux les sols ferrallitiques constituent un excellent support pour les cultures tropicales auxquelles ils assurent une bonne alimentation en eau et en oxygène. Leur chimisme est par contre nettement déficient du fait de la localisation très superficielle des éléments nutritifs qui les rend particulièrement vulnérables au défrichement.

Les facteurs limitants y sont essentiellement climatiques, topographiques, chimiques et sanitaires :

- climatiques : l'ensoleillement peut, par exemple, être insuffisant : s'il est inférieur à 1 000 heures/an le palmier donne une huile trop acide. Les averses imprévisibles gênent l'exploitation des hévées etc.
- topographiques : les bas de versant présentent fréquemment de fortes pentes, souvent caillouteuses, de mise en valeur acrobatique et le franchissement des larges bas fonds marécageux renchérit les exploitations mécanisées

- chimiques : la capacité d'échange de l'argile kaolinique est faible et le taux de saturation est cependant bas, rendant difficile la nutrition des végétaux et la fixation des engrais. En fait le cycle des éléments nutritifs effleure à peine le sol, ceux qui sont libérés par la décomposition des matières végétales étant ré-empruntés au niveau de la litière elle-même.
- sanitaires: l'excès d'humidité favorise le développement de nombreux parasites et maladies cryptogamiques.

En définitive la répartition des sols est assez bien inscrite dans le modelé qui joue donc un rôle déterminant pour la mise en valeur. Après son examen détaillé sur photographies aériennes l'étude pédologique doit s'appliquer principalement à préciser l'épaisseur du sol meuble et la répartition d'éventuels affleurements de cailloux.

CHAPITRE VI 2

LES SOLS DES REGIONS VOLCANIQUES ET MONTAGNEUSES

Le Cameroun présente, sur la bordure nord et ouest du domaine ferrallitique équatorial étudié précédemment, des plateaux et massifs montagneux dont l'altitude dépasse fréquemment 1 000 m et où abondent les roches volcaniques, acides et basiques, d'âges variés, qui donnent des paysages pédologiques originaux.

Le baisse de température moyenne par rapport au domaine sud équatorial (22° 2 à Ngaoundéré, 20° 2 à Bafoussam contre 26° 4 à Douala et 23° 5 à Yaoundé) n'entrave pas l'altération ferrallitique qui marque encore l'ensemble du paysage.

Il semble même que le drainage ferrallitisant du sol soit particulièrement important dans les montagnes de l'ouest du fait d'une augmentation orographique de la pluviométrie (qui dépasse localement 3 000 mm !) et d'une évaporation moindre (régime thermique plus frais et moins contrasté). Mais le rajeunissement des pentes par l'érosion, la jeunesse de certains épanchements volcaniques, la dominante basaltique de ceux-ci et les caractères montagnards du climat ont deux effets importants sur les sols :

- les sols ferrallitiques diffèrent assez nettement de ceux du domaine sud équatorial par trois caractères principaux : le rajeunissement (morphologique et analytique) par érosion ou apport, l'accumulation humifère (au-dessus de 1 500 m d'altitude); et l'extension des sols rouges à pseudo-sables.
- d'autres types de pédogenèses apparaissent (andosols, sols brunifiés) dont le développement est plus récent que celui de la pédogénèse climacique ferrallitique dont ils représentent en fait des stades de jeunesse.

D'un autre point de vue, celui de l'utilisation des terres, la disparition de la forêt et le tassement superficiel imperméabilisant qui accompagne l'installation de la savane rendent ces sols de pente très sensibles à l'érosion que déclenchent et le parcours et le pâturage des troupeaux, attirés ici par des conditions

écologiques favorables : au rajeunissement lent et naturel des horizons supérieurs par érosion en nappe s'ajoute alors une érosion en ravines, d'origine anthropique et d'effet néfaste. L'ameublissement superficiel par les pratiques culturales (micro-relief) facilite au contraire l'infiltration des pluies, des aménagements anti-érosifs ne s'imposant alors que sur les pentes notables.

Par contre l'abondance de roches basiques (donc riches en réserves minérales cationiques) d'épanchement récent (donc non encore appauvries par l'altération ferrallitique) ou récemment décapées (rajeunissement profond) se traduit par l'existence de sols de grande valeur agronomique immédiate et qui font la richesse de ces régions (sols bruns entrophes).

LES SOLS FERRALLITIQUES

Nous ne nous étendrons pas sur les caractères minéralogiques de l'altération ferrallitique des régions volcaniques et d'altitude : elle ne se différencie pas fondamentalement de celles du domaine sud équatorial sur des roches-mères équivalentes. La morphologie du profil pédologique qui en dérive est par contre profondément modifiée. Cette constatation est intéressante car elle indique que des caractères importants de l'organisation morphologique du sol résultent non pas des conditions physico-chimiques d'altération, induites par le climat, mais de facteurs topographiques et biologiques ou d'actions pédogénétiques superficielles (accumulation humifère d'altitude par exemple).

1/ LE RAJEUNISSEMENT :

Alors que dans le sol ferrallitique des régions de modelé stable la fabrication de matière pédologique par le front d'altération possède une confortable avance sur la démolition des horizons par le front superficiel d'érosion, donnant ainsi des sols épais, à horizons uniformément développés et intensément évolués, donc en définitive assez monotones par estompage des caractères hérités de la roche-mère il en va tout différemment dans les régions "tectoniquement actives" comme celles qui nous intéressent ici :

Les dénivelés importantes entretenues par les forces, orogéniques, épirogéniques ou bien héritées de leurs actions récentes, accélèrent et pérennisent le lent processus normal d'entraînement superficiel de la matière du sol par l'érosion en nappe et le creep. La matière fine humifère ainsi mobilisée vient enrichir les piedmonts ou les vallées alluviales tandis qu'elle se régénère constamment sur les pentes d'ablation.

Le profil résultant est moins épais, à la fois par amincissement du solum (horizon A + B transformés par la pédogénèse) et par amincissement de l'altération (horizon C à architecture conservée). De plus, les secteurs plus résistants de la roche-mère se retrouvent en surface où leur altération se ralentit considérablement. Ainsi des cailloux libres (non enracinés) s'observent de place en place à l'affleurement et les irrégularités du front d'altération perturbent aussi l'organisation des horizons du solum : on n'a plus de limites d'horizons régulières, ou régulièrement festonnées, à peu près parallèles à la surface du sol mais de profondes et irrégulières invaginations des limites d'horizons qui rendent bien difficile et le choix des profils-types et leur description suivant le paramètre profondeur. L'absence de pentes modérées concaves de bas de versant limite par ailleurs considérablement le développement des accumulations ferrugineuses (favorisées, sinon, sous les climats plus contrastés de la frange nord du domaine ferrallitique). Le sol de sommet d'interfluve est ainsi généralement plus épais que celui des pentes mais il ne s'en distingue guère par l'apparition d'horizons particuliers.

L'horizon homogène des sols ferrallitiques s'amincit considérablement, parfois même disparaît et les différenciations secondaires des horizons superficiels (appauvrissement, podzolisation) n'ont guère le temps de s'installer. La couleur rouge domine, les caractères hydromorphes sont généralement absents sur ces pentes bien drainées où ce pédoclimat plus humide favorable au jaunissement et à la marmorisation n'est plus réalisé. Les morceaux de roche feruginisés de forme irrégulière et emprisonnant quelques réserves minérales sont plus fréquentes que les vraies concrétions dures et arrondies à pâte argileuse et évoluée des sols mieux développés.

Le "rajeunissement morphologique" s'accompagne donc parfois d'un "rajeunissement chimique" c'est-à-dire que les teneurs en cations échangeables et totaux y sont plus élevées que dans les sols modaux (non rajeunis) placés à proximité, toutes choses égales par ailleurs. Le taux de saturation (V) plus élevé qui en résulte peut alors faire changer le sol ferrallitique de sous-classe, un sol moyennement désaturé rajeuni voisine alors avec un sol fortement désaturé modal.

Indépendamment ou non du rajeunissement précédent les sols de ces régions présentent en outre souvent à quelques décimètres de profondeur un horizon grossier caillouteux épais lui-même d'un ou deux décimètres et dont les constituants peuvent généralement provenir de la roche-mère sous-jacente ou de formations proches. Le processus de remaniement du solum (remanier c'est refaire un travail avec tout ou partie des matériaux primitifs), qui a été diversement imaginé par certains auteurs ces dernières années, s'exprimant très généralement dans leur schéma par la mise en place d'un tel horizon grossier les sols présentant ce caractère morphologique sont indistinctement placés dans un groupe ou sous-groupe (selon le développement du phénomène) remanié. En fait une telle disposition morphologique peut s'établir par le simple jeu de l'érosion et de l'activité biologique sans qu'il y ait eu à un moment donné bouleversement d'un arrangement initial différent. L'enlèvement des parties fines rapproche de la surface du sol les blocs résistant à l'altération, les remontées biologiques qui fournissent la matière fine aux agents érosifs maintenant concomitamment ces cailloux à faible profondeur. Mais une telle disposition qui traduit un équilibre dynamique entre les vitesses d'altération, d'érosion et d'activité biologique peut tout aussi bien résulter d'une rupture d'équilibre antérieure : à une phase d'érosion accélérée amenant les cailloux en surface du sol fait suite une phase actuelle de stabilité où les remontées biologiques enfouissent le "champ de cailloux" précédemment formé. Seule une étude (difficile) de dynamique actuelle des versants permettrait de trancher avec certitude et de trouver d'éventuels indices morphologiques permettant de choisir sur le terrain entre les deux possibilités.

Il importe de retenir qu'actuellement remaniement et présence d'un horizon grossier sont mis en correspondance, improprement dans certains cas, que le rajeunissement s'accompagne souvent mais non obligatoirement de la mise en place d'un horizon grossier et que ce dernier apparaît aussi dans des sols épais ne manifestant pas de rajeunissement chimique ou morphologique.

2/ L'ACCUMULATION HUMIFERE

Les sols des prairies et forêts d'altitude de l'ouest-Cameroun se différencient par la présence d'un horizon humifère plus développé attribué à la fraîcheur du climat pluvieux.

Par exemple, sur une pente trachytique de 40 % sous-forêt d'eucalyptus on observe successivement :

- un horizon A₀₀ de litière épais de 1 cm environ.
- un horizon A₁₁ de 5 cm léger (densité 0,6) de teinte foncée, 7.5 YR 3/2 par exemple, fortement structuré en polyèdres subangulaires moyens, friables, armés par un chevelu radicellaire qui entrave leur éboulement spontané.
- un horizon A₁₂ de 10 cm, nettement plus dense, de teinte foncée 5 YR 3/2, finement structuré en polyèdres et en grumeaux (origine faunique), meuble.
- un horizon A₁₃ de 20 cm, encore 5 YR 3/2, à structure très fine et peu nette.
- un horizon AB de 30 cm de teinte 5 YR 4/4, de structure polyédrique peu nette fine à moyenne, meuble et friable.
- puis l'on passe aux horizons B qui ne présentent pas de caractères originaux.

Bien que ces sols présentent une couleur plus foncée que les autres et cela sur une plus grande épaisseur on ne constate pas de proportionnalité entre l'assombrissement de la teinte et l'élévation du taux de matière organique. Cette matière organique est assez bien humifiée et paraît s'accumuler à cause d'un ralentissement de la vitesse de minéralisation liée aux températures plus basses qui règnent en altitude. Elle provient à la fois de matières végétales et de matières animales. On observe toujours malgré la pénétration humique profonde une limite nette à la base

de l'horizon humifère proprement dit (30 cm environ).

La classification française distingue ces sols au niveau du groupe (humifère) si la teneur en matière organique dépasse 7 % sur 20 cm ou atteint encore 1 % à un mètre de profondeur. Sinon elle les distingue au niveau d'un sous-groupe (humique).

Ces sols conviennent au théier, aux cultures maraîchères et à la production fourragère. Leur forte capacité d'échange due aux teneurs élevées en matière organique permet d'envisager des fertilisations minérales sans risque de lessivage mais la composition des engrais doit être soigneusement étudiée pour éviter les déséquilibres entre les cations et le phosphore.

Toutefois leur rétention d'eau est faible. La présence d'un horizon caillouteux (sols remaniés) à faible profondeur diminue leur valeur agronomique. Leur réaction est fortement acide (pH inférieur à 5) leur teneur en cations faible (2 mé) d'où des taux de saturation bas (10 %). Le rapport C/N est souvent élevé approchant 20. Leur analyse granulométrique est rendue difficile par les matières organiques et les pseudo-sables.

3/ LES SOLS ROUGES A PSEUDO-SABLES.

Les sols ferrallitiques rouges abondent dans l'ouest-Cameroun, sur le plateau de l'Adamaoua, dans l'est et le sud-est camerounais et même jusqu'à Yaoundé, donc en bordure du domaine des sols jaunes. Leur horizon homogène rouge parfois épais de plusieurs mètres présente une légèreté et une friabilité particulières qui sont dues à un type original de structuration fine (ou d'organisation élémentaire): la matière argileuse est agrégée en très petits agrégats de la taille des limons et des sables (pseudo-sables) qui adhèrent faiblement les uns aux autres et éclatent en agrégats plus fins sous la simple pression des doigts. La poudre obtenue après broyage est nettement plus jaune que la teinte initiale indiquant une différenciation superficielle de ces petits agrégats. Ceux-ci se détachent aisément à l'humectation mais résistent aux dispersants ce qui fausse l'analyse granulométrique, la teneur en argile étant fortement sous estimée. Ces pseudo-sables contiennent des formes amorphes du fer

qui pourraient jouer le rôle du liant. La structure fine de ces horizons a été qualifiée de farineuse ou de particulaire pour exprimer à la fois la faible cohésion des éléments structuraux et leur extrême finesse. L'appellation de pseudo-sables a le défaut de ne pas exprimer que ce sont des micro-agrégats fabriqués par la pédogénèse et non des constituants texturaux hérités du matériau originel. Cependant leur comportement dans la nature se rapproche de celui des sables vrais tant qu'ils restent dans des conditions oxydantes et de bon drainage : le réseau de talwegs est très peu dense comme sur une formation sableuse perméable et les pseudo-sables libérés à la surface du sol participent en tant que grains à la dynamique des versants.

Ces horizons rouges contiennent en outre des "noyaux argileux" ou "concrétions terreuses" dont la pâte est plus brune, plus serrée, plus cohérente et plus sèche que la matrice à pseudo-sables environnante. Leur origine (parfois termitique) n'est pas bien élucidée. Dans les sols remaniés ils forment même, exceptionnellement, l'équivalent d'une stone-line. Leur taille va de quelques millimètres à quelques centimètres, leur proportion augmente généralement vers le haut du profil où ils constituent par coalescence la matière de l'horizon de compacité observé vers 5-30 cm de profondeur. Cet horizon où augmentent la densité apparente la cohésion et la consistance est de mieux en mieux développé du sud au nord de l'Adamaoua.

A la très fine structuration en pseudo-sables se superpose souvent une sur-structure de type polyédrique moyenne ou grossière à laquelle participent ces noyaux argileux cohérents. Ces sols à la fois argileux et meubles sont fortement colonisés par les termites et minés par les oryctéropes, leurs prédateurs.

Ces sols rouges présentent de bonnes propriétés physiques et hydriques mais des qualités chimiques et biologiques médiocres du fait de leur pauvreté en cations et de la compétition des termites. Les taux de saturation sont encore abaissés par des capacités d'échange souvent relativement élevées. Au total ces sols très bien aérés, correctement hydratés en profondeur, faciles à travailler et aisément pénétrables aux racines et de bonne

capacité d'échange forment un support intéressant pour de nombreuses cultures, directement pour celles qui sont peu exigeantes en éléments minéraux, avec apport d'engrais pour les autres. Toutefois paillage et ombrage sont indiqués pour atténuer leur assèchement superficiel en saison sèche. Sensibles par ailleurs au tassement par le bétail et à la stérilisation par les feux ils se dégradent rapidement et deviennent la proie de l'érosion en ravines et en lavaka lorsqu'ils sont abandonnés sans contrôle au pâturage.

En fait leur sensibilité à l'érosion apparaît dès que la végétation forestière protectrice disparaît pour faire place à la savane, et l'action humaine (dans la mesure où elle est indépendante de la savanisation) ne fait qu'accélérer plus ou moins le processus normal de démolition de la couverture ferrallitique rouge qui est soit plaquée en bas - flanc des interfluves (colluvionnement) soit exportée au loin hors du paysage (alluvionnement).

LES SOLS BRUNS.

Les andosols n'ont été identifiés au Cameroun que très récemment et ils étaient auparavant le plus souvent confondus avec les sols brunifiés ou sols bruns eutrophes tropicaux.

Les sols bruns s'observent surtout sur les roches volcaniques basiques (basaltes) récemment épanchées ou décapées mais aussi sur les roches pas trop acides du socle. Ils représentent un stade d'évolution intermédiaire entre les sols peu évolués jeunes et les classes de sols évolués climaciques c'est-à-dire dans ce cas les sols ferrallitiques. Sur le plateau de l'Adamaoua ils garnissent les flancs et les coulées des appareils volcaniques récents, au sud-est et au nord-ouest de Ngaoundéré. Dans l'ouest on les rencontre sur les pentes du mont Cameroun, associés à des andosols, et en divers points des montagnes volcaniques de l'ouest. Ils sont formés de haut en bas :

- d'un horizon A1 épais d'une dizaine de centimètres, de couleur brune foncée, humifère (4 à 10 % de matière organique à rapport C/N de 11 à 15), de texture argilo-sableuse ou argilo-limoneuse avec des morceaux de roche en cours d'altération, de structure

grumeleuse ou polyédrique subangulaire fortement développée avec des agrégats stables et peu fragiles, de forte porosité d'interstices et d'enracinement fin et dense. Sa réaction est faiblement acide, sa teneur en cations échangeables et totaux est élevée ainsi que sa capacité d'échange (20 à 40 mé), le taux de saturation se situant de 80 à 50 % selon le degré d'évolution.

- d'un horizon (B) d'autant plus épais et mieux développé que le sol est plus évolué. Sa couleur est brune à brun-rouge (5 YR 3/4 par exemple) la texture de la matrice est argilo-sableuse et elle emballe des cailloux contenant des minéraux altérables. Sa structure est fortement à moyennement développée, de type grumelleux ou polyédrique plus ou moins subangulaire, sa porosité est élevée (densité apparente hors cailloux voisine de 1,0) et l'enracinement y est assez dense. Sa réaction est neutre à peu acide et son taux de saturation diminue de 70 à 40 % des sols bruns peu évolués aux sols bruns ferruginisés puis aux sols bruns mésotrophes intergrades vers les sols ferrallitiques. La teneur en matière organique y reste élevée, par exemple 3 % à 70 cm de profondeur ainsi donc que la capacité d'échange (20 à 30 mé). Ce type de sol est généralement bien pourvu en phosphore total.
- d'horizons BC et C caractérisés par des poches, joints ou bancs terreux dont la composition rappelle celle des horizons B et des volumes de roche irrégulièrement altérés et donc plus ou moins friables.

Ces sols présentent des propriétés physiques et hydriques excellentes surtout lorsqu'il existe une nappe d'eau à faible profondeur (pied-monts des appareils volcaniques récents bordant une vallée). De plus leurs qualités chimiques sont bonnes, tant par leurs fortes teneurs en cations échangeables et totaux que par leurs capacités d'échange élevées et leurs teneurs en phosphore et matière organique. Les sols trop caillouteux dont la matrice est par ailleurs peu argileuse sont par contre d'utilisation difficile.

Chapitre VI 3

LES SOLS DU NORD-CAMEROUN

I LES FACTEURS PEDOGENETIQUES

1/ GENERALITES.

Les sols du Nord-Cameroun présentent une grande diversité qui contraste avec l'uniformité du domaine ferrallitique : Sept classes de sols au moins y sont représentées et plusieurs d'entre elles sont fréquemment associées sur le même interfluve.

Ce sont : la classe I des sols minéraux bruts,
" II des sols peu évolués,
" III des vertisols,
" VII des sols brunifiés,
" IX des sols à sesquioxydes,
" XI des sols hydromorphes,
" XII des sols sodiques.

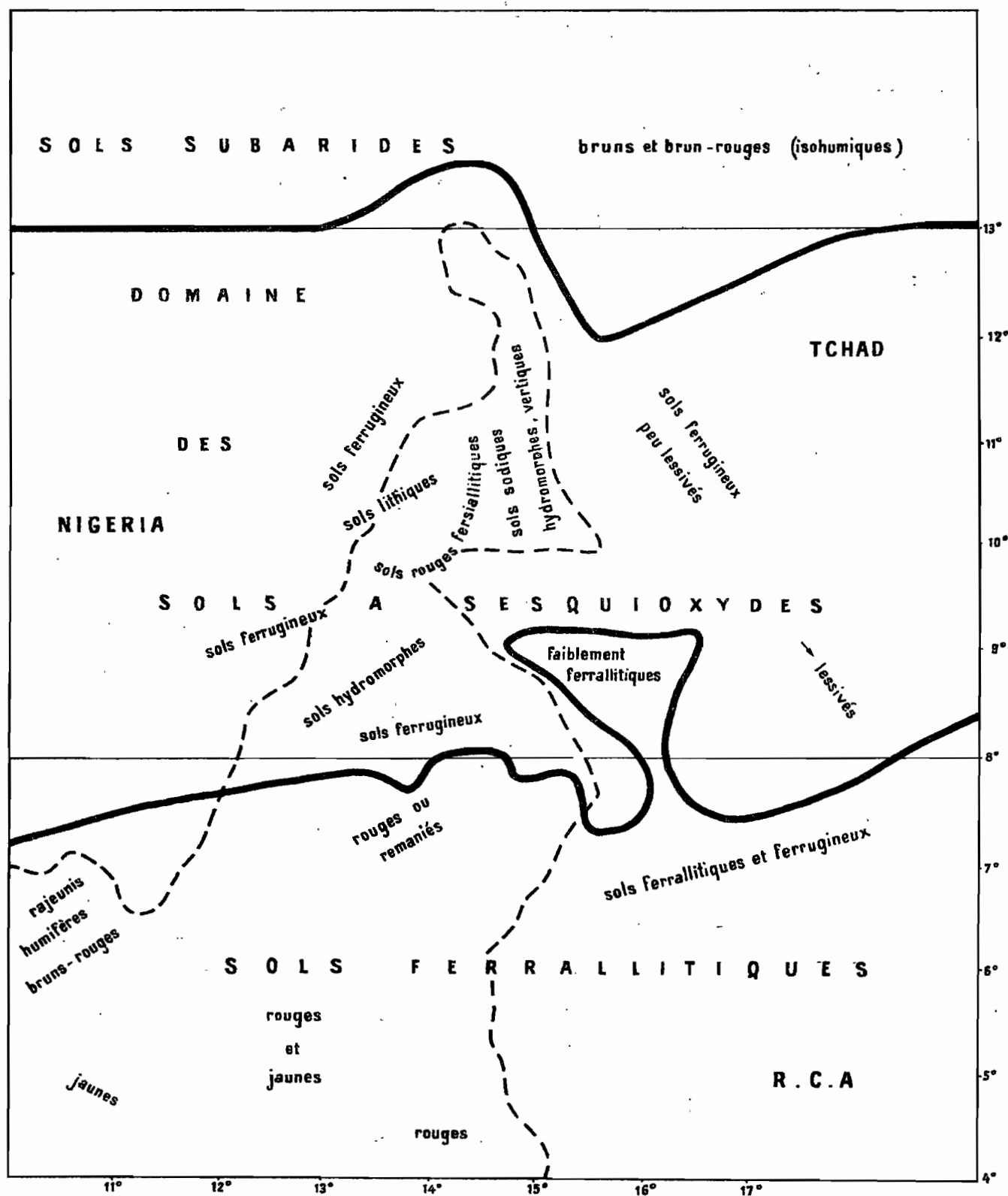
En outre quelques profils fortement carbonatés s'apparentent aux sols calci-magnésiques de la classe V. Et surtout on y rencontre de nombreux profils dans lesquels le lessivage (accompagné peut-être d'une dégradation) de l'argile présente une intensité exceptionnelle. Ces sols qui se rapprochent des alfisols de la classification américaine (luvisols de la classification F.A.O.) ont été appelés ici sols lessivés, sols à horizon blanchi, leur place dans la classification française n'étant pas encore définitivement fixée.

La classe des sols à sesquioxydes de fer y est représentée par deux pédogénèses assez différentes correspondant à ses deux sous-classes, celle des sols ferrugineux tropicaux sur les roches et matériaux acides (granites, grès, dunes, alluvions, etc.), celle des sols rouges tropicaux (sous-classe des sols fersiallitiques) sur les roches basiques riches en calcium et en fer (micaschistes, amphibolites, dolérites, certains gneiss et schistes, etc.).

Ces sols à sesquioxydes sont considérés comme les sols climaciques de ces régions soudano-sahéliennes mais ils sont loin d'y occuper le même pourcentage de la superficie que les sols ferrallitiques dans

Figure 4

LE NORD CAMEROUN ET LES GRANDES PÉDOGÉNÈSES CLIMACIQUES



leur domaine sud-camerounais. Il peut y avoir à cela deux raisons :

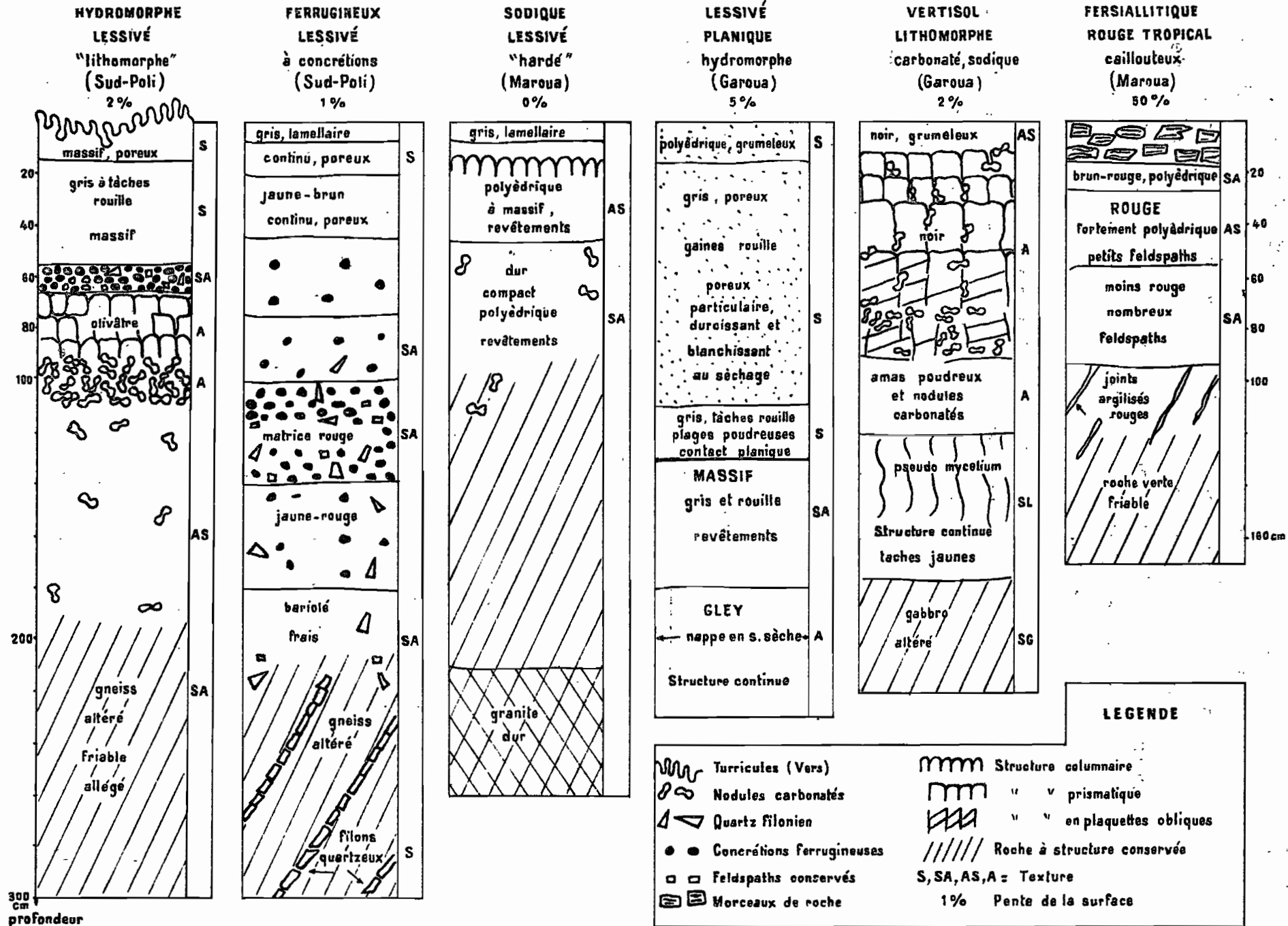
- 1/ de nombreux secteurs subissent, ou ont subi récemment, une érosion intense de sorte que leurs sols sont encore faiblement évolués : la région comprise entre la Benoué et les monts Mandara, par exemple, présente ainsi une mosaïque de **sols** "en début d'évolution" qui juxtapose ou superpose des évolutions pédogénétiques variées mais encore mal exprimées dans la morphologie.
- 2/ Ce type de pédogénèse induit une différenciation de bas de séquence dominée par l'illuviation et la néoformation d'argiles imperméabilisantes. Dans la portion concave du modelé qui résulte de cette différenciation pédologique apparaissent ainsi des types de sols considérés ailleurs comme intrazonaux mais qui sont en fait ici un élément normal du paysage pédologique.

Ces pédogénèses associées aux sols à sesquioxides c'est-à-dire essentiellement celles qui conduisent aux sols sodiques, aux sols hydromorphes et aux vertisols diffèrent d'ailleurs sensiblement du nord au sud du domaine nord-camerounais soit par leurs caractères soit par leur développement relatif. Il devient ainsi difficile de leur attribuer une signification intrazonale sauf dans certaines conditions de site ou de matériau amenant des concentrations spécifiques d'ions (bassin du Tchad, roche-mère sodique etc).

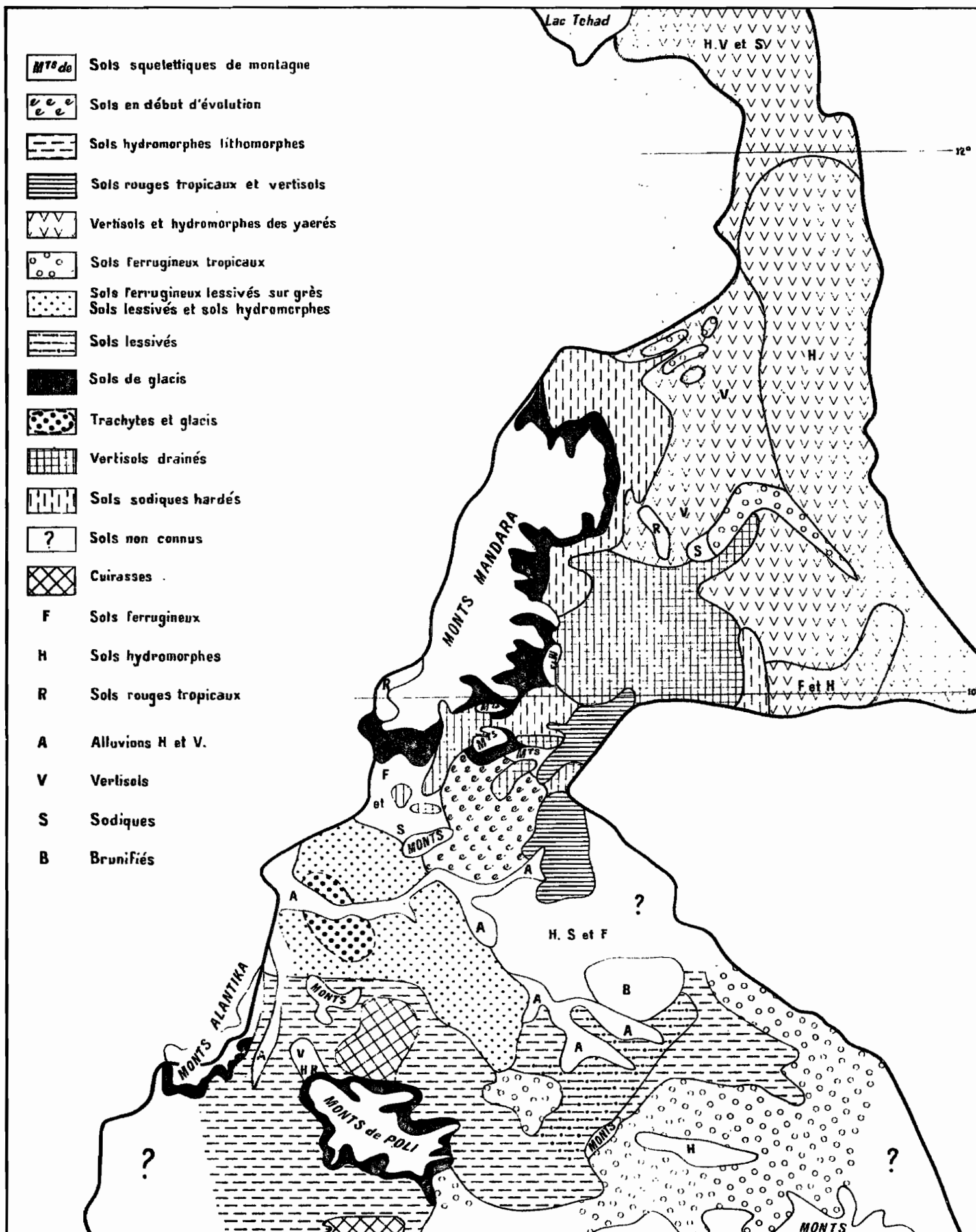
Ainsi l'étude des paysages pédologiques du Nord-Cameroun montre clairement l'importance des relations génétiques établies entre des types de profils très différents, et donc classés différemment au niveau des unités simples de notre classification. Il est donc absolument nécessaire d'accéder aux unités taxonomiques complexes, c'est-à-dire aux classifications de séquences, pour exprimer l'organisation et la génèse des paysages pédologiques.

2/ INFLUENCE DU MATERIAU ET DU MODELE.

L'influence de la roche-mère et de la topographie est particulièrement marquée dans les milieux "rajeunis" ou "confinés" qui favorisent l'apparition de nombreux sols azonaux (sols minéraux bruts et sols



SITUATION DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS



peu évolués d'érosion) ou intrazonaux stricts (vertisols, sols hydromorphes, sols sodiques) ou faiblement différenciés (sols en voie d'évolution).

Les matériaux acides, quartzeux ou quartzo-feldspathiques (granites alcalins, grès quartzeux ou peu arkosiques, dunes, alluvions ou colluvions sableuses) évoluent en sols ferrugineux lessivés s'ils sont en position de bon drainage, en sols hydromorphes lessivés s'ils sont saisonnièrement engorgés.

Le fer qui sert de révélateur à ces deux pédogénèses provient soit du sol lui-même (matériau originel) soit de la nappe phréatique, soit des terrains situés en amont, après ruissellement superficiel ou écoulement oblique interne. Sous ces climats contrastés les variations fréquentes de concentration des solutions, et les variations de potentiel redox qui les accompagnent, lui confèrent en effet une grande "labilité" à laquelle contribuent également les complexations par les acides organiques et le développement de bactéries ferrugineuses en surface du sol (enduits huileux de couleur rouille).

Le fer peut ainsi migrer indépendamment de l'argile et suivre une destinée différente : la capacité maximale de fixation du fer par la kaolinite, principale argile de ces sols, est estimée à 12 % environ, soit 5 % pour un sol contenant 40 % d'argile. Or la quantité totale de fer retenue dans les horizons B de ces sols est souvent inférieure bien qu'elle y apparaisse en partie sous forme "figurée" c'est-à-dire individualisée dans des concrétions ou dans une carapace de rupture de pente (horizon Bfe). Les horizons supérieurs de ces sols sont, eux, nettement lessivés en fer et en argile ce qui se traduit par une décoloration et une concentration du squelette quartzeux (horizons A2 ou E).

Enfin lorsque l'élimination du fer et de l'argile est presque totale on aboutit à des sols lessivés (sols à horizons blanchis, sols gris lessivés de bas-fond) où les deux pédogénèses précédentes ne peuvent plus, en l'absence de fer, s'imprimer ou s'exprimer nettement.

Le plus souvent le haut des versants est bien drainé, l'élimination des cations et le lessivage du fer et de l'argile peuvent s'y effectuer rapidement tandis que les bas-fonds et les bas de pente permettent plutôt une concentration des ions et des néoformations d'argile de type 2/1 (famille de la montmorillonite).

Les matériaux basiques mais aussi riches en fer (micaschistes, amphibolites, certains gneiss, roches volcaniques basiques) ou enrichis latéralement en fer (démantèlement de cuirasse, glacis d'épandage) évoluent, en position de drainage correct, en sols fersiallitiques où le fer reste fixé sur les argiles qu'il colore vivement en rouge (sols rouges tropicaux) et à qui il confère une structure fragmentaire nette. En milieu confiné réducteur (mauvais drainage interne ou externe) apparaissent des vertisols si le matériau est essentiellement calcique, des sols sodiques si la roche ou la nappe fournissent une quantité appréciable de sodium, des sols hydromorphes à gley dans des milieux plus équilibrés ou moins riches en cations. Les sols sodiques qui apparaissent sur certaines roches du socle, ou dans certaines formations alluviales, s'intercalent dans les séquences soit en position dominée par les sols ferrugineux tropicaux soit en position dominant les vertisols ou les sols hydromorphes.

Les matériaux argileux des grandes plaines d'épandage évoluent en sols hydromorphes à gley ou en vertisols ou en sols sodiques selon leur richesse en cations, la nature de ceux-ci, les néosynthèses qu'ils produisent et les modalités du confinement. Une nappe phréatique peu profonde y est un agent pédogénétique essentiel qui peut être à l'origine de fines différenciations latérales (d'échelle métrique par exemple). L'apparition de carbonates sous forme figurée (nodules) ou diffuse (pseudo-mycelium) en est une manifestation fréquente.

3/ INFLUENCE DE LA VEGETATION.

La juxtaposition de pédogénèses très variées et inégalement développées réalise des conditions hydriques, chimiques et physiques très différentes auxquelles la végétation doit s'adapter en diversifiant ses espèces et ses associations. La végétation accentue ainsi à son tour la différenciation pédologique. Mais ces relations sol-végétation

sont maintenant modifiées par les sélections opérées par l'homme et ses feux. Ce bouleversement d'origine anthropique ne permet guère d'identifier au Nord-Cameroun des paysages végétaux spécifiques (par leurs associations d'espèces ou la physionomie de celles-ci) de types de sols ou même de paysages pédologiques. Dans les régions moins profondément marquées par l'homme cette adaptation de la végétation au support sol semble commandée par les exigences d'alimentation en eau de chaque espèce et les possibilités offertes à cet égard par chaque élément de paysage. C'est pourquoi les associations sol-végétation parfois décrites n'ont qu'une signification très localisée. Néanmoins il a été fréquemment observé que :

- *Guiera senegalensis* s'installe sur les recouvrements sableux,
- le baobab et *Anogeissus leiocarpus* préfèrent les terrains présentant une couche argileuse à faible profondeur,
- *Terminalia macroptera* et les *Gardenia* prolifèrent sur les sols hydromorphes lourds ou durcis en bordure des sols à gley,
- *Acacia seyal* abonde sur les vertisols pas trop longtemps inondés,
- *Lannea humilis*, *Balanites aegyptiaca*, *Comiphora africana*, forment la végétation contractée des surfaces "hardé" à sol sec et durci,
- les *Boswellia* occupent les pentes rocailleuses à sols faiblement évolués ou dégradés,
- les sols hydromorphes à gley de surface n'ont pas de végétation arborée,
- les buttes cuirassées ou rocailleuses ont une belle végétation arborée (*Isoberlinia*, *Daniellia*),
- les très beaux peuplements de caillédérats bénéficient d'une nappe phréatique en profondeur.

En fait, comme l'indiquent ces exemples, les principaux caractères du sol ou du paysage pédologique qui commandent la répartition des espèces végétales sont :

- l'existence, la profondeur et les fluctuations saisonnières d'une nappe phréatique ou d'un niveau d'engorgement (nappe perchée),
- l'existence et la longueur d'une période d'inondation,
- le montant des réserves en eau du sol qui est fonction de l'é-

paisseur, de la texture et de la porosité de ses horizons ainsi que de son pédoclimat,

l'accessibilité de ces réserves à la prospection racinaire qui dépend des potentiels capillaires et de l'organisation texturale des horizons (horizon caillouteux, discontinuités, taille et cohésion des éléments structuraux etc).

La strate herbacée est, semble-t-il, plus dépendante des caractéristiques physiques des horizons supérieurs mais cette dépendance passe aussi par les conditions hydriques qu'elles y déterminent.

4/ INFLUENCE DU CLIMAT.

1/ La zonation climatique des sols.

Le "Nord-Cameroun" compris du piedmont de l'Adamaoua au lac Tchad, présente des différences climatiques importantes et l'on peut s'attendre à ce que ce "premier facteur de la pédogénèse" diversifie nettement l'évolution des sols. Effectivement le paysage pédologique, comme d'ailleurs le paysage végétal, se transforme nettement du domaine soudanien humide du sud au domaine sahélien du nord mais aucun type de sol climacique n'apparaît ou ne disparaît ici, c'est-à-dire du parallèle 8 au parallèle 13° : au sud la pédogénèse ferrallitique ne dépasse pas le pied de la falaise de l'Adamaoua, au nord les sols "isohumiques" bruns et bruns rouges sub-arides commencent au niveau du lac Tchad seulement. Les pédogénèses du type sub-aride et du type ferrallitique ne s'exercent donc pas actuellement dans l'intervalle considéré (voir carte ci-jointe), ce qui ne signifie pas qu'elles ne l'ont pas pénétré au cours du quaternaire.

Les sols à sesquioxydes subissent certaines variations du nord au sud de leur domaine nord-camerounais : c'est ainsi que les sols ferrugineux tropicaux sont, sur matériaux comparables, plus lessivés et plus désaturés au sud qu'au nord; les sols ferrallitiques rouges tropicaux apparaissent principalement entre le parallèle de Garoua et celui de Mora (9 à 11°) et on n'en rencontre plus que ^{de} très petits affleurements au sud jusqu'au voisinage du parallèle 8. Au nord du parallèle 11° les sols à sesquioxydes n'apparaissent plus guère au

Cameroun (sauf sur les systèmes dunaires) mais ils existent à ces latitudes aussi bien en Nigéria qu'au Tchad (voir carte). Leur absence dans cette partie du Cameroun provient d'un mauvais drainage général de la plaine, qui y favorise les pédogénèses commandées par un excès d'eau (et les cations qu'elle apporte ou dont elle empêche l'évacuation), c'est-à-dire les vertisols, les sols hydromorphes et les sols sodiques.

2/ Localisation des sols sodiques et leur signification.

Ces derniers, du type sols lessivés à alcalis, ne peuvent se maintenir là où le climat favorise un drainage vertical important ce qui explique leur faible extension au sud de la Benoué où leurs affleurements sont de deux sortes : des petites plages, à horizon Bna profond et sans différenciation végétale, paraissant correspondre à un filon sodique de la roche-mère (sol actuel).- des glacis de piedmont en cours de démantèlement autour des extrusions trachytiques (phase de déséquilibre).

Ils sont particulièrement abondants par contre dans le Diamaré où la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 850mm. Certains de leurs affleurements de sommet d'interfluve sont également disséqués par l'érosion et marqués de caractères séniles (durcissement et imperméabilisation totale de l'horizon B) qui sont à l'origine de leur sensibilité à l'érosion. Toutefois si un sol analogue se reconstitue sous le plancher des ravines cette destruction s'apparenterait à une "mue" périodique.

En fait on ignore encore si les conditions pédo-climatiques de genèse de ces sols sont suffisamment strictes pour leur conférer une certaine signification climatique et on peut se demander si les caractères apparemment "reliques" de ces affleurements ne représentent pas une phase cyclique de leur évolution.

3/ existence de sols "hydromorphes" originaux.

Au sud de la Benoué et jusqu'au voisinage du piedmont nord de l'Adamoua se développe une pédogénèse hydromorphe particulière, qui envahit en effet l'ensemble des interfluves dans un milieu pourtant

"ouvert" où le drainage externe est correctement assuré. Ces sols ont été appelés "hydromorphes à pseudo-gley, lithomorphes" bien que l'hydromorphie puisse y être consécutive au lessivage de l'argile.

Ils présentent à la partie supérieure une spectaculaire activité des vers de terre (sols "dentelle") et à la base un horizon compact et imperméable qui paraît résulter d'une argilisation en place, de milieu confiné, saturé en cations, combinée à une illuviation d'argile colmatante et remontante. Un drainage notable s'y produit, dont témoignent les épais horizons A lessivés, mais il fait place assez brusquement en profondeur à un milieu argilisé confiné induisant une hydromorphie remontante. Il est possible que ce milieu, dont les caractères très contrastés semblent liés à des conditions de drainage modérées, apparaissant sur des matériaux riches en feldspaths, et donc favorables à une forte argilisation, présente lui aussi une certaine signification climacique. En effet ces sols, développés sur roches feldspathiques se partagent la partie sud du domaine des sols à sesquioxides avec des sols ferrugineux tropicaux lessivés développés sur des matériaux plus quartzeux. Ils constituent une variété de sols "lessivés" en argile, moins bien différenciés par les sesquioxides.

4/ Les pédogénèses associées et leur actualité.

Ainsi, si l'on ne tient compte que de la répartition présente des sols, c'est-à-dire si on les considère comme en équilibre avec le climat actuel, on pourrait conclure que le domaine nord-camerounais est caractérisé par la pédogénèse des sols ferrugineux tropicaux, (qui se forment sur des matériaux acides et bien drainés, avec accentuation du lessivage et de la lixiviation du nord au sud) accompagnée de différentes pédogénèses associées là où ces conditions de roche-mère et topographie ne sont pas réalisées :

Ce sont les sols lessivés en argile et en fer, dont l'horizon éluvial E est profondément et (ou) intensément développé, là où s'établit un drainage latéral important : laminage et accélération d'un flux oblique sur une rupture de pente, débouillage ou réutilisation d'un ancien horizon éluvial enfoui, hiérarchisation du réseau d'écoulement interne en bas de versant etc.

Ce sont les sols hydromorphes sur les matériaux feldspathiques bien drainés (sols "lithomorphes") ou dans les milieux fermés (sols hydromorphes topomorphes) au sud du domaine, c'est-à-dire entre la falaise de l'Adamaoua et la latitude de Garoua, les premiers n'étant en fait

qu'une variété de sols lessivés, de facture biologique et inductrice d'hydromorphie remontante.

Ce sont plus au nord, entre Garoua et Maroua, des sols rouges tropicaux sur les matériaux basiques correctement drainés et riches en fer, des vertisols topomorphes ou lithomorphes sur les matériaux calcaïques, des sols sodiques lithomorphes sur les roches sodiques.

Encore plus à l'est et plus au nord, les matériaux argileux mal drainés ou à nappe phréatique peu profonde évoluent en sols hydromorphes à gley, vertisols et sols sodiques topomorphes, ces derniers devenant plus répandus vers le nord, au-delà du parallèle 11 (carte pédologique du Tchad).

En fait ces pédogénèses associées peuvent s'imprimer assez rapidement et être effectivement en équilibre avec les climats actuels mais elles peuvent tout aussi bien être en totalité, ou pour certains de leurs caractères seulement, ou même pour certains affleurements héritées de périodes paléoclimatiques. C'est ainsi que les hardés, sols sodiques de la région de Maroua, présentent certains caractères séniles qui pourraient être considérés comme reliques. De même une partie des sols fersiallitiques du Nord-Cameroun peuvent être formés à une période antérieure et être conservés par le climat actuel. Par conséquent la signification climacique qu'on peut attribuer à ces différents sols à la lumière de leur répartition actuelle doit être révisée à chaque identification de caractères paléoclimatiques.

5/ Caractéristiques du climat actuel.

Il importe d'abord d'étudier comment et dans quelle mesure les types de sols rencontrés au Nord-Cameroun peuvent se former sous les climats actuels.

Les climats du Nord-Cameroun présentent certaines caractéristiques générales qui les distinguent de ceux du domaine ferrallitisant sud-camerounais et qui doivent logiquement influencer les pédogénèses supposées climaciques : c'est essentiellement une diminution de la pluviosité avec allongement de l'unique saison sèche et une augmentation des températures maxima et de l'évaporation.

La période pendant laquelle l'eau apportée par les pluies peut s'infiltrer jusqu'aux horizons profonds est donc considérablement réduite mais cette infiltration se produit néanmoins du fait de la concentration saisonnière des pluies et de la violence des averses. Toutefois le drainage effectif du sol dépend de sa perméabilité de surface qui varie avec le type de sol et les modifications provoquées par l'homme. Cette influence "anthropique" traduite dans le profil cultural confère à la plupart des sols cultivés une dynamique saisonnière de l'eau assez différente de celle qui a présidé à la formation du profil pédologique naturel.

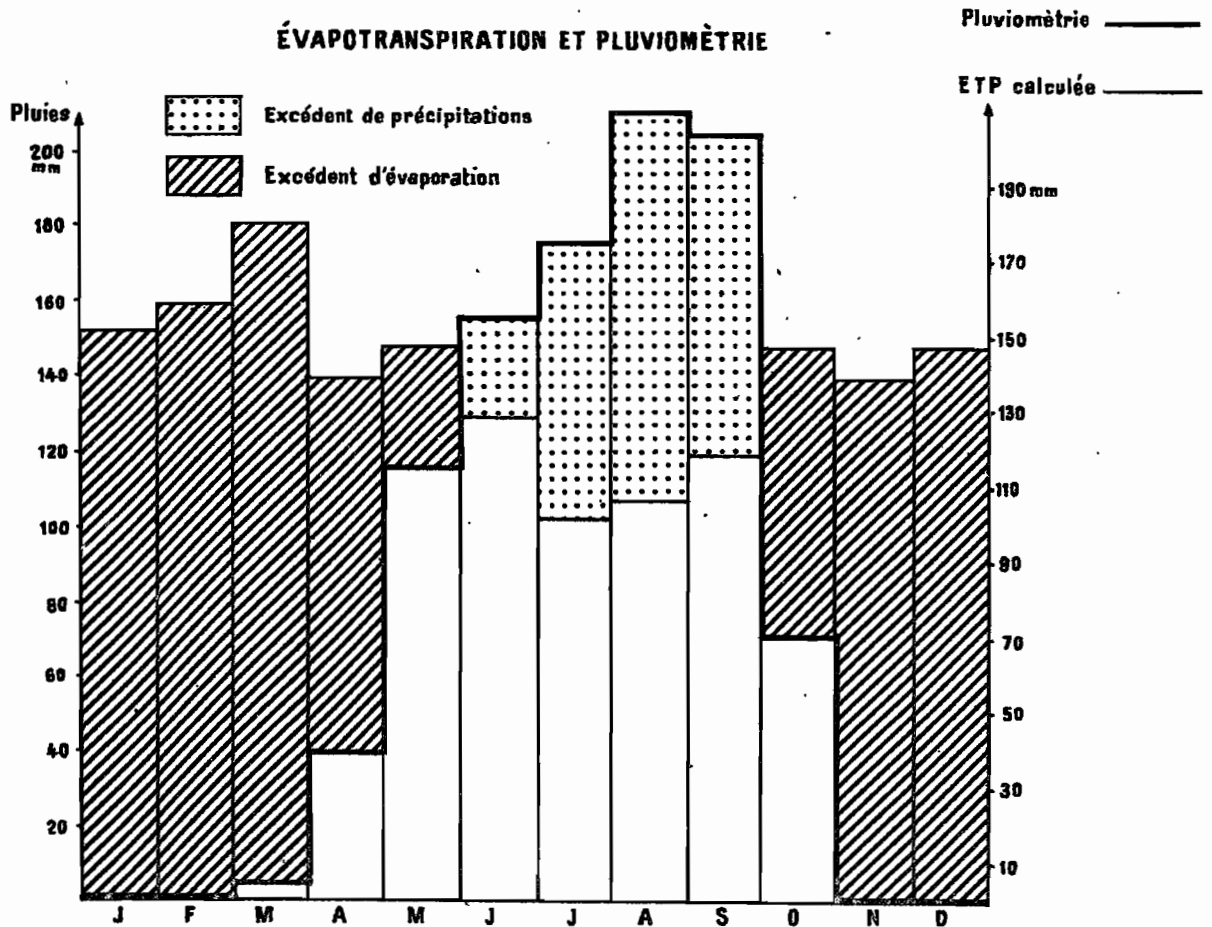
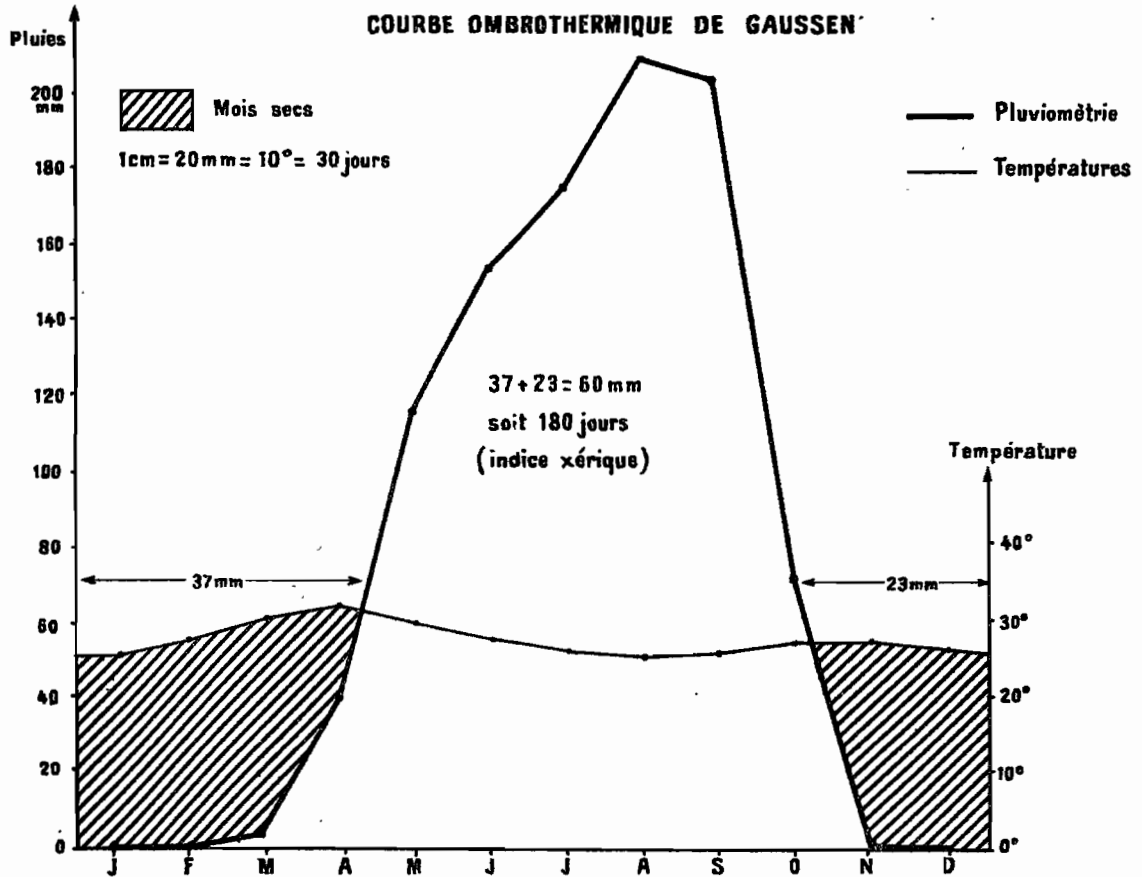
Pour fixer les idées on évalue par exemple à trois mois par an au maximum (Juillet, Août et Septembre) la période où s'établit un drainage vertical dans un sol profond et perméable de la région de Garoua dont la pluviométrie est de 1000mm environ. La variation du stock d'humidité du sol entre la fin de la saison humide et la fin de la saison sèche (évaporation + infiltration) est de l'ordre de 90mm pour le premier mètre, 90mm pour le second, 40mm pour le troisième. Ces évaluations peuvent être tirées de profils hydriques saisonniers mais peuvent aussi être calculées :

Calcul du drainage vertical : La pluviométrie mensuelle des mois humides a plus d'importance c'est la différence, positive ou négative, entre cette pluviométrie mensuelle et l'évapotranspiration réelle qui est à considérer. Cette dernière est approchée par le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Turc ou par la méthode de Thornwaite qui nécessitent la connaissance (ou à la rigueur une estimation) de la radiation globale, de l'humidité relative, de la durée astronomique du jour, de la durée de l'insolation et des réserves d'eau du sol en saison sèche. Le graphique ci-joint, établi pour Garoua, indique que les précipitations compensent progressivement l'évapotranspiration en mai et juin puis permettent un drainage en août et septembre. En octobre l'évapotranspiration l'emporte de nouveau et de janvier à avril les mouvements de l'eau dans le sol sont très réduits et très lents et par conséquent les processus pédologiques y sont bloqués.

La formule de Hénin-Aubert (drainage calculé) :

$$D = P^3 / (a + P^2) \text{ avec } a = 0,15 T - 0,13$$

où P et T sont respectivement la pluviométrie annuelle en mètres et



la température moyenne annuelle en degrés centigrades donne une estimation plus rapide du drainage. Pour Garoua elle indique un drainage D de 200mm ($T = 28^{\circ}$).

La courbe ombro-thermique de Gaussen combine graphiquement les régimes pluviométriques et thermiques (1cm y représente 1 mois en abscisse, 20mm de précipitations et 10° de température en ordonnée) et permet le calcul de l'indice xérique ou longueur en jours de la saison sèche (170 jours d'octobre à avril dans le cas de Garoua) indiquant par complément la période pendant laquelle le sol humecte puis draine ses horizons.

A cette grande pulsation annuelle qui fait alterner humectation et dessiccation intense s'ajoutent de nombreuses pulsations de moindre amplitude dues à l'espacement ou à l'irrégularité des pluies tout au long de la saison humide. Ces arrêts ou ralentissements périodiques du drainage avec inversion du sens de déplacement des solutions ont des répercussions pédogénétiques importantes et modulées qui diversifient la couverture pédologique et par conséquent la "réponse du sol" à ces incitations climatiques.

5/ CONSEQUENCES PEDOGENETIQUES.

La dynamique saisonnière des sols est très contrastée.

Ces caractéristiques climatiques contrastées font d'abord que la tranche de sol qui participe à la dynamique actuelle est d'épaisseur variable mais assez réduite. Les phénomènes d'altération y sont ainsi plus lents et moins complets que dans les paysages intensément et donc profondément drainés. C'est pourquoi l'épaisseur du solum est souvent réduite ici à quelques décimètres, les formations sableuses et perméables, comme les grès de Garoua certains glacis d'accumulation et les dunes du Nord, étant toutefois travaillées plus profondément par la pédogénèse (plus de deux mètres). Pour les sols à nappe phréatique peu profonde c'est le niveau inférieur de celle-ci qui sert de "plancher" à la pédogénèse (l'altération est faible dans l'eau stagnante mais rapide dans la zone de battement de la nappe) mais il existe souvent aussi des nappes temporaires perchées au contact des

horizons E et B. L'action des processus pédogénétiques ainsi limitée aux premiers décimètres y est cependant particulièrement intense parce que les alternances d'humectation-dessiccation y sont très nombreuses* et que les écarts thermiques du sol sont particulièrement importants sous ces climats contrastés et ces végétations clairsemées. La différenciation verticale des profils y est ainsi rapide et marquée, allant même parfois jusqu'à l'apparition d'une discontinuité plus ou moins parallèle à la surface du sol. Celle-ci est appelée contact planique lorsqu'elle est brutale et met en contact, avec rupture du joint capillaire, une couche supérieure sableuse ou graveleuse et un plancher argileux compact et imperméable.

Par ailleurs, la faible activité biologique, qui s'observe en dehors des vastes zones intensément travaillées par les vers de terre du sud de la Benoué, et qui résulte de la stérilisation de l'horizon supérieur par le soleil et par les feux (hydrophobie), rend la surface du sol peu perméable (battance), ou alternativement perméable et imperméable lorsque le confinement conduit à la formation d'argiles gonflantes affectées de gonflements et de retraits successifs. L'in-
é g a l refus à l'infiltration des fortes averses qui en résulte (et qui est accentué actuellement par certaines pratiques culturales) favorise l'érosion superficielle. Le pédoclimat est donc ainsi diversifié et des échanges de matière fine s'établissent le long des versants, diversifiant à leur tour les pédogénèses résultantes, conduisant à ces chaînes de sols caractéristiques et variés que l'on y observe et à la formation d'un modelé à portion concave importante.

Tentative d'explication.

Il est possible de relier ces caractéristiques climatiques à l'organisation et à la morphologie des sols du Nord-Cameroun de la manière suivante :

Si l'on exclut les matériaux à forte porosité originelle (grès, dunes) le jeu rapide et alternant du couple infiltration-évaporation qui li-

* De même que dans des régions plus élevées en latitude les alternances de gel et de degel ont des effets différents et plus accentués qu'un gel permanent.

mite l'épaisseur de la tranche de sol affectée par la dynamique actuelle de l'eau, provoque la formation de deux milieux contrastés :

- dans la partie supérieure du solum ou dans les portions hautes bien drainées des toposéquences la forte sollicitation de la lame pluviale et les possibilités d'évacuation latérale des eaux infiltrées favorisent l'aménagement de voies de lessivage, d'abord verticales puis obliques. L'activité de la faune, contrainte à un va et vient vertical saisonnier pour les besoins de son alimentation en oxygène et en eau, les consolide.
- dans la partie basse du solum ou des toposéquences le confinement, résultant d'un ralentissement de l'infiltration par l'évapotranspiration ou d'une évacuation défectueuse de l'humidité des nappes interne et superficielle, favorise l'argilisation et l'illuviation. Ainsi se mettent en place des horizons argileux massifs, imperméables et gonflants qui entretiennent le confinement du milieu (piégeage des ions et des colloïdes).

Entre ces deux milieux différents s'établit, dans les parties drainées des toposéquences, une zone de lessivage actif, vertical et oblique, qui progresse per descensum aux dépens des horizons colmatés inférieurs qu'il dégrade. Mais lorsque le paysage permet l'installation d'un bouchon argileux compact en bas de versant, l'accumulation gagne vers le haut de la toposéquence et envahit alors des horizons antérieurement marqués par l'éluviation. C'est l'accumulation remontante récemment mise en évidence au Tchad par G.BOCQUIER et qui s'accompagne d'un adoucissement du modelé.

La granulométrie et l'abondance du squelette résistant de la roche, épargné par l'altération, ~~déterminent~~ la stabilité à l'érosion des horizons éluviés ou argilisés formés et donc leur conservation et leur épais~~sis~~sement éventuels. Ces caractéristiques du squelette agissent en effet sur les pourcentages d'eau infiltrée et d'eau ruisselée et donc sur les vitesses de progression des fronts d'érosion et de lessivage (ou au contraire d'accumulation remontante). D'où le développement très inégal des horizons éluviés. Lorsque le contact planique est proche de la surface du sol on aboutit généralement, dans les conditions actuelles d'érosion anthropique accélérée à une mise à nu des horizons argileux.

En fait à chaque instant et en chaque point de la couverture pédologique la morphologie observée est le résultat de l'action passée et actuelle de différents groupes de processus, matérialisés dans des fronts ou zones plus ou moins parallèles à la surface du sol et qui sont, de haut en bas : 1/ l'érosion ou l'apport superficiel, 2/ l'apport, l'humification et la minéralisation de matières organiques, 3/ la dégradation ou le lessivage de l'argile ou du fer, 4/ la néoformation ou l'accumulation d'argile, 5/ l'altération des minéraux primaires avec exportation de produits de démolition.

La compréhension d'un état d'équilibre actuel nécessite de tenir compte à la fois des vitesses absolues de ces différents processus et de leurs vitesses relatives, mais aussi de leurs interactions génétiques, aussi bien actuelles que passées. La plupart de ces données, même actuelles, sont encore mal connues d'où la fragilité des interprétations, le grand nombre de facteurs leur conférant par ailleurs une grande complexité. Il existe cependant une certaine différence d'échelle entre la vitesse actuelle de l'érosion et celle des processus pédogénétiques autres que biologiques. En effet la végétation naturelle qui joue un rôle tampon essentiel a presque partout été modifiée par l'homme. Si l'on a bien à l'esprit que le sol est un état complexe d'équilibre qui peut parfois même être instable on comprend facilement que la plus petite modification puisse y avoir des conséquences apparemment disproportionnées à leur cause.

Inégal développement du lessivage.

Le déplacement vertical et latéral de l'argile et du fer qui joue un rôle si important dans la différenciation des sols ferrugineux tropicaux (lessivés), des sols hydromorphes (lessivés), des sols sodiques "lessivés à alcali" et des sols "lessivés" à horizons blanchis et(ou) à contact planique, n'est pas macroscopiquement visible dans les sols brunifiés eutrophes, les sols fersiallitiques rouges tropicaux et les vertisols typiques.

Ces trois derniers types de sols apparaissent par exemple sur les micaschistes de la région de Bibemi, roche riche en cations et en fer, le sol rouge apparaissant au sommet de petits interfluves, le sol brun à mi-pente, le vertisol dans le bas de pente (vertisol à la fois li-

thomorphe et topomorphe ou mieux, à drainage externe possible mais à faible drainage interne). Ces sols non lessivés voisinent avec des sols lessivés des classes hydromorphe, sodique et ferrugineuse (région d'Adoumri).

Le Nord-Cameroun juxtapose donc des sols très lessivés et des sols peu ou non lessivés, les premiers étant toutefois plus nombreux au sud et les seconds au nord. Les sols très lessivés sont soit en position de bon drainage externe en sommet d'interfluve soit dans un milieu soumis à une forte circulation d'eau, interne, latérale et laminée, en rupture de pente ou dans certaines parties des talwegs par exemple. Le matériau originel possède un squelette quartzéux suffisant pour qu'un déplacement interne des colloïdes puisse s'effectuer, dans la partie supérieure des profils, plus vite que l'enlèvement superficiel par l'érosion en nappe. Les sols peu lessivés sont soit en position de bon drainage externe (sols rouges tropicaux, sols brunifiés eutrophes) soit en position de drainage externe réduit (vertisols). Leur drainage interne peut être mauvais sans que l'engorgement s'y manifeste obligatoirement par des marques d'hydromorphie. Ils se forment sur des roches basiques susceptibles d'une forte néoformation d'argile à structure stable, là où l'érosion est faible ou entravée par un squelette quartzéux résiduel.

La différenciation des sols et ses processus.

Trois processus fondamentaux commandent donc la différenciation des sols du Nord-Cameroun, l'argilisation de milieu confiné, l'érosion et le lessivage. L'argilisation demande un matériau feldspathique ou une concentration topographique des ions, mais ses produits ne s'accumulent ou se maintiennent que si l'érosion est faible (milieu fermé ou présence d'un squelette quartzéux protecteur). L'érosion dépend de la violence des averses, du modelé, de la granulométrie et de la minéralogie de l'activité de la faune, et plus récemment de l'homme. Le lessivage dépend de la granulométrie et plus particulièrement des proportions relatives de squelette^{et} d'argile, de la taille et de la nature des phyllites, de l'activité de la faune et du drainage permis par le climat. D'où divers types de paysages pédologiques selon les roches-mères, les modelés, le climat et la durée d'évolution :

- 1 - Sols soumis à une très forte érosion qui élimine au fur et à mesure les matières fines produites par l'argilisation et même le squelette libéré par l'altération, et où des horizons lessivés ne peuvent se maintenir (pentes des massifs).
- 2 - Sols dont l'argilisation, et donc le lessivage, sont limités par l'érosion en tous points d'un paysage ouvert faiblement ondulé (mosaïque de sols argilisés peu différenciés d'une surface d'érosion entre le Tinguelin et les monts Mandara).
- 3 - Sols argilisés non ou peu lessivés en tous points d'un paysage ouvert (séquence sol rouge tropical - vertisol sur les micaschistes de Bibémi).
- 4 - Sols argilisés non lessivés dans un paysage fermé (vertisols sans drainage externe des yaérés) avec quelques sols superficiellement lessivés (sols sodiques) là où le drainage externe est meilleur (sols hardés des légers bombements de la plaine).
- 5 - Sols à horizon lessivé sur horizon argilisé en tous points d'un paysage ouvert (sols hydromorphes lithomorphes au sud du parallèle 9).
- 6 - Sols à horizon lessivé sur horizon inférieur de plus en plus argilisé vers le bas des versants, dans un paysage peu ouvert (sols ferrugineux et sols hydromorphes lessivés de la surface récente de la Benoué en grès de Garoua).
- 7 - Sols lessivés en tous les points épargnés par l'érosion d'un paysage ouvert (reprise d'érosion récente de la surface précédente).

Conclusion.

Deux caractéristiques du paysage, le drainage g é n é r a l et le modelé, combinées à deux caractéristiques de la roche-mère, sa capacité à former des argiles du type 2/1 et l'abondance du squelette, paraissent commander la différenciation des sols qui va de l'argilisation généralisée sur certaines roches basiques ou dans les paysages plats et fermés, au lessivage généralisé sur les matériaux quartzeux des paysages ouverts. Les combinaisons diverses de ces facteurs aux-

quelles s'ajoutent les variations climatiques en latitude (favorisant le lessivage au sud) expliquent dans une certaine mesure la mosaïque de sols actuellement observée.

Mais un tel contraste peut faire aussi penser à une juxtaposition de pédogénèses actuelles et passées, par exemple l'accentuation du lessivage et de l'érosion étant due à une modification récente de la pluviosité. Le premier marquerait les sols bien armés par un squelette quartzeux abondant, la seconde affecterait plutôt les sols argilisés vulnérables qui lui sont exposés. En outre les interventions humaines favoriseraient encore cette érosion, accentuant ainsi le déséquilibre de la couverture pédologique. C'est pourquoi la conservation des sols contre l'érosion doit être le premier souci de toute exploitation des terres de cette région.

6/ DUREE D'EVOLUTION ET HERITAGES.

Les importantes et rapides variations paléoclimatiques du quaternaire récent ont marqué effectivement les sols et les paysages de ces régions. Deux orientations principales : les climats un peu plus arides ont modelé des formes d'accumulation (glacis, dunes) avec les matériaux arrachés aux parties hautes du relief (rajeunissement). Les climats plus humides ont rendu le fer plus labile et favorisé sa ségrégation en carapace ou cuirasse, laissant ainsi des témoins résistants qui protègent parfois les formes antérieures; mais le plus souvent l'action plus profonde et plus intense des pédogénèses de climats humides a effacé celle des pédogénèses antérieures de climats secs. Il existe en outre une certaine "rémanence" (persistance) des pédogénèses lors des changements climatiques, le climat actuel pouvant ainsi entretenir ou simplement conserver des sols qui ont pris naissance dans des conditions différentes. Le démêlage de cet écheveau nécessite d'étudier la mosaïque de sols qui en résulte à la lumière des données de la géomorphologie paléoclimatique et de la dynamique actuelle des sols et du modelé.

Résultat de ces déséquilibres climatiques ou de changements de niveau de base indépendants de ceux-ci, le Nord-Cameroun est par ailleurs soumis ou a été soumis en bien des endroits à une érosion active qui a décapé inégalement sa couverture pédologique mais qui est souvent capable de maintenir le sol dans un état de faible évolution.

II LES DIFFERENTS PAYSAGES PEDOLOGIQUES

L'étude précédente des interactions des grands facteurs pédogénétiques, climat, roche-mère, temps, végétation et topographie permet de mieux comprendre les deux types fondamentaux de paysages pédologiques, avec leurs intergrades, qui se présentent au Nord-Cameroun :

- Sur les modelés juveniles, "ouverts" au réseau hydrographique et où l'emportent les processus d'ablation, il y a juxtaposition de pédogénèses fortement influencées par la roche-mère mais d'évolution encore peu poussée : d'où des sols peu développés n'échangeant pas de matière par drainage latéral et par conséquent mal organisés en toposéquences ou chaînes de sols.

- Sur les modelés ouverts plus évolués, de forme généralement convexo-concave et donc plus adoucis ou plus réguliers, ainsi que dans les milieux "confinés" des grandes plaines alluviales s'établit une différenciation plus profonde et plus marquée de sols évolués échangeant des matières le long de toposéquences (d'échelle très variable : hectométrique à décimétrique) par le fait des nappes temporaires ou permanentes et l'action du ruissellement superficiel et celle du drainage latéral interne.

Les héritages paléoclimatiques s'inscrivent dans les deux types de paysages précédents soit sous forme de témoins résistants (carapaces, couches caillouteuses ou durcies) ou protégés de l'érosion (sols rouges tropicaux de certains replats des monts Mandara ?) soit d'une manière plus subtile dans les altérations ou les horizons profonds de sols évolués. La partie supérieure de ceux-ci subit plutôt des influences actuelles comme le lessivage et (ou) la dégradation de l'argile.

Chaque paysage pédologique présentant habituellement plusieurs types de sols, organisés ou non en toposéquences, il est nécessaire de faire appel pour le caractériser à ces unités supérieures que sont les juxtapositions ou associations (toposéquences, chaînes) de sols. Les caractères généraux des différentes classes ou sous-classes ayant été indiqués au chapitre V il est alors préférable de présenter les sols du Nord-Cameroun dans leur organisation en paysages pédologiques choisis parmi les plus typiques. On étudiera successivement :

- 1 Les sols des massifs montagneux de Poli et des Mandara
- 2 Les sols en début d'évolution des modelés d'ablation
- 3 La séquence sol rouge tropical-vertisol des micaschistes de Bibémi
- 4 La séquence sols ferrugineux - sols hydromorphes de grès de Garoua
- 5 Les sols hydromorphes à vers de terre de la région Poli-Tcholliré
- 6 Les sols sodiques des plages "hardé" du Diamaré
- 7 Les sols des plaines d'inondation du Logone

La toposéquence, ou la chaîne de sols, ou mieux le paysage pédologique qui situe les différents types de sols par rapport aux composantes du modelé et expriment les échanges de matière ou les relations génétiques qu'ils établissent entre eux apparaît en effet comme un cadre d'étude indispensable à la compréhension des sols et du modelé de ces régions.

1/ LES SOLS DES MASSIFS MONTAGNEUX

La présence de nombreux cailloux, blocs, dalles ou chaos de boules de roches est apparue d'abord comme le trait pédologique essentiel des pentes des inselbergs ou des massifs du Nord-Cameroun. Ces reliefs ont donc été cartographiés en "rochers nus" (sols minéraux bruts d'érosion lithique) ou en "lithosols" ou même en "sols peu évolués lithiques" lorsqu'un horizon humifère apparaît entre des affleurements de roche dure. Sur les roches friables (marnes, schistes, micaschistes, colluvions) les sols deviennent "régosoliques".

Les sols lithiques d'érosion (minéraux bruts et peu évolués) sont très généralement considérés comme des sols pauvres voire même impropres à toute culture. Et cependant au Nord-Cameroun certains des massifs ainsi classés portent une végétation arborée et graminéenne conséquente et leurs sols nourrissent des populations très denses. C'est parce que, là où ces rochers n'occupent pas toute la superficie, les agriculteurs ont su utiliser pour leurs cultures les espaces, d'échelle métrique ou décimétrique existant entre les affleurements rocheux ou même les cupules ou les fissures de dissolution à la surface horizontale des blocs. Quel est le support pédologique de ces cultures acrobatiques ?

Parfois les roches ne forment qu'un "champ de cailloux" libres sous lequel il existe un sol évolué (collines de "quartzites entre Garoua et Dourbey) mais c'est rarement le cas sur les fortes pentes montagneuses. Sur grès à ciment argileux le sol même peu évolué dispose d'un complexe absorbant et peut stocker de l'eau.

Le plus souvent c'est un sol plus profond, plus évolué qui s'est formé entre les blocs; ceux-ci transforment en effet une forte pente en un ensemble de petits replats désordonnés protégés de l'érosion. Ces sols peu évolués ou tendant vers les sols ferrugineux (granites, grès) ou vers les sols bruns eutrophes (trachytes, granites calco-alcalins, roches basiques etc) ont généralement un horizon humifère peu épais mais assez riche en matière organique : sur les monts de Poli qui culminent à 2000_m celle-ci peut atteindre 10 à 20 % avec un rapport C/N des 15 à 20. Ailleurs elle est de 4 % avec un rapport C/N plus bas. Une relative fraîcheur du climat peut expliquer ces teneurs élevées sur le massif de Poli dont la végétation comporte d'ailleurs quelques espèces montagnardes qui sont absentes des monts Mandara, moins élevés et plus nordiques.

Ces petits affleurements sont donc, avant mise en culture, assez bien ~~fournis~~ en matière organique. Ils disposent également en général de réserves minérales importantes. Mais leur texture est trop sableuse et leur profondeur insuffisante pour leur assurer une bonne rétention d'eau. Leur production agricole est donc limitée à la saison humide et très dépendante des conditions météorologiques.

Ils sont protégés de l'érosion par ce micro-relief en escalier créé naturellement par les blocs et amélioré par les terrassettes des utilisateurs. Ils ont quand même, à des périodes plus sèches du quaternaire, fourni la matière plus ou moins fine des glacis d'accumulation qui encrassent encore par endroits leur piedmont. Un certain entraînement des parties fines paraît se produire encore très lentement ou lors d'avverses exceptionnelles.

2/ LES SOLS EN DEBUT D'EVOLUTION DES MODELES D'ABLATION

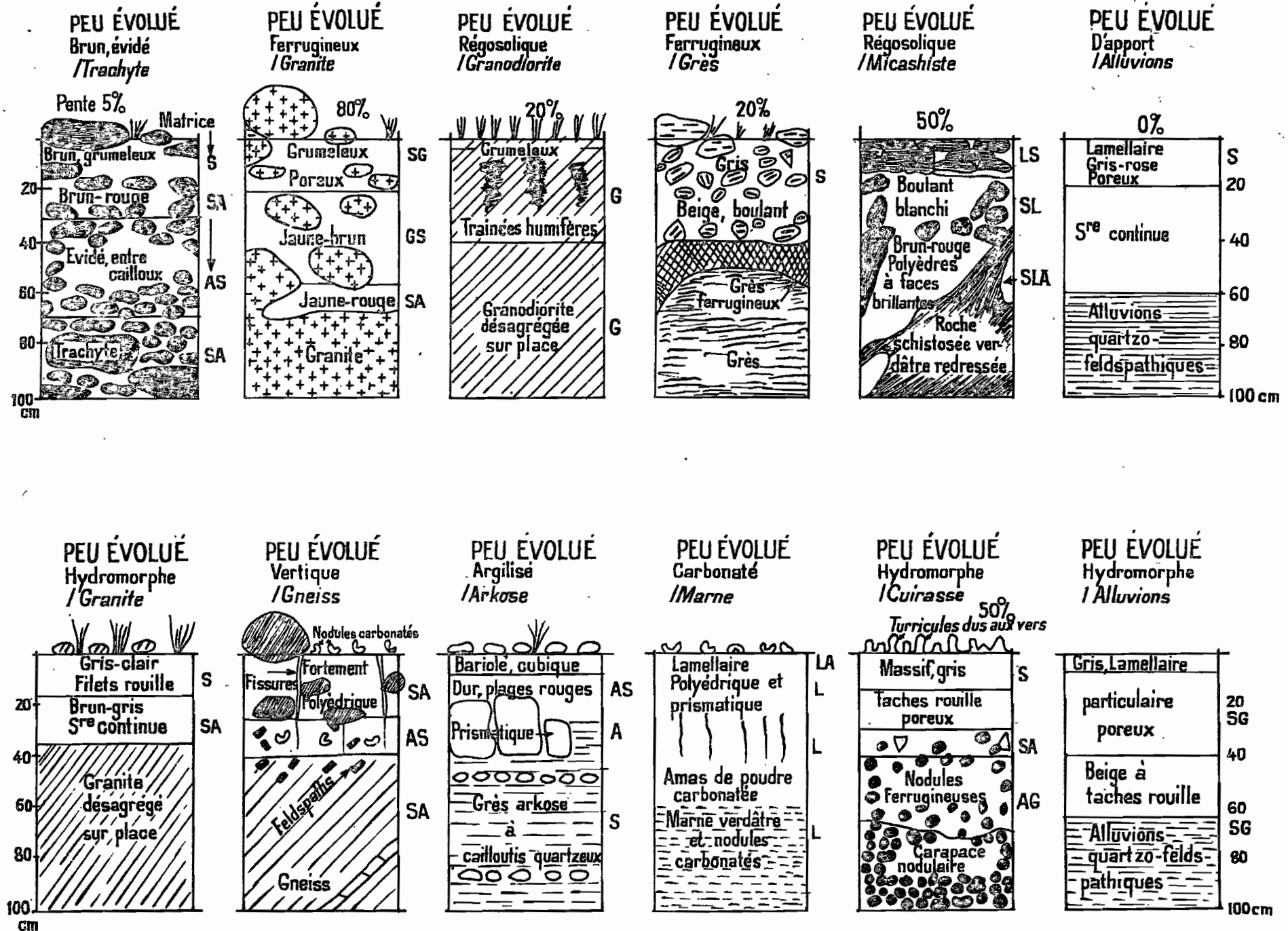
Ce type de paysage pédologique s'observe en particulier aux abords des monts Mandara dans la région comprise entre le mayo Kébi et les massifs du Tinguelin, de Peské-Bori, de Bossoum et de Goho : les dénivelées sont faibles, l'érosion active, le réseau hydrographique est intermittent, serré et peu hiérarchisé, les talwegs sont inscrits dans la roche.

Le modelé présente alors de nombreuses facettes diversément orientées et de pentes faibles. L'érosion différentielle dégage des filons de roche résistante qui "rayent" le paysage; des affleurements rocheux s'observent de place en place et des pierres libres parsèment la surface du sol (champ de cailloux). La végétation est peu fournie, arbustive avec des plages graminéennes discontinues. Le ruissellement l'emporte sur l'infiltration mais la roche résistante gêne l'incision linéaire. Des petits épandages provisoires comblent les contre-pentes créées par les barres rocheuses. La nappe d'arène est peu profonde mais interrompue et de faible débit.

Les sols peu évolués d'érosion dominant sur les roches-mères quartzeuses. Au contraire sur les roches plus feldspathiques qui favorisent l'argilisation les sols présentent un horizon peu épais, souvent discontinu, mais assez compact bien que sa granulométrie soit encore peu argileuse (argilo-graveleuse par exemple) et dont la structure est continue lorsque l'évolution est sodique, prismatique lorsqu'elle est vertique ou hydromorphe. Près des filons riches en minéraux ferro-magnésiens apparaissent au contraire des sols rouges tropicaux et sur les dômes des sols bruns eutrophes mais ces différents horizons argilisés sont plutôt du type BC que B et les passages latéraux d'une tendance évolutive à l'autre sont fréquents et rapides. Par place on observe des sols plus évolués mais qui correspondent à des secteurs mieux protégés de l'érosion ou non encore atteints par celle-ci. Dans ce dernier cas il s'agit en fait des restes d'un aplatissement antérieur conservé en ligne de partage des eaux (entre le massif de Bossoum et celui de Peské-Bori par exemple) et où l'hydromorphie a contaminé des sols divers principalement sodiques ou vertiques. Le démantèlement de ces sols par l'érosion concentre parfois les nodules carbonatés ce qui oriente localement la pédogénèse vers

DIFFÉRENTS PROFILS PEU DÉVELOPPÉS DU BASSIN DE LA BENOUÉ

Figure 8



un type calci-magnésique.

Exemple de sol "en début d'évolution" :

Profil GM 100 : A 0,5 km au N.E. du hameau de SOUROU (lat. 9°36', longitude 13°35', altitude 320m) - Glacis d'érosion (pente 2 %) commandé par un petit inselberg à boules granito-gneissiques. Sol plan avec 40 % de blocs. Végétation de touffes graminéennes espacées et quelques arbres (Boswellia, Anogeissus, Combretum). Surface du sol fissurée avec des nodules carbonatés. Sols peu évolués régosoliques près d'un talweg inscrit dans la roche à 300m de là. Horizons :

0 - 25cm : AB. Gris-brun 2.5 Y 3/2 en sec et en humide. Texture sablo-argileuse avec 10 % de graviers quartzeux. Fortement structuré en polyèdres très fermes 10-30mm, d'humectation lente, à surstructure prismatique fine 2 x 3/5cm. Faible porosité tubulaire fine. Enracinement bien réparti adapté à la structure. 1 % de matière organique à rapport C/N de 17. pH de 7.1. 0,5‰ de phosphore total. Capacité d'échange de 17 mé saturée en cations par le calcium essentiellement. Pas de carbonates.

25 - 40cm : BC. Brun-gris 10 YR 4/2 en sec et humide. Texture argilo-sableuse avec 30 % de graviers feldspathiques jaunâtres et de nodules carbonatés durs et mamelonnés. Faiblement structuré en polyèdres friables, d'humectation rapide, suivie d'effondrement. pH de 8.4. Capacité d'échange de 21 mé saturée par le calcium. 0.4 % de carbonates dans la terre fine.

40 - 60cm : C. Brun-gris 2.5 Y 5/2 en sec et humide. Texture gravelo-argileuse avec dominance de feldspaths et de morceaux de roche. pH de 7.9 sans carbonates. Capacité d'échange de 19 mé saturée essentiellement par le calcium.

Conclusion : L'évolution de ce profil paraît se faire vers les vertisols à drainage externe possible mais il n'en présente pas l'ensemble des caractères et l'érosion qui le rajeunit continuellement reste le processus principal à faire apparaître dans la classification :

sol peu évolué d'érosion, faciès vertique.

3/ LA TOPOSEQUENCE SOL ROUGE TROPICAL, SOL BRUN ET VERTISOL SUR LES GNEISS MICASCHISTEUX DE LA REGION DE BIBEMI.

L'évolution vertique y est normalement associée à la pédogénèse ferrallitique rouge tropicale qui ne se développe qu'en position de bon drainage externe sur les interfluves. Ces deux types de pédogénèse, comme d'ailleurs celle des sols brunifiés se distinguent fon-

damentalement des évolutions ferrugineuses et sodiques lessivées par l'absence de migration du fer et de l'argile qui restent liés, d'où des profils moins différenciés en horizons. Sous les mêmes conditions climatiques se manifestent donc des évolutions pédogénétiques opposées déterminées par un autre facteur pédogénétique, la roche-mère.

Les roches basiques à taux élevé d'argilisation potentielle permettent l'établissement de liaisons fer-argile stables donnant des sols riches en fer (10 %) qui colore vivement en rouge le sol fersiallitique tandis que le vertisol où le fer est à l'état **inclus ou individualisé*** prend une couleur sombre attribuée à des liaisons organiques stables. Leurs solum sont peu épais (quelques décimètres) du fait de leur sensibilité à l'érosion et de l'absence de différenciation verticale mais leur horizon C d'altération peut localement s'épaissir considérablement. Solum et surface du sol sont encombrés de cailloux qui, mis à l'affleurement, résistent mieux à l'altération et ralentissent l'érosion en nappe. L'érosion différentielle dans ces roches hétérogènes influence nettement le modelé qui se présente en petits interfluves dont les versants ont parfois moins de 100m, avec des pentes sensibles (quelques %). Les déjections de vers et les remontrées termitiques fournissent des matières fines à l'érosion en nappe et concourent à l'homogénéisation des solum. Le brassage vertical résultant de la néoformation d'argiles gonflantes n'affecte pas les sols rouges à argiles surtout kaolinitiques ou héritées (illitiques) stabilisées par leurs liaisons avec le fer qui leur confère une nette structure polyédrique fine.

Des sols bruns forment à mi-pente le passage des sols fersiallitiques aux vertisols. Parfois d'extension limitée ils ne présentent que des caractères intergrades entre ces types de sol. Il arrive aussi qu'ils s'étendent ou prennent des caractères plus spécifiques de sols brunifiés.

Séquence de Bibémi. Petit interfluve sous savane arborée assez dense (Anogeissus, Balanites, Tamarindus, Ziziphus, Acacia scorpioïdes), sur gneiss fin parcouru de filons micaschisteux. Dallage de cailloux de quartz ferruginisés.

* Sous forme de petites concrétions noires, ferro-manganiques d'aspect "plomb de chasse".

BBH 203. Sol rouge tropical en sommet d'interfluve. Termitières rouges, déjections de vers au collet des arbustes. Croûte squameuse rougeâtre entre les cailloux. Horizons :

0 - 8cm : A1. Brun 7.5 YR 4/4, plus rouge à la base. Texture sablo-limono-argileuse avec graviers quartzeux. Structure lamellaire à cubique grossière avec lissage de quelques faces. Porosité faible, bonne prospection de racines. Limite distincte et régulière de couleur.

8 - 23cm : (B). Rouge 2.5 YR 4/6. Texture argilo-limoneuse (pseudosables) avec quelques graviers feldspathiques et quartzeux. Fortement structuré en polyèdres moyens peu durs se défaisant en très fins (sous-structure). Porosité de fissures.

23 - 45cm : BC. Juxtapose des volumes rouges d'horizon B et des volumes jaunes d'horizon C où l'architecture de la roche est conservée. Texture moyenne sablo-limoneuse. Cohésion faible.

45cm : C. Roche altérée litée, friable, jaunâtre, feldspathique et micacée avec quelques joints argilisés rougeâtres.

Caractères analytiques : 30 % d'argile et 30 % de limons dans le solum qui contient 9 % de fer total, de grandes réserves en cations (150 mé) une bonne capacité d'échange (15 mé) complètement saturée en cations échangeables (sans sodium). 2 % de matière organique à C/N de 13 en A1, pH neutre. Le profil est peu différencié en argile et en fer et leurs maxima coïcident dans l'horizon (B).

BBH 202. Vertisol "lithomorphe" de bas de pente mais à drainage externe possible. Faible activité biologique, léger micro-relief et quelques fentes de retrait. Horizons :

0 - 10cm : A1. Brun-gris 10 YR 4/2. Texture sablo-argileuse avec quelques cailloux. Fortement structuré en polyèdres fins et en cubes (5cm) durs et peu poreux. Radicelles. Limite distincte et irrégulière de structure.

10 - 45cm : B. Brun foncé 10 YR 3/2. Texture argilo-sableuse avec quelques graviers quartzeux, quelques petites concrétions (2mm) dures et rondes et des nodules carbonatés inférieurs au centimètre. Fortement structuré en prismes (5cm) se défaisant en plaquettes obliques très dures, à faces lisses et sans pores. Limite graduelle.

45 - 90cm : B3. Mêmes teinte et texture. Structure en plaquettes obliques très dures, à sur-structure prismatique. Fentes étroites, porosité nulle, peu de racines.

90cm : BC. Couleur irrégulière brun-olive-pâle 2.5 Y 5/4, texture sablo-argileuse, structure faiblement développée, en polyèdres durs non poreux. Pas de racines.

Caractères analytiques : Argilisation plus poussée que dans le sol rouge tropical : 50 % en B. Même teneur en fer total (9 %). Plus forte capacité d'échange (30 mé) due aux néoformations massives d'argiles montmorillonitiques. Complexe absorbant saturé en cations échangeables, avec très peu de sodium (0,3 mé). Fortes réserves minérales (200 mé). pH nettement basique (8 à 9) neutre en A1. 2.7 % de matière organique à rapport C/N de 14 en A1.

Valeur agronomique :

Ces sols présentent de bonnes propriétés chimiques provenant de la nature basique de la roche-mère, de l'absence de lessivage et du rajeunissement par l'érosion. Toutefois en culture intensive (coton) ils réagissent bien à certains engrais, compensant certaines faiblesses, en phosphore par exemple. Leurs propriétés hydriques sont correctes lorsque l'horizon argileux n'est pas trop mince. Ils sont par contre très sensibles à l'érosion et celle-ci a des effets irrémédiables du fait de la faible épaisseur du solum et de l'abondance des cailloux. Leur protection s'avère délicate dès que la pente devient sensible (collines entre Dembo et Dourbey au nord de Garoua, désertifiées malgré un travail considérable de terrassettes et de mise en tas des cailloux).

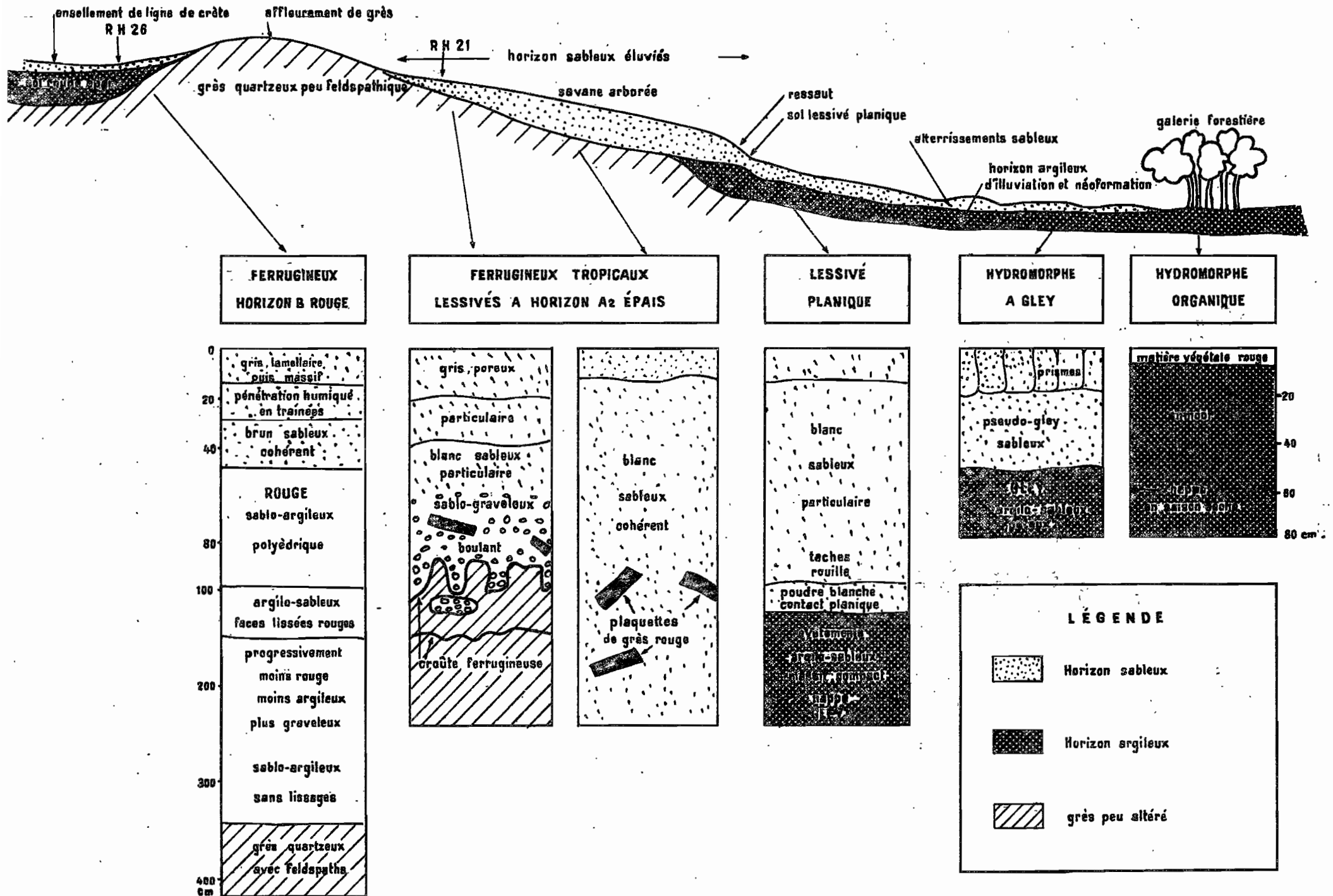
4/ LES PEDOGENESES FERRUGINEUSES, LESSIVANTES ET HYDROMORPHES
DU BASSIN DE LA BENOUE ET EN PARTICULIER DES GRES DE GAROUA
ET DES ALLUVIONS ANCIENNES.

Les grès du crétacé supérieur occupent près de Garoua une vaste région de part et d'autre de la Benoué, vers 240m - 280m d'altitude. Le paysage est commandé par des massifs ou collines gréseux et par des extrusions trachytiques culminant à 400-500m. Ces reliefs se raccordent au paysage par un glacis plus ou moins disséqué (dépression périphérique).

La toposéquence étudiée caractérise de vastes interfluves en pente douce et régulière présentant une large portion concave. Ceux-ci occupent l'ensemble des lignes de partage des eaux à l'exclusion de quelques secteurs, proches de la Benoué ou de ses principaux affluents, qui sont disséqués par une reprise d'érosion récente et présentent ainsi des sols rajeunis ou peu évolués.

SÉQUENCE DE SOLS FERRUGINEUX-LESSIVÉS-HYDROMORPHES (Grès de Garoua)

Figure 9



L'évolution poussée du paysage pédologique est attestée par la nette différenciation en argile et en fer des profils et de la séquence. La pédogénèse ferrugineuse lessivant affecte l'ensemble de la portion convexe ou plane de sommet d'interfluve et les glacis entourant les reliefs gréseux. La pédogénèse hydromorphe, parcourue de drains lessivés, occupe les bas-fonds et la base des profils dans la portion concave. Elle apparaît aussi sur le sommet plan des plus vastes interfluvés ou plus exactement dans de légères dépressions ou collecteurs à la surface de ceux-ci. Des affleurements gréseux en dômes surbaissés apparaissent aussi par places en position haute tandis que les bas-fonds sont remblayés sur plusieurs décamètres d'épaisseur par des dépôts colluvio-alluviaux hétérogènes. Le modelé actuel paraît donc dériver d'un modelé antérieur profondément incisé dont les talwegs principaux ont été remblayés par les matières fines enlevées aux versants. La reprise d'érosion récente progresse rapidement dans ces dépôts à la faveur d'anciennes couches drainantes débourrées avant d'attaquer les versants mais elle épargne encore une grande partie des paysages gréseux.

En position haute on rencontre, entre les affleurements rocheux, des sols profonds du type suivant :

RH 26. Au pK 24 de la route Garoua-Ngaoundéré, près d'un dôme gréseux, sous savane arbustive à Daniella et karités en cours de défri-chement. Horizons :

0 - 15cm : A11. Brun-gris foncé 10 YR 4/2, 3/2 humide. Texture sableuse. Structure lamellaire sur quelques centimètres puis continue poreuse et peu fragile, d'humectation rapide. Limite distincte de couleur.

15 - 30cm : A12. Pénétration humique en traînées 10 YR 5/3. Texture sableuse. Faiblement structuré en polyèdres 10-50mm fermes et poreux.

30 - 50cm : AB. Brun 7.5 YR 5/4, 5 YR en humide. Texture légèrement plus argileuse. Même structure, stable à l'humectation (rapide). Cohésion notable. Limite distincte de couleur, texture et cohésion.

50 - 100cm : B1. Rouge 2.5 YR 5/6, 4/6 humide. Texture sablo-argileuse sans feldspaths visibles. Moyennement structuré en polyèdres friables absorbant l'eau mais s'effondrant après humectation.

100 - 160cm : B2. Rouge 2.5 YR à 10 R 4/8 en sec et humide. Texture argilo-sableuse à sables grossiers assez propres. Structure polyédrique irrégulière à facettes lissées rouges s'effondrant à l'humectation.

160 - 400cm : B3. Progressivement moins rouge (5 YR 5/6), moins argileux, plus graveleux (20 %). Faiblement structuré en polyèdres grossiers peu fragiles et sans facettes brillantes.

400 - 600cm : CI. Arène quartzeuse claire et dure avec feldspaths apparents.

600 - 1500cm : CII. Grès arkosique peu cimenté, avec deux passées argileuses.

Caractères analytiques : La teneur en argile passe de 7 % en A1 à 35 % en B2 puis redescend à 30 % en B3 tandis qu'un refus de 20 % apparaît. La teneur en fer total présente son maximum (3 %) en B2 tandis que les horizons A sont fortement lessivés (0,4 et 1,2 %). L'argile, essentiellement kaolinique ne confère à ce sol qu'une faible capacité d'échange, 4 mé, qui est saturée en B à 60 %. Très peu de matière organique (0,7 % en A1). Faible réserve en cations totaux; pH voisin de 6.

L'horizon B rouge de ce sol se différencie de celui d'un horizon ferrallitique par sa porosité plus faible (30 % contre 60 %) sa densité apparente plus élevée (1,6 contre 1,2) une friabilité moindre, un taux de saturation beaucoup plus élevé (60 % contre 10 %). On remarque toutefois que le fer n'apparaît pas sous forme figurée et que sa courbe de variations suit celle de l'argile comme dans les sols ferrallitiques et les sols fersiallitiques.

Il est difficile de préciser si ces sols présentent des caractères "hérités" et s'ils sont en équilibre dans les conditions actuelles. Ils occupent souvent des emplacements peu exposés à l'érosion, sur les lignes de partage des eaux. Sur les glacis de piedmont des reliefs gréseux ils sont associés à des sols très différents dont l'horizon A2 est hypertrophé aux dépens d'un horizon B réduit ou inexistant. Exemple :

RH 21. Près de l'affleurement de grès qui commande le profil rouge précédent. Pente 1 % avec érosion en nappe attestée par le déchaussement des touffes d'herbes (très espacées) et des plages de sables déliés. Grès quartzeux et feldspathique avec des petits bancs ferrugineux horizontaux. Horizons :

0 - 20cm : A11. Gris 10 YR 6/1.5, 3/3 humide, de texture sableuse grossière, de structure particulière peu cohérente mais poreuse et stable à l'humectation (qui est rapide). Limite distincte de couleur.

20 - 40cm : A12. Gris-clair 10 YR 7/2, 5/3 humide avec pénétration humique en traînées. Texture sableuse, structure particulière et poreuse. Limite distincte par la couleur en humide.

40 - 60cm : A2. Gris-rose 7.5 YR 8/2, 6/6 humide. Mêmes caractères que ci-dessus mais texture plus graveleuse (60 % de refus). Limite tranchée et régulière de texture.

60 - 90cm : A2. Blanc-rose 7.5 YR 8/2, 6/6 humide. Texture gravele-sableuse avec un peu d'argile (10 %). Structure particulière, poreuse et bouillante englobant des tablettes résistantes de grès ferrugineux violacé, d'orientations diverses. Limite crênelée par indentations, en colonnes colorées et consolidées, du grès sous-jacent. Ces colonnes qui peuvent atteindre 10cm de hauteur sont parfois détachées de leur support.

90 - 130cm : BC. Grès pénétrant l'horizon sus-jacent par ces colonnes rouges (2.5 YR 4/6) et durcis par un ciment ferrugineux qui paraît protéger les petits feldspaths blancs de la roche. En effet l'arène rose (5 YR 7.5/3) qui les entoure, particulière, caviteuse et bouillante est dépourvue de feldspaths.

130 - 180cm : CR. Grès grossier quartzeux peu résistant, avec des feldspaths et englobant des poches d'arène friable. Croûte ferrugineuse, épaisse de 2cm et festonnée, à 140cm.

Commentaire :

L'origine de ces petits bancs ferrugineux pose un problème : datent-ils de la diagénèse des grès de Garoua ou sont-ils une forme d'accumulation "en raies" dans le sol ferrugineux actuel ou récent ? Si l'on exclut ces concentrations ferrugineuses ce type de profil est peu différencié en fer et pauvre en celui-ci (0.2 à 0.5 %). Sa teneur en argile passe de 6-10 % dans les horizons A à 19 % en BC.

Ce sol à horizon A2 très épais (1m) est soit un sol ferrugineux encore peu évolué soit un sol très lessivé dont l'argile a migré hors du profil par entraînement oblique à la base de l'horizon A2. En effet on retrouve dans la partie concave de la séquence un horizon argileux dont l'argile paraît provenir à la fois d'une argilisation sur place en milieu confiné hydromorphe et d'un apport oblique en suspension.

L'inflexion de pente de ces modelés convexo-concaves comporte en effet soit un sol intergrade "sol ferrugineux" (horizons supérieurs) "sol hydromorphe" (horizons inférieurs) soit un sol intensément et profondément décoloré et lessivé jusqu'à un contact planique qui le sépare d'un horizon compact, gris, à revêtements argileux, qui passe en profondeur à un gley typique. La teneur en argile peut passer de 5 % en A2 à 25 % en Bt et mis à part l'hydromorphie de profondeur (2m) ce type de sol n'est nettement marqué par aucune autre pédogénèse.

Ces sols lessivés présentent souvent une concentration de cailloux dans leur horizon A2 qui témoigne d'une action rapide de l'érosion. Ils n'envahissent pas l'ensemble de l'interfluve ou du glacis mais paraissent plutôt occuper une position privilégiée dans la chaîne de sols, là où se produit un "laminage" du drainage latéral, qui exacerbe les phénomènes de lessivage.

Le cuirassement est très discret sur ces formations de grès qui comportent pourtant de nombreux bancs ferrugineux. Des cuirasses ou carapaces existent au voisinage des inflexions de pente mais elles ne sont ni continues ni totalement affleurantes. De même l'horizon Bfe des profils ferrugineux est peu épais, peu concentré en fer ou même non individualisé (RH 26). Dans un milieu de pédogénèse "ferrugineuse" caractérisé par une grande labilité du fer cette discrétion du cuirassement sur les grès de Garoua étonne, d'autant plus qu'elle contraste avec les grands aplanissements cuirassés visibles au nord et au sud de la chaîne de Poli, sur des roches du socle, vers 400m d'altitude. La résistance plus faible des roches sédimentaires gréseuses à l'érosion peut être incriminée : la "surface récente" de la Benoué s'y est établie plus facilement, déblayant les témoins de phases antérieures. Lors de la phase de creusement le modelé était trop accidenté, le milieu trop "ouvert", pour piéger le fer mis en mouvement, puis, lors du comblement ultérieur, il est resté constamment "confiné" le fer maintenu à l'état réduit étant encore en grande partie éliminé.

Le bas de pente concave des régions gréseuses est le domaine de l'argilisation et de l'hydromorphie sauf sur le trajet interne de quelques chenaux ou bancs sableux qui évacuent les eaux du sol jusqu'à

leur émergence (sourcins) ou jusqu'à la nappe phréatique. En surface, seules les vallées importantes présentent un écoulement concentré. Ailleurs c'est une douce concavité qui rassemble les eaux de ruissellement avant leur infiltration ou leur évacuation vers l'aval. L'infiltration paraît suivie elle-même d'un cheminement oblique interne complexe, chenalisé dans des structures favorables.

L'hydromorphe se manifeste par des marques de réduction du fer de plus en plus serrées et de plus en plus proches de la surface vers le fond du talweg. On passe ainsi des sols lessivés précédents à des sols lessivés tachés puis à des sols hydromorphes à pseudo-gley ou à amphigley puis à gley et même dans certaines galeries forestières à des sols hydromorphes organiques.

Mais le matériau colluvial qui comble ces bas-fonds juxtapose des bancs de granulométrie ou d'organisation différentes lesquels orientent leur pédogénèse. Il en est de même dans les vastes plaines d'alluvions anciennes, vers Barnaké à l'Ouest de Garoua par exemple où les actions opposées du lessivage et de l'argilisation peuvent transformer la granulométrie originelle des dépôts et tromper ainsi sur les conditions de leur mise en place :

- Un horizon argileux peut provenir de l'argilisation d'un banc sableux feldspathique, placé ultérieurement dans un milieu favorisant l'argilisation ou l'illuviation.
- Un horizon sableux peut n'être que le résidu siliceux du lessivage ou de la dégradation des phyllites d'une ancienne couche argileuse, dont il reste tout au plus des colonnes isolées, incomplètement " digérée".

Valeur agronomique :

Ces grès continentaux sont des matériaux pauvres en cations et en oligo-éléments qui portent donc des sols de qualités chimiques médiocres, diminuées encore par le lessivage. L'intérêt agronomique des sols de ces régions dépendra donc surtout de leurs propriétés hydriques : les sols lessivés profondément et à squelette abondant sont trop secs et insuffisamment pourvus en argile. L'horizon argileux B des sols ferrugineux à horizon B rouge leur confère une certaine ca-

pacité de rétention d'eau et de cations mais il est enfoui sous des horizons sableux secs. De plus la compétition termitique y est forte et l'infiltration y est entravée par l'imperméabilité de la surface. L'arachide et quelques céréales peu exigeantes s'accommodent de ces terrains. Quant aux bas-fonds hydromorphes leur submersion ou engorgement saisonnier limite leur utilisation. La riziculture, qui nécessite un contrôle du plan d'eau, n'y a pas été essayée. En définitive ces régions sont peu exploitées en dehors des grandes vallées alluviales (maraîchages, mil). La culture cotonnière y est tentée mais il faut craindre érosion et épuisement rapide des terrains.

5/ LES SOLS HYDROMORPHES "LITHOMORPHES" LESSIVES A FORTE ACTIVITE DES VERS DE TERRE DE LA REGION POLI-TCHOLLIRE

Une pédogénèse particulière, fortement influencée par une forme d'activité biologique marque de vastes paysages du bassin de la Benoué, sur les roches du socle de la partie méridionale du Nord-Cameroun.

Sous ces climats plus humides des sols hydromorphes, lithomorphes, lessivés, travaillés par les vers, développés sur des roches feldspathiques voisinent avec des sols ferrugineux tropicaux lessivés, à concrétions ou indurés développés sur des matériaux plus quartzeux et l'on peut se demander s'ils n'y ont pas une certaine signification climacique. Ils apparaissent en effet même dans des positions topographiques de bon drainage externe, l'hydromorphie qui les marque résultant alors d'une péjoration du drainage interne en liaison avec une argilisation massive de matériaux feldspathiques. Ce confinement localisé à un horizon inférieur du solum crée des conditions hydriques favorables de l'activité de vers de terre. Leur tropisme vertical alternatif saisonnier entre l'oxygène du haut et l'humidité du bas construit une porosité verticale qui favorise à la fois l'infiltration et le dessèchement. Les sols travaillés par les vers présentent ainsi une perméabilité de surface extrêmement élevée (plusieurs centaines de cm/h au moins) s'annulant brutalement au contact des horizons argileux massifs sous-jacents (0,1 cm/h). La fluidification de la matière terreuse ingérée puis déféquée par les vers confère aux horizons qu'ils travaillent une homogénéité de teinte (gris-clair en sec) de texture (10 % d'argile) et de structure (massive avec porosité de galeries et de cavités, surmontée de boules et turricules ma-

melonnés) avec mélange intime des matières organiques et minérales. Malgré la stabilité structurale à l'état sec qui en résulte la matière de ces horizons est lessivée en argile vraisemblablement quand elle passe par l'état de liquidité au débouché des vers. Le hérissé-ment de turricules en surface de ces "sols dentelle" y entrave le ruissellement superficiel et la forte perméabilité de surface rend celui-ci peu fréquent en topographie plane. L'humidité qui échappe à l'évaporation entre les pluies est susceptible d'un déplacement oblique interne au-dessus de l'horizon imperméable et le processus de lessivage - appauvrissement en argile peut lui être attribué.

L'épaississement progressif des horizons lessivés ainsi formés diminue à la longue l'intensité du phénomène ce qui fixe leur épaisseur à 40cm environ. La discrétion des manifestations colorées de l'hydromorphie dans ces horizons de facture faunique (limitées à des petits filets rouille peu contrastés, gainant les radicelles) ne résulte pas d'un lessivage total du fer (il en reste 2 % environ) mais de la grossièreté de la porosité tubulaire qui les draine et des conditions réductrices maintenues dans les volumes massifs, donnant à la matière une teinte uniforme grise (1 % de matière organique). Des taches brun-rouges d'oxydation apparaissent d'ailleurs en dessous, à la base des horizons A, puis ce sont des petites concrétions ferrugineuses noires qui forment souvent un horizon Bfe peu épais. Enfin une importante carbonatation en gros nodules peut apparaître à la base des horizons B. Exemple :

HUM 4.

Sur une pente de 2 % à proximité d'un collecteur faiblement imprimé sur un très vaste interfluve situé entre la chaîne de Poli et le Faro. Gneiss à biotite et amphibole à litage vertical, profondément altéré et friabilisé mais avec conservation de l'architecture. Savane arbustive claire. Pas de termitières mais un hérissé-ment continu de hauts turricules de vers sur un micro-relief en creux et bosses métriques. Horizons :

0 - 15cm : A1. Gris 10 YR 5/3, 3/2 humide, avec des petites plages de sables blanc-rosées 5 YR 8/3 inférieures à 2mm. Texture sableuse fine. Structure en sphéroïdes mamelonnés atteignant 2cm, durcis et plus ou moins soudés, remplissant des poches entre des secteurs massifs de même aspect, évidés par des gros tubes et cavités de vers de terre. Humectation rapide non suivie d'effondrement. Enracinement

fin et abondant de graminées, prospectant particulièrement le fond de ces poches de boulettes "polysphériques". Porosité tubulaire fine irrégulièrement répartie. Limite distincte de taches et structure.

15 - 55cm : ABg. Gris 10 YR 5.5/2, 3/2 humide, avec 20 % de taches millimétriques d'abord brunes 10 YR 5/6 et mal délimitées puis plus rouille 7.5 YR 5/6 à 4/4 et de forme tourmentée à contour net, à la base de l'horizon. Texture sableuse peu argileuse. Structure massive durcie, médiocrement stable à l'humectation, qui est en outre peu rapide. Fine porosité tubulaire. Enracinement fin et vertical. Limite tranchée et ondulée de couleur et texture.

55 - 65cm : Bfe. Petites concrétions (5mm) arrondies, à pâte noire, à surface jaune, et quelques graviers quartzeux et feldspathiques anguleux et résistants, emballés dans une matrice sablo-argileuse jaunâtre en sec, 10 YR 6/3, plus grise à l'état humide (7/4).

65 - 90cm : (B). Olivâtre 2.5 Y 6/4 avec des petites taches plus rouille 10 YR 6/6 et des plages plus grises 10 YR 5/2. Texture argileuse. Faiblement structuré en prismes 5 x 5/10cm durs, évités par les radicelles verticales et présentant des enduits grisâtres sur leurs faces et des petites facettes lissées pouvant être attribuées à des tensions de gonflement. Humectation lente suivie d'effondrement. Porosité tubulaire très fine. Limite tranchée par apparition de nodules carbonatés.

90 - 110cm : B-ca. Gros nodules carbonatés jaunis, de plusieurs centimètres presque jointifs, durs, emballés dans une matrice argileuse analogue à la précédente mais carbonatée dans sa masse. Quelques taches noires. Porosité faible. Limite graduelle.

110 - 200cm : BC. Même horizon mais de moins en moins carbonaté et de plus en plus feldspathique. Limite diffuse.

200 - 300cm : C. Roche altérée litée, à architecture conservée.

Caractères analytiques : Le pH est neutre jusqu'en B puis augmente au-dessus de 8 dans les horizons carbonatés et l'altération. La teneur en argile passe de 12 % en A à 45 % en B puis descend à 25 % en C. De même la teneur en fer total passe de 2 % en A à 8 % en B et même à 16 % en Bfe puis redescend à 6 % en C. La capacité d'échange est élevée en B (25 mé) et saturé en cations dans la totalité du profil (un peu de sodium) 1.5 % de matière organique à C/N de 15 en A1. Réserves minérales notables en dessous du B (50 mé).

Organisation dans le paysage :

Cette manifestation superficielle de l'activité des vers s'exerce sur une très grande superficie du bassin de la Benoué où elle affecte non seulement ces sols hydromorphes "à drainage externe possible" mais aussi des sols ferrugineux lessivés, des sols sodiques lessivés à

alcali, des sols vertiqués et elle y masque souvent les autres caractères morphologiques des horizons lessivés. Les sols hydromorphes lessivés présentant cet horizon de facture faunique surmontant un horizon argilisé massif et imperméable occupent toutefois la presque totalité des interfluves de vastes régions. La présence d'un horizon caillouteux à la base des horizons lessivés y est fréquente et cette couche grossière s'observe même dans des sols de faible évolution qui apparaissent dans les secteurs plus érodés. La végétation arborée s'installe mieux sur ces secteurs caillouteux que sur les sols hydromorphes dont le drainage interne est mauvais. Le travail des vers trie en outre quelques petits graviers (fragments de poteries charbon de bois, quartz) qui forment alors une couche discontinue à la base de la tranche malaxée (les archéologues tiennent compte de ce léger enfouissement des activités humaines qui peut donc se produire même sur un terrain régulièrement abaissé par l'érosion en nappe).

Valeur agronomique :

Les conditions brutalement contrastées d'aération et de confinement propres à ces sols lessivés et leur texture trop sableuse en surface pourraient rendre leur mise en valeur difficile et expliquer leur très faible utilisation agricole actuelle. Mais des facteurs historiques ou sociologiques peuvent aussi intervenir pour expliquer les très faibles densités d'implantation humaine sur ces terrains et les composantes de leur fertilité n'ont pas été en fait encore étudiées. L'accès à ces régions est difficile en saison des pluies car ces sols ne permettent pas une bonne tenue de l'infrastructure routière. Les qualités chimiques de l'horizon B paraissent correctes mais il est souvent trop profond pour que sa structure puisse être affinée et sa matière mélangée à celle des horizons sableux. Il n'est d'ailleurs pas certain qu'un brassage qui effacerait la différenciation due au lessivage améliore leur fertilité. L'activité des vers y est nettement contrariée par la mise en culture.

6/ LES SOLS SODIQUES DES HARDES DU DIAMARE

Le mot peul hardé désigne des terrains stériles qui ne portent ni culture ni végétation naturelle conséquente.

Dans la Diamaré ces surfaces stériles correspondent très fréquemment à des sols durcis dont la morphologie rappelle beaucoup celle d'un type de sols sodiques, les solonetz et solonetz solodisés de Russie et d'ailleurs. Les autres hardés peuvent y être de facture anthropique (abords de village) ou résulter d'une transformation superficielle de vertisols. Mais ces sols à morphologie de solonetz solodisés n'ont pas, bien souvent, la teneur en sodium échangeable de leurs "sosies" russes et qui est requise pour entrer dans la classe des sols sodiques. Le sodium paraissant tout de même responsable de la massivité de leur structure ils ont été considérés soit comme une variété tropicale de sol sodique lessivé à alcali se développant pour des teneurs en sodium assez faibles soit comme des sols fossiles qui ont perdu une partie du sodium ayant présidé à leur genèse.

Inversement il existe dans le département de la Benoué des sols sodiques ou apparentés, comparables à ceux de la région de Maroua mais dont la surface n'a pas l'aspect d'un hardé. La végétation apparemment spécifique des hardés du Diamaré n'est en réalité qu'une végétation contractée de composition plus sahélienne, adaptée au pédoclimat plus sec propre à ce type de sol. Le climat plus humide de la Benoué ne nécessite plus aussi impérativement cette adaptation et la détection des sols sodiques sur photographies aériennes et sur le terrain y est ainsi plus difficile. D'ailleurs, comme pour les sols rouges tropicaux, ces sols ne constituent plus, au sud de la Benoué, (parallèle 9) que quelques rares petits affleurements jusqu'au voisinage du parallèle 8.

Situation.

Les sols hardé sont situés en position haute par rapport aux vertisols mais la dénivelée peut être inférieure au décimètre : c'est le cas des petits affleurements vertiques en inclusions légèrement déprimées sur certains dômes hardé - ou des hardés en inclusions légèrement bombées dans les grandes plaines de vertisols. Sur les glacis de piedmont des inselbergs ils sont eux-mêmes commandés par des sols ferrugineux tropicaux, qui forment aussi des inclusions légèrement bombées sur certains dômes hardé.

La pente de leur surface est toujours faible, quelques ‰ à 2 % mais

sa planité permet un ruissellement qui laisse des marques d'érosion en nappe ou en ravines et ils échappent, de par leur situation, à l'inondation par les mayos. Mais les moindres irrégularités en creux retiennent l'eau de pluie qui y stagne plusieurs jours après les fortes averses car l'infiltration y est lente. L'action ^{éolienne} y est forte et les sables déplacés s'accumulent au collet des arbustes, dans les empreintes de bovins, sous le vent des termitières etc.

Erosion.

La planité, la situation en dôme et l'absence de végétation favorisent cette érosion éolienne d'effet limité mais surtout l'érosion hydrique qui est très importante du fait de l'imperméabilité du sol et de la mauvaise tenue à l'humectation de ses horizons et qui prend de haut en bas des formes diverses de gravité croissante : battance dû au "splash" sur les horizons limono-sableux de surface, érosion en nappe qui sculpte ces horizons en marche d'escalier par des "micro-falaises" de quelques centimètres, puis érosion en ravines par fluidification des horizons B sodiques dispersés par les eaux de ruissellement ou l'humidité interne (nappe, chenaux d'infiltration préférentielle).

Roche-mère.

Leur matériau originel est généralement moins argileux que celui des vertisols voisins (35 % contre 40 % par exemple) mais nettement plus que celui des sols ferrugineux (25-30 %). Leurs argiles sont, dans l'horizon B, de nature montmorillonitique comme dans les vertisols alors que l'argile des sols ferrugineux est essentiellement kaolinique.

Le sodium fixé en position échangeable sur le complexe absorbant des horizons B de ces sols et qui détermine leur pédogénèse provient de l'altération des feldspaths sodiques des roches du bassin versant. Son accumulation relative possible sous ces climats par le faible drainage interne qu'ils permettent (forte évaporation, néoformation d'argiles gonflantes) est commandée par une combinaison favorable de facteurs topographiques et parentaux (richesse en sodium et en sables résistants).

Morphologie.

Les caractères morphologiques diagnostiques des différents sols sodiques du Nord-Cameroun sont :

- en surface un vernis squameux discontinu noir-rougeâtre dû à une algue, des cailloux de quartz roux clairsemés ou en lentilles, des plages de sables grossiers déliés, des termitières gris-clair à gros conduits verticaux, une végétation arbustive contractée, des plages d'herbes d'enracinement peu profond, des marques d'érosion éolienne. Ces caractéristiques des hardé du Diamaré n'apparaissent plus guère sur les sols sodiques situés au sud du parallèle 9 qui portent souvent un horizon travaillé par les vers et une végétation ordinaire.
- un horizon A1 gris-clair rosé, strié souvent de petits filets rouille, sableux à sablo-limoneux, d'abord lamellaire puis massif cohérent, de faible porosité, (intergranulaire et vésiculaire) de faible activité biologique, peu organique, parcouru de fines fissures, de transition très nette. C'est cet horizon que l'érosion en nappe amincit ou fait disparaître de place en place.
- un horizon A2 (discontinu) de contact planique, blanchissant au séchage, sableux et particulaire avec concentration de petits graviers résiduels et englobant quelques fragments en cours de digestion, de l'horizon sous-jacent. Forte porosité intergranulaire et vésiculaire.
- Un horizon AB formé d'une couche de prismes arrondis à la partie supérieure (colonnettes) par transformation corticale en l'horizon précédent. Couleur grise (parfois rougissement discret du cortex ou du coeur des colonnes), texture sablo-argileuse, fentes entre les prismes comblées par chute des sables sus-jacents.
- un horizon (B) massif, cohérent, dur ou durcissant à l'air, de très faible porosité, gris et argilo-sableux avec parfois des petites concrétions ferro-manganiques rondes à patine noire.
- un horizon BCa carbonaté en nodules ou en pseudomycélium, de même texture mais de structure polyédrique nette.

Caractères analytiques.

La réaction des horizons A est acide ou faiblement acide (5 à 6,5) le minimum étant mesuré dans l'horizon A2. Celle des horizons B est très alcaline (8 à 9,5) sous l'influence du sodium et des carbonates.

La conductivité de ces sols est faible, ce ne sont donc pas des sols salés.

Pauvreté en matière organique (moins de 1 %) et en argile, nature kaolinitique de celle-ci expliquent la faible capacité d'échange des horizons A : 5 à 10 mé. Celle des horizons B, plus argileux et montmorillonitiques atteint 20 à 25 mé et elle est alors saturée à 80-100 % en cations échangeables.

Parmi ces derniers Ca^{++} est dominant mais les taux de magnésium et de sodium croissent de haut en bas et atteignent respectivement 7 et 4 mé soit 25 % et 15 % de la capacité d'échange en B. Or une teneur de 8 % en sodium suffit à dégrader la structure lorsque la capacité d'échange est faible. Pour certains auteurs le magnésium aurait un effet destructurant analogue qui s'ajouterait ou se substituerait à celui du sodium mais ce rôle est controversé (le magnésium est généralement abondant aussi dans les sols hydromorphes).

La teneur en fer libre (0,5 à 1 %) est maximum juste sous le contact planique (sommet des colonnettes).

Valeur agronomique.

Les teneurs en sels et en sodium sont encore trop basses pour gêner les cultures. Les qualités chimiques de l'horizon B sont correctes.

Mais les caractéristiques physiques et hydriques des hardés sont franchement défavorables et la rareté de la végétation naturelle en témoigne. Le sous-solage (ouverture sans retournement) crée une structure par fragmentation et un micro-relief qui augmentent le stockage de l'eau. Mais il doit être suivi d'un morcellement plus poussé des mottes et d'une culture de graminée qui entretient et développe la structure et la porosité ainsi créées. Un moyen plus économique pour augmenter la rétention d'eau consiste à clore de toutes petites parcel-

les par des diguettes comme en culture de muskuari. Ce dernier procédé est actuellement essayé en riziculture. La culture cotonnière après sous-solage, essayée depuis 1960 ne protège pas le sol de l'érosion. L'imperméabilité de ces sols qui exacerbe l'érosion en nappe et en ravines provoque en effet rapidement la destruction des surfaces hardé du Diamaré. Elle résulte d'un durcissement progressif de leur horizon B sodique, ce qui a découragé petit à petit la végétation naturelle et place ces sols dans le stade ultime de leur développement (sénilité) avant auto-destruction.

7/ LES SOLS DES PLAINES D'INONDATION DU LOGONE.

Les sols des yaérés ne sont bien connus qu'au sud du parallèle 11 (Bogo-Pouss) où ils ont été cartographiés à 1/10.000ème en 1958-60 en vue d'aménagements rizicoles. La construction, à cet effet, de la digue Yagoua-Pouss a permis de récupérer pour la culture des terrains antérieurement inondés.

- Quatre classes de sols y sont représentées :
 - Des sols peu évolués (d'apport alluvial récent)
 - Des vertisols (à drainage externe nul)
 - Des sols hydromorphes (minéraux, à gley ou à pseudogley)
 - Des sols sodiques (à structure dégradée)
- En fait ces derniers se situent plutôt en bordure des zones d'inondation et ils échappent donc généralement à la submersion saisonnière comme les sols des différents systèmes dunaires (sols ferrugineux tropicaux).
- Les sols peu évolués apparaissent sur les épandages récents apportés soit par le Logone (région de Pouss) et ses défluentés soit par les mayos venant des monts Mandara (région de Guirvidig). La stratification des dépôts n'y est pas effacée par la pédogénèse qui s'y traduit par l'apparition d'un horizon humifère et de quelques taches rouille d'hydromorphie (sols peu évolués d'apport alluvial, hydromorphes tachetés). Leur matériau comporte des bancs de granulométrie variée mais à dominante limoneuse. Un recouvrement limoneux gris d'un à quatre décimètres d'épaisseur, assez organique s'observe d'ailleurs par endroits sur les autres types de sols.
D'abord bien différencié (limite inférieure nette) il est progressivement incorporé au sol par les agents pédogénétiques. Il y a ainsi rajeunissement des profils par apport.

- Les vertisols (placés autrefois dans les sols hydromorphes à nodules calcaires) présentent un drainage externe nul ou réduit dû à la fois à la planité du terrain, à l'inondation saisonnière et à la nature argileuse du matériau. Ils portent une végétation graminéenne à base de Vetiver et d'Hyparrhenia avec quelques arbustes (Acacia seyal et sieberiana, Tamarindus indica, Balanites aegyptiaca) en position exondée (termitières, buttes).
- Ces sols présentent la couleur foncée, la texture argileuse (45-60 %) sans différenciation verticale importante, la structure large prismatique puis en plaquettes obliques, la compacité, la cohésion et la carbonatation nodulaire qui sont caractéristiques des vertisols ainsi que leurs caractères de surface (fentes de retrait et effondrements). Ils sont en outre fréquemment marqués de taches rouille d'hydromorphie. Leur développement atteint souvent deux mètres ce qui les distingue des vertisols lithomorphes qui sont habituellement moins épais, moins typés et moins argileux. La dessiccation saisonnière les atteint sur un mètre d'épaisseur environ, la rétention d'humidité étant importante en profondeur avec nappe phréatique plus profonde en saison sèche que dans les sols hydromorphes. La carbonatation apparaît à profondeur variable et on y observe aussi quelques très petites concrétions noires.
- Ils contiennent peu de matière organique, 1 % environ en surface avec encore 0,3 % à 1 m de profondeur, le rapport C/N étant de 10 à 15. Leur pH est neutre ou légèrement acide en surface, franchement basique dans les horizons carbonatés. Le sodium échangeable est parfois en quantité notable dans les horizons profonds. Leur capacité d'échange est élevée, de l'ordre de 30 mé et presque saturée en cations avec dominance du calcium. Les réserves cationiques sont en outre élevées et le phosphore total suffisant. Ils conviennent à la culture du mil répiqué et à la riziculture mais leur teneur en azote doit être améliorée. Si le drainage externe est correct ils peuvent aussi porter des cotonniers (Tchad).
- Les sols hydromorphes occupent, avec les vertisols, les plus vastes superficies. Leur évolution est dominée par un engorgement temporaire dû à la planité du paysage, à l'inondation, à la faible profondeur de la nappe phréatique et sur les matériaux argileux à

un mauvais drainage interne. Leur végétation est essentiellement graminéenne, avec quelques arbres dans les secteurs exondés (*Faidherbia albida*, *Zyziphus mauritiaca*, *Balanites aegyptiaca*)

- Sur matériau argileux ces sols ont une couleur grise à brune tachée de rouille, une texture argilo-sableuse ou argileuse, plus sableuse en surface, une structure saisonnière prismatique ou polyédrique grossière avec une faible porosité dans les horizons B. Leur pH est peu acide à basique et il augmente dans les horizons profonds qui sont généralement sodiques. Ils contiennent 1 à 2 % de matière organique à rapport C/N de 10 à 14. La capacité d'échange, qui est de l'ordre de 20 mé, n'est pas entièrement saturée en cations échangeables. En situation inondée ils conviennent à la riziculture, en situation exondée et bien drainée ils peuvent convenir au cotonnier.
- Sur matériau sableux les sols sont plus acides, plus perméables et plus désaturés avec de faibles capacités d'échange. En situation exondée ils peuvent porter du mil, des arachides ou des maraîchages.
- Les sols sodiques (ou sols à alcali, ou hardés, ou sols halomorphes) sont localisés en bordure des zones d'inondation ou en légers bombements, parfois réguliers, émergeant des zones inondées. Ils sont plus nombreux au nord (Pouss) qu'au sud (Yagoua) ce qui a été attribué à une diminution de la pluviosité et donc du drainage. La végétation arbustive y est rabougrie et clairsemée, la strate herbacée disparaît en saison sèche. Ils sont très compacts et très imperméables dans l'horizon B où le rapport Na/Ca dépasse largement 0,15 (critère de classe) mais peu salés. Ils présentent fréquemment un horizon supérieur sableux à contact inférieur planique, la texture de l'horizon B étant sablo-argileuse à argilo-sableuse. Le pH est très élevé dans l'horizon B na, leur teneur en matière organique est faible, la capacité d'échange varie de 5 à 30 mé selon la teneur en argile. Leur mise en valeur nécessite à la fois de diminuer leur compacité et de drainer le sodium en excès.

Conclusion - Les sols des yaérés, vertiques et hydromorphes, soustraits à l'inondation par l'indiguement du Logone conviennent à la riziculture par leur teneur en phosphore (près de 1°/oo) et en potassium (0,5 mé) mais l'azote (0,6 à 1,0°/oo) constitue souvent un facteur limitant. Le pH de surface doit rester voisin de 6 pour favoriser l'ammonification plutôt que la nitrification. Les textures argileuses

confèrent au sol une imperméabilité favorable à cette culture mais elles sont plus difficiles à travailler et à humidifier. La faible profondeur de la nappe phréatique compense l'aridité du climat.

Les sols de dunes : Les dunes et/ cordon dunaire, qui échappent à l'inondation portent des sols ferrugineux tropicaux apparemment peu différenciés mais qui peuvent être au contraire très profondément lessivés. Leur texture est entièrement sableuse (moins de 5-10 % d'argile), leur teneur en matière organique est faible (0,7 % en surface à rapport C/N de 8 par exemple). Leur capacité d'échange est par conséquent faible aussi, de l'ordre de 1 à 4 mé et saturée aux 3/4 dont 0,5 mé de potassium. La végétation comporte de nombreux rôniers et près des villages des *Faidherbia*. Ces sols ne peuvent guère porter que des cultures de mil et d'arachide et cette dernière culture est d'ailleurs limitée par leur pauvreté en phosphore, en dehors des zones habitées.

III - REMARQUES SUR LES TRAVAUX CARTOGRAPHIQUES EXISTANT ET LES PERSPECTIVES D'AVENIR

Les paysages pédologiques du Nord-Cameroun associent plusieurs types de sols, qui sont souvent communs à plusieurs de ces paysages et leur originalité tient surtout dans l'organisation de ces unités pédologiques en fonction des différentes composantes du modelé.

Dans les cartes à grande échelle il a été parfois possible de dessiner les contours de chaque type de sol et leur éventuelle organisation séquentielle peut être tirée d'une confrontation des cartes pédologique et topographique.

Dans les cartes à grande échelle le cartographe a eu le choix entre deux solutions très différentes :

- faire figurer seulement la pédogénèse considérée comme climacique, ou la plus évoluée, ou la plus étendue, à condition qu'elle recouvre une proportion "normale" du paysage. Dans cette perspective le paysage 4 apparaîtrait en unité simple de sols ferrugineux tropicaux lessivés, les pédogénèses lessivantes et hydromorphes associées étant considérées comme leur "cortège" normal de bas^{de} versant. Le paysage 3 sera de même représenté par les sols rouges tropicaux sans mentionner les sols bruns et vertiques de bas de pente. Les unités supérieures de la classification, juxtaposition et association ne sont utilisées que lorsqu'il n'existe pas d'organisation séquentielle (paysage 2 par exemple) ou lorsque les pédogénèses associées présentent un développement "inhabituel", atteignant par exemple 40 % de la surface.
- ou bien utiliser dans chaque cas ces unités taxonomiques supérieures. Mais cette classification séquentielle se limite actuellement à une énumération des différentes pédogénèses associées en indiquant leur succession topographique éventuelle. Elle ne fait donc pas ressortir la parenté qu'elles peuvent présenter (le lessivage dans le paysage 4, l'argilisation dans le paysage 3, l'antagonisme entre l'argilisation et l'érosion dans le paysage 2 etc). Elle n'exprime pas non plus la superficie couverte

par chaque type de sol, ni l'élément de modelé qui est concerné et encore moins les caractéristiques de celui-ci. Il devrait être cependant possible à l'avenir d'aboutir à une classification des paysages pédologiques qui intègre ces différentes données dans un système d'abord descriptif, qui conduirait tout naturellement ensuite à une construction génétique. Cette dernière ne sera possible toutefois que lorsque la part imputable à la dynamique actuelle des sols et du modelé aura été précisée et les grands traits paléo-climatiques déterminés avec une bonne probabilité.

OUVRAGES CONSULTES ET A CONSULTER

GENERALITES.

PRECIS DE PEDOLOGIE par Ph.DUCHAUFOR, Masson édit. 481 p. édition de 1970.

LA PEDOLOGIE par G.AUBERT et J.BOULAIN, Coll. Que sais-je 1967, 126 p.

LE PROFIL CULTURAL par S.HENIN et alt., édition 1969, 332 p.

MINERALOGIE DES ARGILES par S.CAILLIERE et S.HENIN 1963, 355 p. Masson édit.

GEOLOGIE DES ARGILES par G.MILLOT 1964, 499 p., Masson édit.

MICROMORPHOLOGIE : Fabric and mineral analysis of soils par R.BREWER 1964, 470 p.

LA VIE ANIMALE DANS LES SOLS par G.BACHELIER 1963, ORSTOM, 278 p.

LA BIOLOGIE DES SOLS par Y. DOMMERGUES Coll. Que sais-je 125 p.

L'EVOLUTION DES SOLS. ESSAI SUR LA DYNAMIQUE DES PROFILS. par Ph.DUCHAUFOR, 1968, 91 p.

LA GENESE DES SOLS EN TANT QUE PHENOMENE GEOLOGIQUE par H.ERHART 1967, Masson, 175 p.

DESCRIPTION.

GLOSSAIRE DE PEDOLOGIE : Description des horizons en vue du traitement informatique. 82 p., 1969. - Description de l'environnement en vue du traitement informatique 173 p., 1971.

F A O : Directives pour la description des sols 1968, 58 p.

CODE MUNSELL DES COULEURS, Munsell soil color charts U S A.

Manuel de prospection pédologique par R.MAIGNIEN 1969, 132 p.

LES CULTURES TROPICALES,

Collection dirigée par R. COSTE des Techniques agricoles et productions tropicales. Le bananier - le palmier à huile - les plantes à épices - l'Ananas - le Riz - le cocotier - le cotonnier - les plantes fourragères tropicales - le caféier - l'arachide - le cacaoyer - Les plantes vivrières par R.CERIGHELLI 1955

CLASSIFICATION :

FRANCAISE :

Tableau des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la section de Pédologie de l'ORSTOM, 1965, Cah.ORSTOM, vol.III, fasc.3, pp. 269-287.

La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride. Sols Afr., vol. IX, n° 1, pp. 97-105.

C. P. C. S. Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Ecole Nat. Sup. Agr. Grignon 1967, 87 p.

AMERICAINE :

U. S. D. A. 1960-69. Soil classification. A comprehensive system 7th approximation. Soil survey staff, soil conservation service 295 p.

PERIODIQUES TRAITANT DE PEDOLOGIE

Sols africains (B I S, bureau inter-africain des sols) -
Cah. ORSTOM série Pédologie

Soil Science (U S A).

Journal of Soil Science (G.B.)

Soils and Fertilisers (Commonwealth)

Annales agronomiques I N R A (France)

Pédologie (Belgique)

Soviet Soil Science

Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol.

Geoderma.

Bulletin du groupe français des argiles.

Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, série D.

PUBLICATIONS SUR DES SOLS DU CAMEROUN OU APPARENTES

ETUDES PEDOLOGIQUES DE L'ORSTOM-IRCAM.

AU CAMEROUN : 192 titres échelonnés de 1950 à 1972 (études régionales principalement), consultables à la bibliothèque centrale du Centre ORSTOM de Yaoundé.

ETUDES PEDOLOGIQUES DE L'ORSTOM-PARIS TRAITANT DU CAMEROUN, 10 titres dans les cahiers ORSTOM série Pédologie 1964 à 1971 et 2 titres dans les mémoires et documents de l'ORSTOM.

Notice explicative de la carte pédologique du Cameroun Oriental à 1/1.000.000 par D. MARTIN et P. SEGALEN, 1966, 2 cartes, 125 p. ORSTOM.

Notice explicative de la carte pédologique du Cameroun Occidental à 1/1.000.000 par M. VALLERIE 1968, 70 p., ORSTOM Yaoundé.

La géomorphologie et les sols du Cameroun. par P. SEGALEN 1967, Cah. ORSTOM, sér. Pédol. V 2, pp. 137-187.

Le cuirassement des sols en Guinée par R. MAIGNIEN 1958, 239 p.

The soils and Ecology of West Cameroon par P. HAWKINS et M. BRUNT 1965.

Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées par H. PAQUET 1969. Mém. Serv. Géol. Als. Lorr.

Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. par G. SIEFFERMANN 1969, 290 p.

Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique par G. BOCQUIER 1971, 364 p.