

LES SOLS ROUGES DU NORD-CAMEROUN

par

D. MARTIN*, G. SIEFFERMANN**, M. VALLERIE***

RÉSUMÉ

Les auteurs étudient un type particulier de sols du Nord-Cameroun, formés sur roche métamorphique ou volcanique basique sous climat tropical. Après une étude des principaux facteurs de la pédogenèse de ces "sols rouges" (climat, roche-mère, topographie), ceux-ci sont étudiés du triple point de vue de leur morphologie, de leurs caractéristiques physiques et chimiques et de leurs minéraux argileux. Les conclusions tirées de cette étude permettent de cerner les principaux critères de caractérisation de ces sols et de passer en revue les processus pédogénétiques, qui sont à l'origine de leur formation.

Dans une dernière partie, après une revue des divers types de sols, de la zone tropicale et méditerranéenne qui pourraient se rapprocher des "sols rouges", les auteurs, qui proposent pour ces sols l'appellation "sols rouges tropicaux", discutent de la place qu'il faut leur donner dans la classification pédologique française.

- 1 — INTRODUCTION
- 2 — LES FACTEURS DE LA PEDOGENESE
- 3 — ETUDE DES SOLS
 - 3.1 Caractéristiques morphologiques.
 - 3.2 Caractéristiques physiques et chimiques.
 - 3.3 Etude des minéraux argileux.
 - 3.4 Essai d'explication de la pédogenèse.
- 4 — PLACE DANS LA CLASSIFICATION
5. Conclusion

* Maître de Recherches. Directeur du Centre O.R.S.T.O.M. de Libreville, Gabon.

** Maître de Recherches. Centre O.R.S.T.O.M. de Yaoundé, Cameroun.

*** Chargé de Recherches. Centre O.R.S.T.O.M. de Yaoundé, Cameroun.

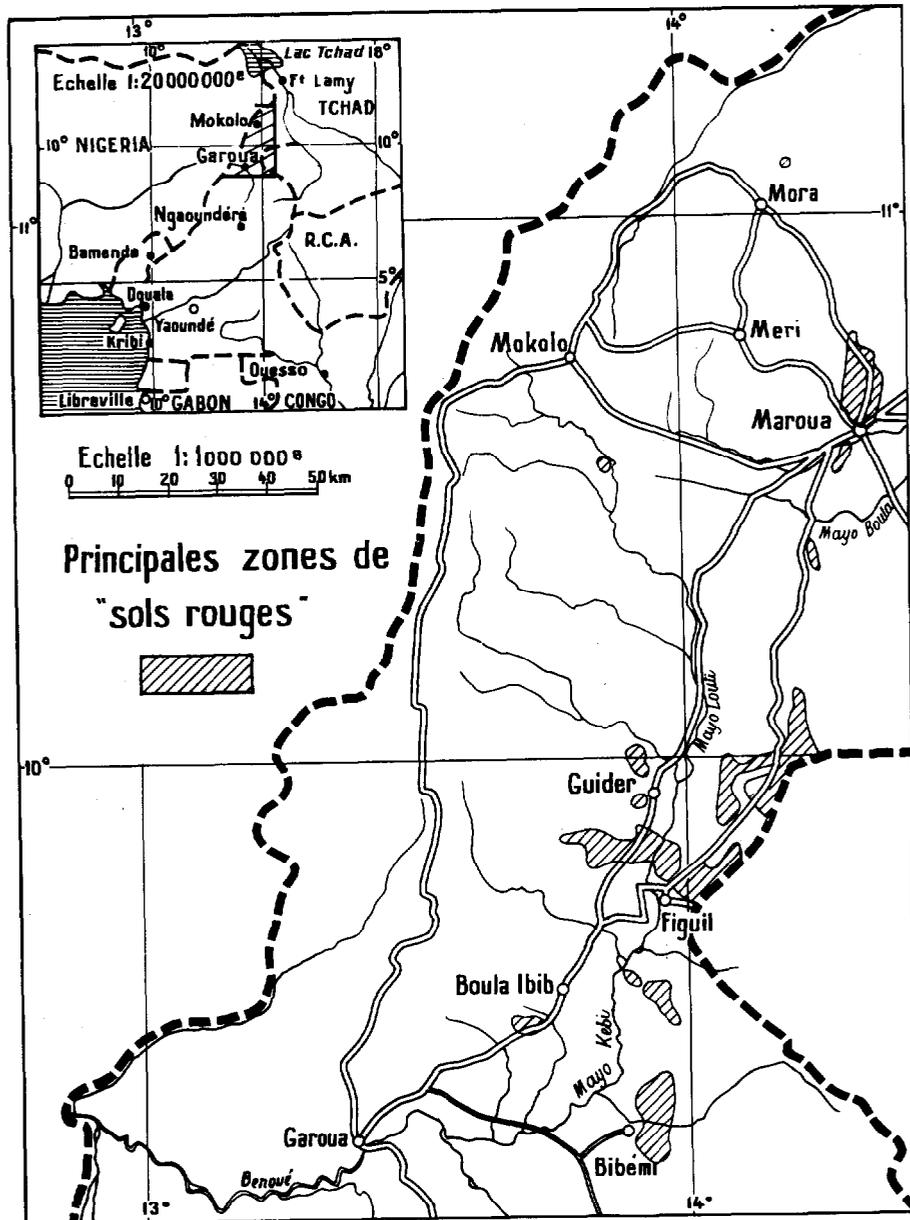


Figure 1

1 - INTRODUCTION

Les "Sols Rouges" du Nord-Cameroun ont été observés depuis plusieurs années déjà (M. Curis, 1954 ; M. Curis et D. Martin, 1956) mais on les rapprochait, soit des sols rouges méditerranéens, soit des sols ferrugineux tropicaux, ces derniers, particulièrement les sols ferrugineux tropicaux lessivés, étant alors peu connus au Cameroun. Ce n'est qu'après la cartographie systématique du Nord-Cameroun, au nord de Garoua, et une meilleure connaissance des sols ferrugineux tropicaux au sud de Garoua, qu'on s'est aperçu de l'originalité des "sols rouges".

Dans cet article, nous nous proposons, après avoir situé ces sols géographiquement et passé en revue les principaux types de roches sur lesquels ils se forment, de faire une étude complète des "sols rouges" : description de profils, caractéristiques physiques et chimiques, étude des minéraux argileux. Dans une dernière partie nous nous efforcerons d'établir une corrélation entre ces sols et ceux semblables déjà étudiés dans d'autres pays, et de discuter la place qu'il faut leur donner dans la classification française.

2 - FACTEURS DE LA PÉDOGENÈSE.

2.1 Localisation.

Les "sols rouges" sont localisés essentiellement au nord du parallèle de Garoua, ils sont fréquents jusqu'à Maroua et on peut les retrouver jusqu'à Mora. Ils sont associés à des bandes de roches métamorphiques diverses, depuis Bibémi jusqu'au nord de Maroua, en passant par Boula-Ibib, Guider et Figuil. La carte jointe montre l'extension de ces sols dans le Nord-Cameroun (Fig. 1).

2.2 Climatologie.

La pluviométrie sous laquelle on trouve les "sols rouges" s'étale de 800 à 1000 mm, c'est-à-dire essentiellement sous climat soudanien à soudano-sahélien (1) : le régime pluviométrique est typiquement tropical, avec une forte saison sèche de 5 à 6 mois et une saison des pluies bien arrosée (Fig. 2).

La température moyenne annuelle est élevée : 28°1 à Garoua, 28°7 à Maroua. On note les maxima en avril et octobre, début et fin des pluies, et les minima en décembre et août, pleine saison sèche et pleine saison des pluies.

L'évaporation est très élevée à Garoua (2380 mm) et surtout à Maroua (3500 mm) (2). L'insolation est de 2780 heures à Garoua.

Le degré hygrométrique présente un très grand contraste entre saison sèche et saison des pluies : en saison sèche, les minima de 10% ou moins sont fréquents de janvier à mars ; en saison des pluies les maxima de plus de 90% sont courants.

L'indice d'aridité de Martonne est compris, entre 20 et 25. Le drainage calculé (Hénin) est de l'ordre de 110 à 150 mm en adoptant le coefficient $\alpha = 0,75$ pour des sols argilo-sableux.

$$D = \frac{\alpha \delta P^3}{1 + \alpha P^2} \quad \text{avec} \quad \delta = \frac{1}{0,15 T - 0,13} \quad \begin{array}{l} P = \text{Pluviométrie} \\ T = \text{Température moyenne} \end{array}$$

(1) Service météorologique 1960.

(2) Les mesures d'évaporation sont effectuées à l'évaporomètre Piche.

Le climat est caractérisé par une forte agressivité en saison des pluies (pluviométrie et température élevées). Le drainage calculé paraît faible, et les phénomènes de lessivage et d'exportation d'éléments minéraux hors des profils seront réduits.

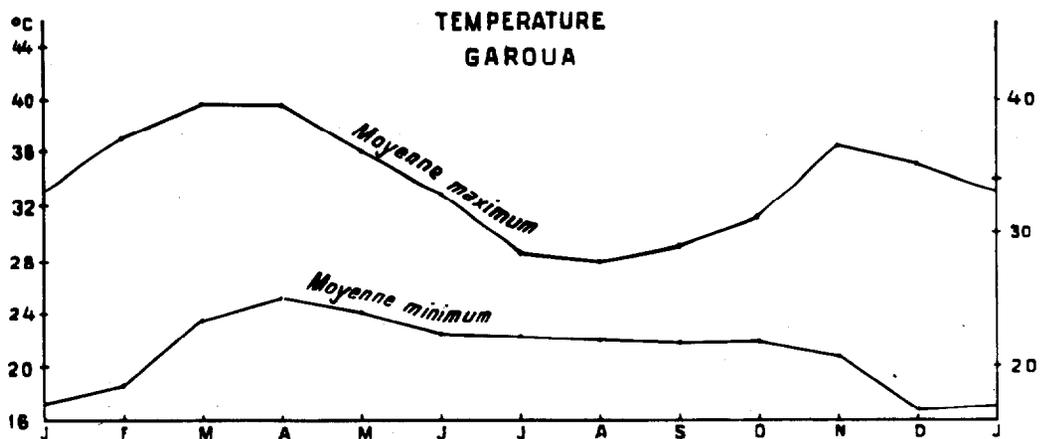
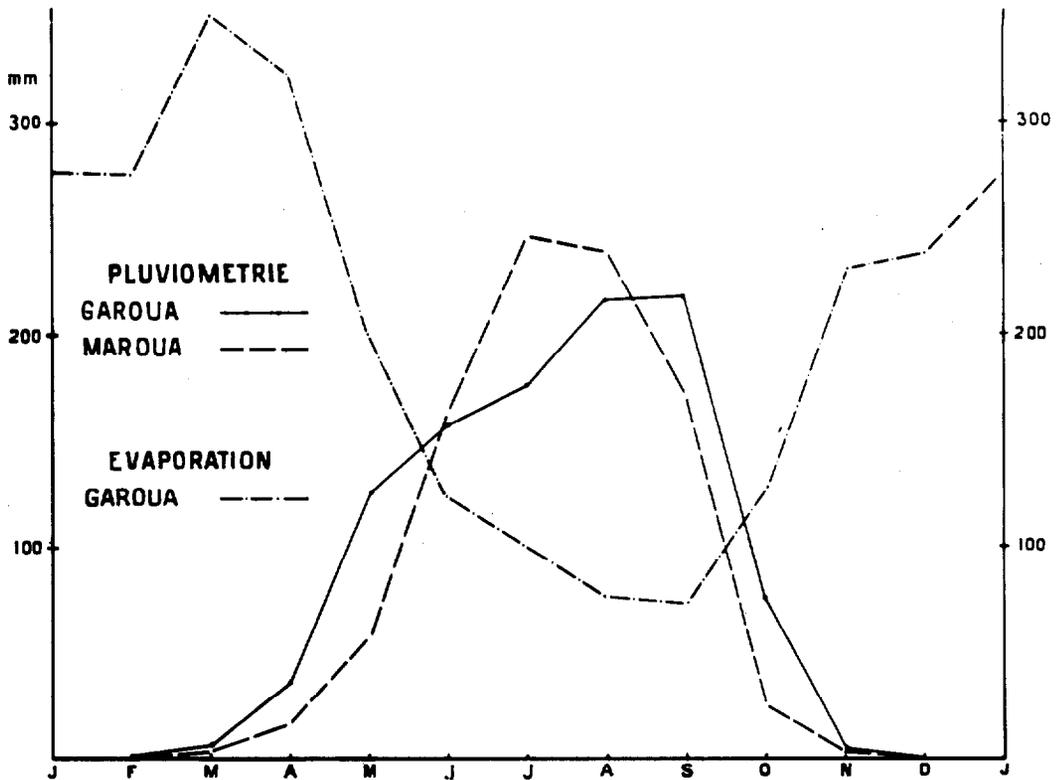


Fig 2

2.3 Roche-mère.

Les "sols rouges" n'ont été observés que sur des roches métamorphiques ou volcaniques riches en minéraux altérables : roches vertes (3), micaschistes et schistes à amphibole, gneiss et embrechite à amphibole. Du point de vue chimique, ce sont des roches basiques, riches en calcium, en magnésium, ou en calcium et magnésium.

Les teneurs en fer sont toujours supérieures à 7% et peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées.

Le tableau I nous montre les variations importantes de composition chimique observées sur quelques roches-mères des "sols rouges". On peut distinguer : les gneiss et les embrechites, assez riches en quartz et moyennement pourvus en fer et en bases, et les micaschistes et roches vertes, beaucoup plus riches en fer et en alcalino-terreux. Cette distinction se retrouvera fréquemment dans l'étude des sols ci-après.

Tableau I - Composition chimique de quelques roches-mères.

| N° Echant. | Type de roche | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | H ₂ O |
|------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-----|------------------|-------------------|------------------|
| BZR 33 | Micaschiste | 56,5 | 16,3 | 10,3 | 1,2 | 2,2 | 6,7 | | | 5,7 |
| KAE 824 | Micaschiste | 62,7 | 17,1 | 7,2 | 0,7 | 10,0 | 1,4 | | | 1,3 |
| GDR 14 | Embrechite | 59,0 | 19,6 | 7,7 | 0,25 | 4,9 | 1,2 | 3,0 | 4,3 | 0,4 |
| MAR 654 | Roche verte | 56,0 | 17,1 | 11,3 | 0,15 | 6,2 | 3,0 | 0,9 | 3,2 | 2,0 |
| R 14 | Roche verte | 49,2 | 16,8 | 10,3 | 0,9 | 11,8 | 6,7 | 0,4 | 1,9 | 2,0 |
| R 15 (4) | Roche verte | 46 | 11,5 | 19,0 | 2,1 | 11,4 | 5,7 | 1,3 | 1,5 | 1,6 |

2.4 - Type de relief et topographie.

Les "sols rouges" sont observés dans deux situations géomorphologiques différentes : collines à relief très accidenté, entre 400 et 600-900 m, en bordure de la plaine tchadienne, et les piedmonts qui leurs sont associés ; surface d'aplanissement complexe du socle métamorphique, très disséquée, à nombreux inselbergs granitiques, qui constitue le bassin du Mayo Kebi entre 250 et 420 m, au sud de la ligne de partage des eaux Tchad-Benoué. Dans les deux cas, il s'agit d'un paysage jeune et constamment rajeuni par l'érosion.

Sur les collines des environs de Maroua (Photo 1), les pentes sont toujours fortes et les affleurements rocheux sont fréquents. Au pied de ces collines, l'épandage colluvial et alluvial porte aussi des sols rouges, qui ont des caractéristiques spéciales et passent aux vertisols par suite des pentes beaucoup plus faibles (inférieures à 10%).

Dans le bassin du Mayo Kebi, on observe des paysages variés. Autour de Bidzar, le paysage est accidenté et les "sols rouges" alterment avec des sols peu évolués. Aux environs de Guider et au nord-est de Bibemi (Photo 3), le paysage est ondulé, et les "sols rouges" y alterment avec des vertisols et des sols peu évolués en fonction de la topographie : les "sols rouges" occupent le sommet des collines.

Il faut insister sur le fait que, dans les diverses situations géomorphologiques et topographiques où l'on observe les sols rouges, le drainage externe est toujours parfaitement assuré.

(3) Nous appelons "roche verte" les roches du complexe vulcano-sédimentaire de Maroua (Dumort, 1962) : il s'agit le plus souvent de roches volcaniques variées, légèrement métamorphisées.

(4) R 14 et R 15 d'après J. Pias et E. Guichard (1958)

3 - ÉTUDE DES SOLS.

3.1 - Caractéristiques morphologiques.

3.1.1 - DESCRIPTION DE PROFILS.

Un des profils les plus typiques par la succession des horizons est celui observé sur les collines de Maroua : la pente de ces collines est particulièrement forte, mais le profil est cependant bien développé (Photo 2).

MAR 65.

Sortie nord de Maroua par la route de Mora.

Collines à fort relief dominant la plaine tchadienne. Pente de 30 à 50%.

Végétation très dégradée de savane arbustive. Dominance de *Boswellia* sp. plus haut sur la pente.

Roche-mère : roche verte de Maroua. Nombreux cailloux et pierres en surface du sol.

| | |
|------------|---|
| 0 à 7 cm | Brun-rouge (3,75 YR 4/4) et rouge (3,75 YR 4/6) sec ; argilo-sableux et graveleux ; structure polyédrique fine bien développée ; dur, mais friable humide ; bonne porosité d'agrégats ; assez nombreuses racines. |
| A 11 | |
| 7 à 15 cm | Rouge foncé (2,5 YR 3/6) sec et humide ; argileux, plus graviers et cailloux ; structure polyédrique à nuciforme fine très bien développée ; peu dur à dur, et friable humide ; bonne microporosité ; quelques racines d'arbustes. |
| A 12 | |
| 15 à 40 cm | Rouge foncé (1,25 YR 3,5/6) sec et humide ; argileux, plus graviers et cailloux plus ou moins abondants par place ; ébauche de macrostructure prismatique en l'absence de cailloux, structure polyédrique fine très bien développée ; peu dur à dur, et friable humide ; bonne porosité par assez nombreux pores de 0,5 à 1 mm, en plus de la porosité d'agrégats ; racines peu nombreuses. |
| B | |
| 40 à 60 cm | Rouge (2,5 YR 4/6) sec et humide avec des taches jaunes (6,25 YR) de roche altérée de plus en plus nombreuses ; argilo-sableux à argileux ; structure polyédrique fine bien développée ; bonne microporosité ; dur et friable humide. |
| BC | |
| 60 cm | Roche altérée de couleur interne jaune-rouge (6,25 YR 6 à 7/6) mais toutes les surfaces de séparation sont rougies ; sablo-argileux et limoneux ; pas de structure sauf par les surfaces structurales rougies de la roche ; meuble, puis de plus en plus dur en profondeur. |
| C | |

Sur micaschiste, nous avons observé le profil suivant :

BZR 5

Sur la route Guider-Bidzar.

Terrain plat dans paysage de collines.

Roche-mère : micaschiste.

Savane arbustive. Pierres et cailloux de quartz en surface.

| | |
|------------|---|
| 0 à 5 cm | Brun-rouge (5 YR 4/4) ; sable fin ; structure finement polyédrique peu développée ; bonne porosité ; peu dur. |
| A 1 | |
| 5 à 35 cm | Rouge (2,5 YR 4/6) ; sablo-argileux et graveleux ; structure polyédrique moyennement développée, porosité faible ; dur ; nombreux graviers de quartz. |
| B | |
| 35 à 75 cm | Brun clair (7,5 YR 5/6) ; sablo-argileux ; à tendance massif et peu structuré ; peu dur à dur ; porosité faible ; rares concrétions noires et rouges. |
| BC | |

75 cm Roche altérée de couleur brun-jaune : schistosité visible.
C

Sur un gneiss assez riche en fer, la couleur rouge est bien marquée :

KEB 43

Entre Bidé et Wanfango (nord-est de Bibemi).

Assez plat sur une ligne de crêtes dans un paysage de collines ondulées.

Roche-mère d'aspect gneissique à grain assez fin, avec beaucoup d'éléments verdâtres. Quelques blocs rocheux à peu de distance et petits graviers de quartz rubéfié en surface.

Savane bien arborée, non cultivée.

0 à 15 cm Brun-rouge foncé à rouge foncé (2,5 YR 3/4 à 3/6) ; sableux fin à sablo-argileux et graveleux ; structure fragmentaire de type polyédrique à grenue, fortement développée ; porosité moyenne ; sec ; pas de concrétions, mais de très fins éléments blanchâtres.
A 1

15 à 45 cm Rouge foncé (10 R 3/6 à 2,5 YR 3/6) ; sablo-argileux à argilo-sableux ; structure fragmentaire de type polyédrique fortement développée ; porosité moyenne ; sec ; pas de concrétions ; petit gravier quartzueux rubéfié.
B

45 à 80 cm Rouge à rouge-jaune (2,5 YR à 5 YR 4/6) ; sableux à sablo-graveleux. L'horizon est constitué de roche en décomposition dont la structure est encore reconnaissable, mais dont les éléments mélanocrates sont ferruginisés (teinte 2,5 YR 4/6). L'horizon est frais, sans concrétions, et la porosité est faible.
BC

80 à 90 cm Olive (5 Y 5/3) ; sablo-graveleux. L'horizon est constitué par la roche en décomposition à structure reconnaissable. La teinte dominante est verdâtre (5 Y 5/3) avec des infiltrations de teinte 2,5 YR 4/6. Frais, pas de concrétions et très faible porosité.
C

90 cm Roche-mère peu ou pas altérée.

3.1.2 - PRINCIPAUX CRITÈRES MORPHOLOGIQUES.

A partir des trois profils décrits et de nombreuses autres observations, on peut faire les principales remarques suivantes :

— le profil est bien développé du type A B C : horizon A humifère, horizon B de couleur, de texture et de structure, horizon C d'altération de la roche-mère ;

— l'épaisseur des horizons A et B dépasse rarement 50 cm ;

— le rougissement commence dans le haut de l'horizon C et atteint son maximum dans l'horizon B.

— aucun indice d'hydromorphie n'est décelable dans les trois horizons.

L'horizon A est caractérisé par :

— le mélange intime de la matière minérale à la matière organique qui colore peu le sol : dominance de brun (chroma 2 à 4) avec faible différence de valeur entre sec et humide (maximum 2) ;

— une structure polyédrique à nuciforme généralement bien développée : les bonnes structures grenues ou grumeleuses sont exceptionnelles ;

— la présence de graviers et cailloux dans l'horizon superficiel et à la surface du sol, en liaison avec une érosion assez forte.

Les principales caractéristiques de l'horizon B sont :

— sa couleur rouge dans les planches 5 YR et 2,5 YR, parfois 10 R, et plus rouge que dans l'horizon

C ;

— sa texture toujours plus argileuse que A et C : cependant on n'observe pas de revêtements argileux caractéristiques d'un horizon d'illuviation.

— sa structure bien développée, le plus souvent polyédrique, avec parfois un début de macrostructure prismatique ;

— l'absence de concrétionnement et de ségrégation d'hydroxydes de fer.

Quand à l'horizon C, on peut noter :

— son épaisseur variable de 0,5 à 2 m, exceptionnellement 3 à 5 m ;

— sa couleur et son aspect très variable avec la roche-mère ;

— sa couleur moins rouge et sa texture moins argileuse que l'horizon B.

3.2 Caractéristiques physiques et chimiques.

3.2.1 - TEXTURE.

La texture des "sols rouges" varie dans d'assez larges limites : seule la variation de texture dans le profil est beaucoup plus caractéristique. L'histogramme (Fig. 3) des teneurs en argile montre, aussi bien pour l'horizon A que pour l'horizon B, deux maxima qui correspondent assez bien à deux types de roche-mère. On a ainsi deux types de texture :

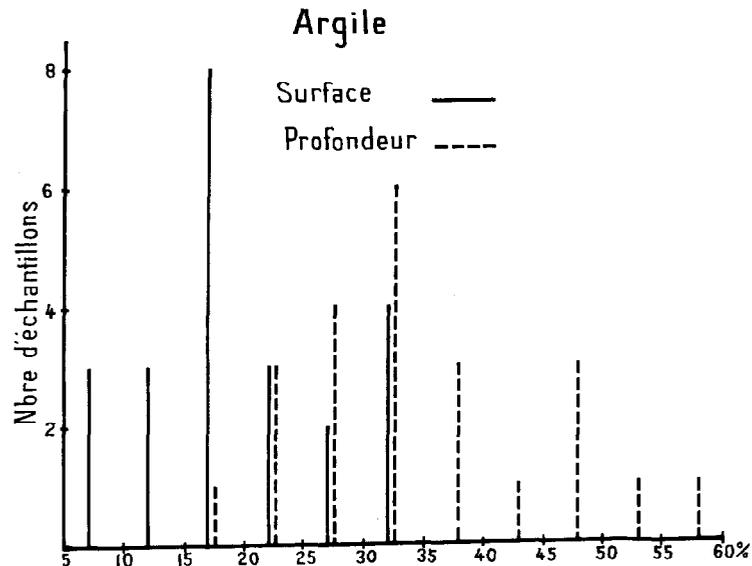


Fig. 3

— sablo-argileux (10-25% d'argile) en surface et argilo-sableux (25-40% d'argile) en profondeur pour les sols dérivés de gneiss, embréchite et parfois micaschistes.

— argilo-sableux (25-35% d'argile) en surface et argileux (40-60% d'argile) en profondeur pour les sols dérivés de micaschistes, schistes à amphibole, "roche verte".

Par contre dans tous les profils étudiés l'horizon B présente toujours le maximum de teneur en argile par rapport aux horizons A et C. En effet le rapport des teneurs en argile de l'horizon B par rapport à l'horizon A est toujours supérieur à 1,2 et le plus souvent compris entre 1,2 et 1,8 : quelques profils érodés et souvent formés sur embréchite présentent des rapports encore plus élevés, compris entre 2 et 3,5. Dans l'horizon C, ou du moins dans sa partie supérieure immédiatement en-dessous de l'horizon B, les teneurs en argile sont au minimum inférieures de 5 à 10% à celles de l'horizon B (Fig. 4).

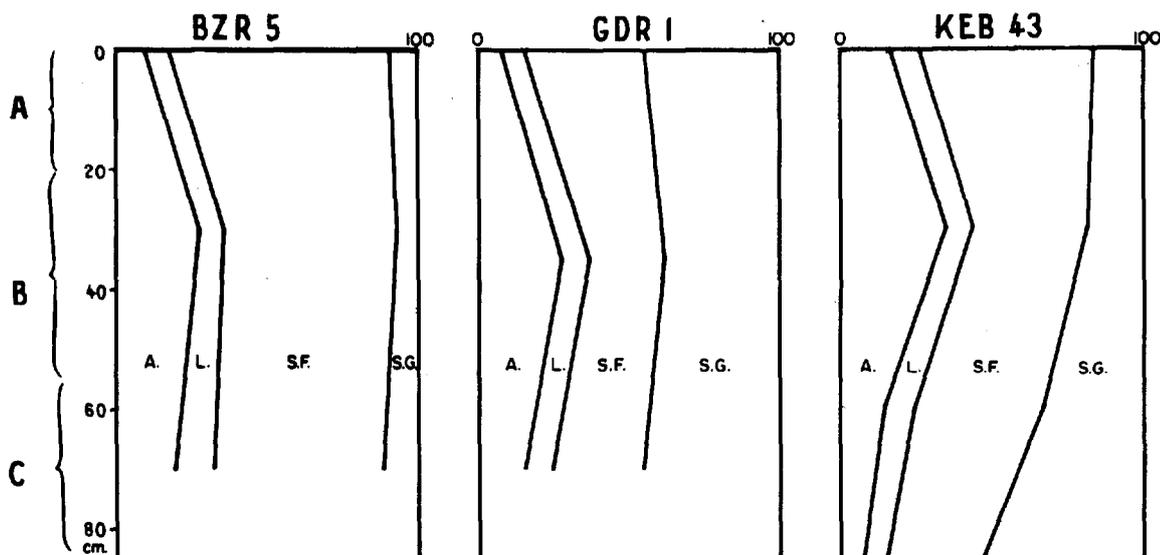


Fig. 4

Représentation graphique de l'analyse mécanique de trois profils.

A : argile L : limon S.F. : sable fin S.G. : sable grossier

Les teneurs en limon sont très variables (5 à 22%), elles ont à peu près la même répartition que les teneurs en argile et sont en corrélation avec le type de roche-mère. Il en est de même pour le sable fin et le sable grossier. Pour le gravier, on note très souvent les taux les plus élevés dans l'horizon A : seul le départ des éléments fins par érosion en nappe peut expliquer cette accumulation de surface.

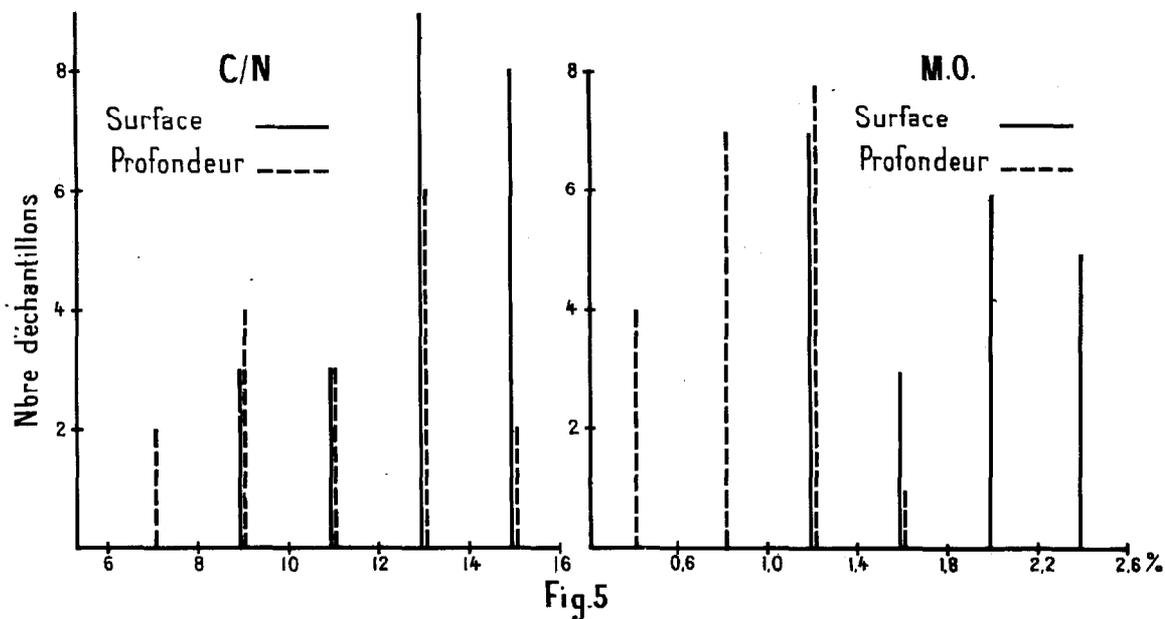
Argilisation dans l'horizon B et perte d'éléments fins par érosion dans l'horizon A rendent assez bien compte des variations de texture dans le profil de ces "sols rouges".

3.2.2. - MATIÈRE ORGANIQUE.

L'influence de la roche-mère ne semble pas s'exercer sur les teneurs en matière organique. En surface, les taux de matière organique sont groupés entre 1 et 2,6% avec une répartition irrégulière (Fig. 5). Dans l'horizon B, les taux de matière organique sont encore appréciables, puisque la majorité des échantillons ont des teneurs comprises entre 0,6 et 1,4% : la diminution par rapport à l'horizon A est en moyenne de 50%.

La richesse organique des "sols rouges" est bonne, comparée à l'ensemble des sols du Nord-Cameroun, où les teneurs en matière organique sont rarement supérieures à 1,5% (bons sols alluviaux) et le plus souvent comprises entre 0,5 et 1,5%.

Une des caractéristiques de cette matière organique est son rapport C/N relativement élevé : dans l'horizon A, la majorité des rapports C/N est comprise entre 12 et 14, tandis qu'ils se répartissent très irrégulièrement en profondeur entre 8 et 14.



3.2.3. - CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET BASES ÉCHANGEABLES.

La capacité d'échange est relativement élevée puisqu'elle est presque toujours supérieure à 10 mé./100g. et peut atteindre 30 mé./100g. en profondeur : la répartition irrégulière, surtout en profondeur, est liée à la roche-mère par l'intermédiaire de la teneur en argile. Les résultats de S, somme des bases échangeables, sont plus groupés : 5 à 15 mé./100g. en surface, 10 à 20 mé./100g. en profondeur (Fig.6). La répartition des bases fait apparaître des différences importantes entre les profils, en liaison avec la composition chimique des roches-mères.

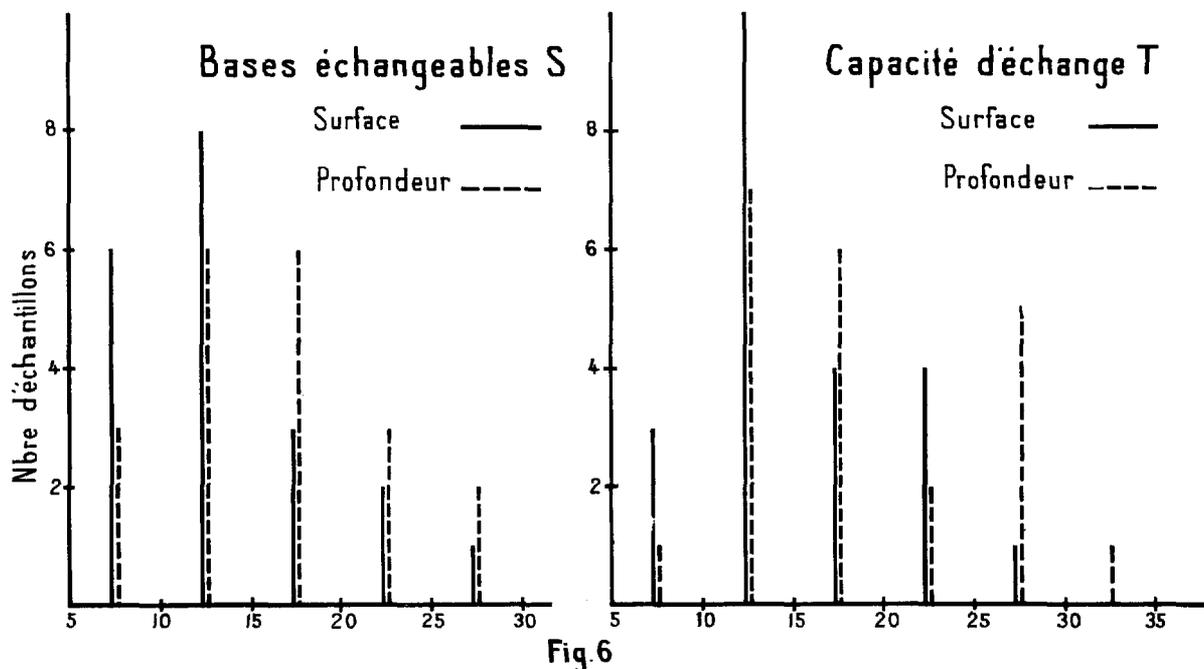


Tableau II - Répartition des bases échangeables.

| Echantillons | Horizon | Roche-mère | mé./100 g. | | | | | % de S. | | | |
|--------------|---------|------------------------|------------|------|------|------|------|---------|------|-----|-----|
| | | | Ca | Mg | K | Na | S | Ca | Mg | K | Na |
| GDR 11 | A | Embréchite | 8,4 | 1,2 | 0,3 | - | 9,9 | 85 | 12 | 3 | - |
| GDR 12 | B | | 9,4 | 0,4 | 0,05 | 0,06 | 9,9 | 95 | 4 | 0,5 | 0,5 |
| KEB 431 | A | Embréchite | 5,3 | 3,4 | 0,09 | - | 8,8 | 60 | 39 | 1 | - |
| KEB 432 | B | | 8,6 | 5,5 | 0,09 | - | 14,2 | 60 | 39 | 1 | - |
| BIB 11 | A | Schiste à amphibole | 11,0 | 6,5 | 0,1 | 0,09 | 17,7 | 62 | 37 | 0,5 | 0,5 |
| BIB 12 | B | | 15,7 | 11,9 | 0,06 | 0,13 | 27,8 | 57 | 42,5 | - | 0,5 |
| BZR 141 | A | Micaschistes | 10,3 | 10,2 | 0,3 | 0,1 | 20,9 | 49 | 49 | 1,5 | 0,5 |
| BZR 142 | B | | 11,6 | 10,4 | 0,1 | 0,2 | 22,3 | 52 | 47 | 0,5 | 0,5 |
| BZR 351 | A | Micaschistes | 21,1 | 3,7 | 0,3 | - | 25,1 | 84 | 14,5 | 1,5 | - |
| BZR 352 | B | | 22,6 | 4,0 | 0,1 | - | 26,7 | 84,5 | 15 | 0,5 | - |

La répartition des bases est pratiquement constante dans le profil, mais peut être différente d'un profil à l'autre. Dans le tableau II on notera :

- la très nette dominance des alcalino-terreux sur les alcalins ;
- les rapports très variables entre Ca et Mg (Mg/Ca entre 0,15 et 1) ;
- la faiblesse des teneurs en potassium pour les sols formés sur schiste à amphibole.

3.2.4 - pH et S/T.

Le pH est une caractéristique importante de ces sols : il est faiblement acide dans l'ensemble du profil et pratiquement toujours compris entre pH 6 et 7.

En surface, les valeurs du pH sont bien groupées entre 6,5 et 7. En profondeur, on observe un groupement des valeurs du pH entre 5,8 et 6,4 et entre 6,7 et 7. Comme les horizons de roche altérée (horizon C) ont un pH neutre ou supérieur à 7, on aurait ainsi deux types de variations du pH dans le profil : pH augmentant graduellement en profondeur, et pH présentant un minimum dans l'horizon B.

Le rapport S/T ne présente pas des variations aussi nettes que celles du pH. Presque tous les échantillons se groupent au-dessus d'un taux de saturation de 70%, avec un maximum entre 80 et 100% en surface, et 70 et 90% en profondeur.

3.2.5. - RÉSERVES MINÉRALES.

Les réserves minérales des "sols rouges" sont élevées et, plus encore que pour les bases échangeables, les chiffres extrêmement variables reflètent la richesse en bases de la roche-mère et l'altération plus ou moins forte qu'a subi celle-ci.

Ainsi les réserves en calcium varient-elles de 5 à 30 mé./100g. tandis que le magnésium, toujours mieux représenté, oscille entre 5 et 70 mé./100g. Les chiffres de potassium sont très variables : 12 à 15 méq./100g. sur micaschiste, mais moins de 1 mé./100g. sur schiste à amphibole.

D'une façon générale, les sols sur embréchite ont des réserves minérales plus faibles que les sols sur roche verte ou micaschiste.

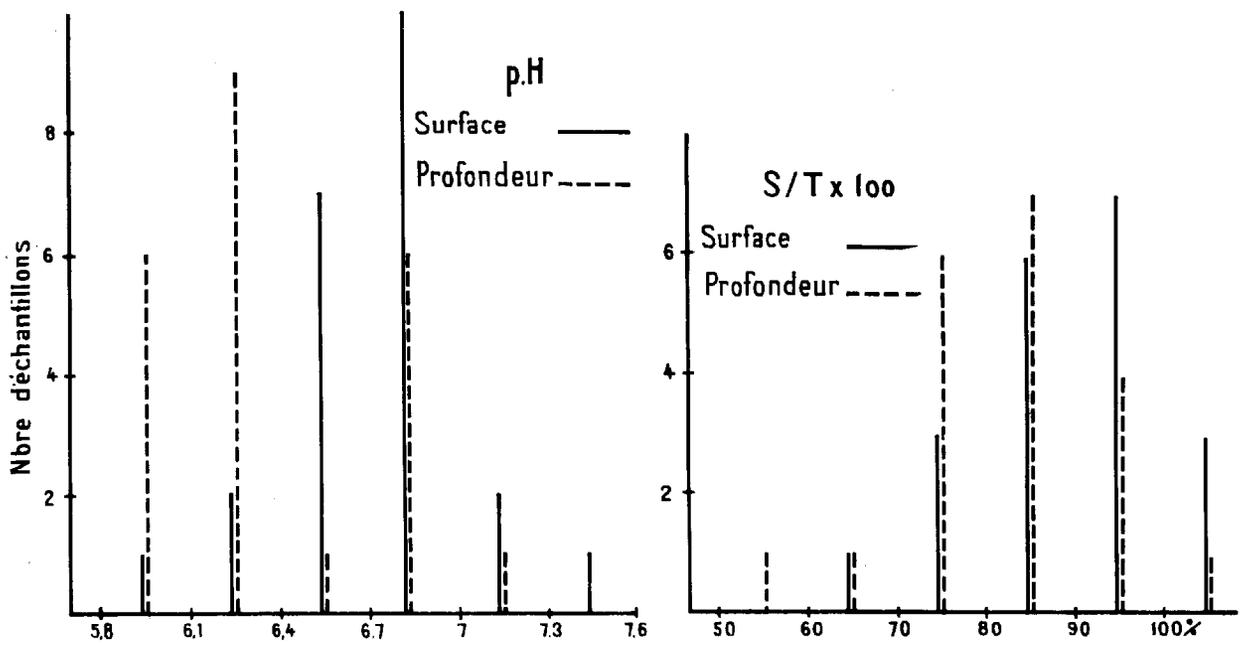


Fig 7

3.2.6 - ANALYSE TOTALE. FER LIBRE.

Un certain nombre d'analyses par la méthode triacide ont été effectuées sur la terre totale de quelques profils caractéristiques. Les variations de teneurs en éléments entre les profils, ou dans le profil, n'apportent pas grande indication, car ces variations reflètent le plus souvent les diverses teneurs en argile des échantillons. L'étude des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ est plus intéressante.

Les rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont élevés, et le plus souvent supérieurs à 2,5 : ils augmentent régulièrement de l'horizon A à l'horizon B ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,5 et 2,9) puis à l'horizon C (rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,8 et 3,4). De même, le rapport $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$, assez constant dans les deux premiers horizons ($\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ compris entre 1,65 et 1,95), s'élève au-dessus de 2 dans l'horizon C.

Ces résultats laissent supposer l'existence d'un changement minéralogique entre les horizons B et C : argilisation dans l'horizon B modifiant les proportions des divers types d'argiles, libération d'hydroxydes.

Les teneurs en fer libre (Méthode DEB) sont assez variables selon la roche-mère : 2 à 3% sur embrechite, plus de 6% sur micaschistes et roche verte. Les maxima sont toujours observés dans l'horizon B, aussi bien en valeur absolue que relativement au fer total : ceci pourrait indiquer un certain lessivage du fer de l'horizon A, qui s'accumulerait dans l'horizon B. Les rapports Fe libre/Fe total ne sont jamais très élevés, puisque 40 à 65% seulement du fer total se trouvent sous forme libre. Malgré le caractère conventionnel de la méthode DEB, qui n'attaque pas complètement les hydroxydes (hématite par exemple), mais peut détruire certaines argiles contenant du fer (nontronite), il n'en reste pas moins qu'une partie importante du fer doit se trouver dans le réseau des minéraux argileux ou de minéraux primaires non altérés : une étude détaillée des différentes formes du fer des "sols rouges" serait d'un grand intérêt pour comprendre leur pédogenèse.

Tableau III - Analyses triacidés et Fer libre (sur terre totale).

| Echantillons | Horizon | Perte au feu | Résidu | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | SiO ₂ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ libre | Fe libre |
|--------------|---------|--------------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|----------|
| | | | | | | | | Al ₂ O ₃ | R ₂ O ₃ | | Fe total |
| MAR 1 | A | 1,8 | 73,4 | 9,6 | 5,5 | 5,0 | | 2,94 | 1,88 | | |
| 2 | B | 7,0 | 40,4 | 17,6 | 16,3 | 13,6 | | 1,81 | 1,2 | | |
| 3 | B | 5,0 | 39,2 | 21,6 | 12,9 | 13,85 | | 2,84 | 1,7 | | |
| 4 | C | 2,9 | 71,4 | 10,7 | 5,7 | 6,15 | | 3,17 | 1,89 | | |
| BANG 1 | A | 5,7 | 44,7 | 21,8 | 13,4 | 8,55 | | 2,77 | 1,98 | | |
| 2 | B | 5,4 | 49,0 | 20,3 | 12,0 | 8,45 | | 2,87 | 2,1 | | |
| MAR 652 | B | 10,0 | 22,75 | 29,5 | 18,5 | 13,65 | 0,9 | 2,71 | 1,84 | 7,6 | 0,56 |
| 653 | BC | 5,45 | 40,6 | 22,7 | 12,5 | 11,4 | 1,0 | 3,06 | 1,93 | 5,3 | 0,46 |
| GDR 11 | A | 4,15 | 66,15 | 12,2 | 6,25 | 6,9 | 0,7 | 3,33 | 1,95 | 1,4 | 0,2 |
| 12 | B | 5,45 | 53,5 | 18,3 | 11,35 | 7,5 | 1,35 | 2,74 | 1,92 | 2,9 | 0,39 |
| 13 | C | 4,4 | 53,95 | 18,2 | 10,6 | 8,0 | 0,75 | 2,9 | 1,96 | 2,2 | 0,28 |
| BZR 141 | A | 7,3 | 46,0 | 20,0 | 13,0 | 8,1 | 0,65 | 2,61 | 1,87 | 3,4 | 0,42 |
| 142 | B | 8,95 | 31,2 | 27,35 | 18,5 | 9,9 | 1,0 | 2,51 | 1,87 | 5,6 | 0,57 |
| 143 | B | 8,3 | 21,1 | 37,4 | 18,6 | 10,6 | 1,2 | 3,41 | 2,49 | 6,0 | 0,57 |
| BIB 11 | A | 6,75 | 27,1 | 25,9 | 17,35 | 11,4 | 0,7 | 2,51 | 1,78 | 4,9 | 0,43 |
| 12 | B | 8,2 | 22,0 | 29,8 | 18,85 | 12,5 | 0,75 | 2,68 | 1,88 | 6,4 | 0,51 |
| 13 | B | 17,65 | 23,95 | 30,15 | 17,95 | 11,75 | 1,3 | 2,84 | 2,0 | 6,0 | 0,51 |
| BZR 31 | A | 18,1 | 54,2 | 15,4 | 10,3 | 8,3 | 0,9 | 2,5 | 1,68 | 5,0 | 0,6 |
| 32 | B | 10,1 | 47,0 | 16,8 | 14,0 | 8,6 | 0,75 | 2,0 | 2,5 | 6,5 | 0,76 |
| KAE 821 | A | 12,3 | 47,5 | 18,1 | 11,2 | 8,4 | 1,75 | 2,7 | 1,86 | 4,9 | 0,58 |
| 822 | B | 13,7 | 39,8 | 19,2 | 13,9 | 9,4 | 1,3 | 2,3 | 1,64 | 6,2 | 0,66 |
| 823 | C | 6,4 | 64,8 | 13,3 | 7,2 | 5,2 | 0,85 | 3,1 | 2,15 | 2,7 | 0,52 |

3.3 - Étude des minéraux argileux.

3.3.1 - ANALYSE TOTALE.

Les résultats d'analyses triacides d'argile sur trois profils recoupent les chiffres obtenus sur terre totale, en excluant les aléas analytiques dus à la plus ou moins grande abondance de quartz : le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est pratiquement constant (entre 2,48 et 2,57) tandis que le rapport $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ oscille entre 1,72 et 1,88.

Tableau IV - Analyse triacide et Fer libre (sur argile).

| Echantillons | Profondeur | Perte au feu | Résidu | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | SiO ₂ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ libre | Fe libre |
|--------------|------------|--------------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|----------|
| | | | | | | | | Al ₂ O ₃ | R ₂ O ₃ | | Fe total |
| BZR 52 | 5-35 | 11,6 | 0,75 | 39,4 | 29,6 | 18,5 | 1,25 | 2,48 | 1,72 | 8,0 | 0,43 |
| | 35-75 | 11,7 | 0,3 | 39,6 | 26,65 | 18,5 | 1,45 | 2,52 | 1,74 | | |
| BZR 152 | | 11,15 | 0,5 | 40,8 | 27,8 | 15,1 | 1,3 | 2,49 | 1,84 | 5,4 | 0,36 |
| | | 11,1 | 0,2 | 40,85 | 28,05 | 15,6 | 0,85 | 2,47 | 1,83 | | 6,2 |
| BZR 161 | 0-7 | 11,15 | 0,35 | 41,0 | 27,0 | 15,6 | 1,55 | 2,57 | 1,88 | 5,6 | 0,36 |
| | 7-20 | 11,35 | 0,3 | 40,0 | 27,3 | 16,4 | 1,45 | 2,48 | 1,79 | | 6,2 |
| BZR 163 | 20-45 | 11,3 | 0,35 | 40,0 | 26,9 | 17,5 | 0,55 | 2,52 | 1,78 | 5,7 | 0,33 |

Ces analyses laissent prévoir un mélange d'argile de type kaolinite avec des argiles à rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ beaucoup plus élevé, comme la montmorillonite et l'illite.

Les teneurs en fer libre sont relativement élevées (5 à 8%), mais ne représentent que moins de 40% du fer total : une grande partie du fer se trouverait donc engagée dans le réseau des argiles.

3.3.2 - CAPACITÉ D'ÉCHANGE.

Un certain nombre de mesures de capacité d'échange (Susini, 1964) a pu être effectué sur la fraction inférieure à 2 μ . Les chiffres obtenus sont toujours supérieurs à 30 mé./100 g., et assez variables selon la roche-mère du sol : plus de 45 mé./100 g. pour les argiles des sols formés sur roche verte et schiste à amphibole, entre 30 et 40 mé./100 g. pour les sols sur micaschiste et embréchite. Les différences entre les horizons ne sont pas significatives.

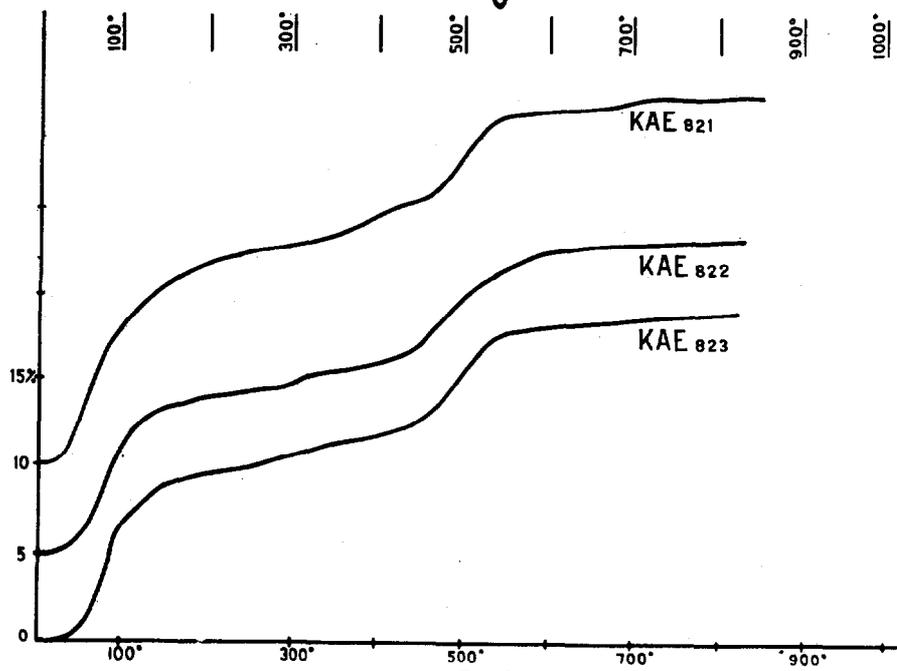
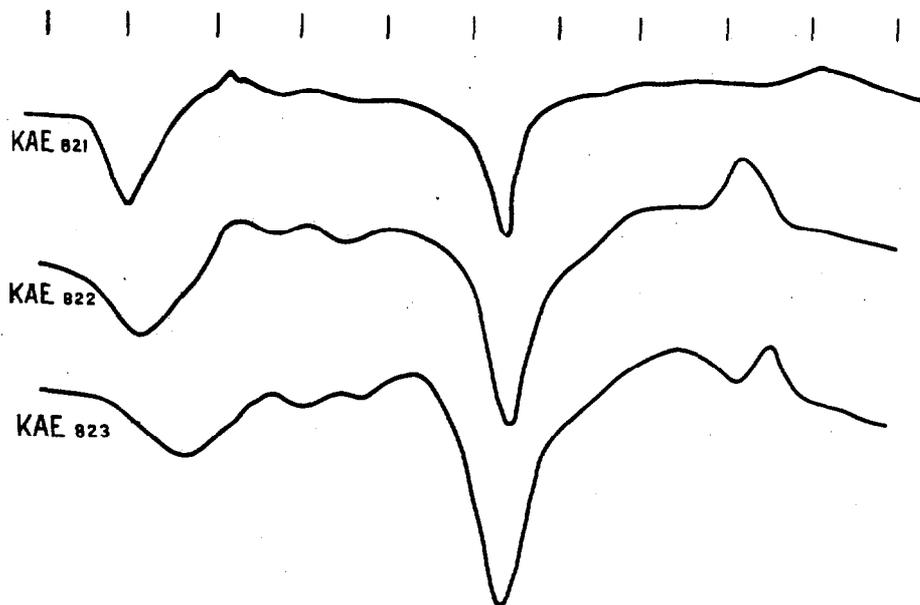


Fig. 8

Tableau V - Capacité d'échange sur argile.

| Roche-mère | Echantillon | mé/100g | Roche-mère | Echantillon | mé/100g |
|-------------|-------------|---------|------------|-------------|---------|
| Micaschiste | BZR 151 | 34,7 | Embréchite | GDR 11 | 31,4 |
| | 152 | 30,6 | | 12 | 42,0 |
| | 153 | 31,1 | | 13 | 34,1 |
| Micaschiste | BZR 161 | 39,4 | Embréchite | BKL 201 | 42,0 |
| | 162 | 38,3 | | 202 | 46,4 |
| | 163 | 33,8 | | 203 | 42,6 |
| | 164 | 34,2 | Schiste | BIB 11 | 52,9 |
| Roche verte | MAR 652 | 48,8 | à | 12 | 49,4 |
| | 653 | 47,0 | amphibole | 13 | 50,0 |

3.3.3. - ANALYSE THERMODIFFÉRENTIELLE et THERMOPONDÉRALE.

La figure 8 groupe les courbes d'A.T.D. et d'A.T.P. de la fraction argileuse du profil KAE 82 : il s'agit d'un sol formé sur micaschiste, particulièrement riche en calcium, mais peu pourvu en magnésium (voir tableau I, échantillon KAE 824) ; l'horizon B est argileux, ce qui rapproche davantage ce profil de ceux formés sur roche verte que de ceux formés sur embréchite.

Le crochet endothermique net et la perte d'eau de 8 à 12% jusqu'à 200° sont caractéristiques d'un minéral 2/1 de type montmorillonitique, tandis que le crochet endothermique entre 500 et 600° et la perte d'eau d'environ 5% vers 500° décèlent la présence d'un minéral de la famille de la kaolinite.

3.3.4 - RAYONS X.

L'étude aux rayons X de la fraction argileuse de 6 profils formés sur des roches variées confirme les résultats obtenus par d'autres méthodes.

Tableau VI - Étude aux Rayons X (5).

| Profil | Roche-mère | Minéraux argileux |
|--------|-------------------------------|--|
| MAR 65 | Roche verte | Montmorillonite, Kaolinite, Illite. |
| MAR 1 | Roche verte | Kaolinite, Illite, Goethite, Montmorillonite. |
| BIB 1 | Schiste à amphibole | Montmorillonite très importante, Kaolinite, Illite, Goethite, Gibbsite faible. |
| BZR 3 | Micaschiste | Illite, Kaolinite, Montmorillonite. |
| GDR 1 | Embréchite | Illite, Kaolinite, Montmorillonite. |
| | Horizon Bet C | Illite 4, Kaolinite 4, Montmorillonite 2. |
| Bangay | Embréchite, Roche peu altérée | Chlorite 3, Montmorillonite 3, Illite 2. |

(5) Laboratoire de Spectrographie (M. Pinta, ORSTOM, Bondy) sauf "Bangay" étudié au Laboratoire de Géologie et Paléontologie (Mlle Paquet, Strasbourg).

L'examen du tableau 6 nous montre que, dans tous les profils, on décèle la présence simultanée des trois minéraux argileux kaolinite, illite et montmorillonite. Leur importance relative est très variable : la montmorillonite domine sur roche verte et schiste à amphibole ; l'illite est mieux représentée sur micaschiste et embréchite.

L'étude du profil Bangay suggère la possibilité de transformation minérale au cours de la pédogenèse : pendant les premiers stades d'altération il se forme, en plus de la montmorillonite et de l'illite, de la chlorite, qui disparaîtrait au profit de la kaolinite dans le haut du profil. Des études plus précises sont nécessaires pour étudier aussi bien le passage de la roche au matériau altéré (domaine de la géologie des altérations) que celui de la roche altérée au sol proprement dit.

3.3.5. - CONCLUSION.

La fraction argileuse des "sols rouges" étudiée par des méthodes chimiques, thermiques et de diffraction aux Rayons X, se montre composée d'un mélange en proportion variable de minéraux 1/1 (kaolinite) et de minéraux 2/1 (montmorillonite, sans doute sous forme de nontronite, et illite). L'hydroxyde de fer cristallisé se trouve sous forme de goéthite.

3.4 - Essai d'explication de la pédogenèse.

3.4.1 - PRINCIPAUX CRITÈRES DE CARACTÉRISATION DES "SOLS ROUGES".

Excepté les critères morphologiques assez constants pour tous les "sols rouges", il ressort de l'étude des caractéristiques physico-chimiques, que celles-ci ne sont pas parfaitement homogènes et nous avons fait fréquemment allusion à l'influence de la roche-mère. En fait, cette étude nous a montré qu'il faut séparer deux groupes de caractéristiques physico-chimiques :

- celles qui sont sous la dépendance de la composition chimique de la roche-mère (richesse en quartz, teneur en bases) : teneur en argile, capacité d'échange de la terre fine, somme et répartition des bases échangeables ;

- celles qui seraient sous la dépendance des autres facteurs de la pédogenèse, qui sont essentiellement le climat, la végétation et le drainage : teneur en matière organique et rapport C/N, pH et S/T, minéraux argileux (rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, capacité d'échange de la fraction argileuse), rapport Fe libre/Fe total.

Seul ce deuxième groupe de caractéristiques, ainsi que la morphologie des profils, peuvent servir de critères de caractérisation des sols rouges :

- sols à profil A B C, formés sur roche volcanique ou métamorphique relativement riche en Ca, Mg et Fe, dans des conditions de drainage interne et externe normal, sur des paysages géomorphologiques jeunes : l'épaisseur A + B dépasse rarement 50 cm.

- horizon A peu coloré par la matière organique, et de structure assez grossière ; horizon B de couleur, de texture et de structure ;

- bonne teneur en matière organique à C/N moyen ; pH faiblement acide et taux de saturation supérieur à 70% ; réserves minérales importantes ;

- importance des minéraux 2/1 (illite et montmorillonite) dans la fraction argileuse ; rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ supérieur à 2,5, rapport Fe libre/Fe total inférieur à 65%.

3.4.2 - PRINCIPAUX PROCESSUS DE PÉDOGÉNÈSE.

Les principaux processus pédogénétiques en cause dans la formation des sols rouges sont la synthèse argileuse et l'individualisation du fer. L'action de la matière organique et le lessivage paraissent moins importants ou sont moins bien connus.

Synthèse argileuse.

La formation, dans les "sols rouges", d'un horizon d'altération contenant des proportions variables des trois principaux minéraux argileux des sols (kaolinite, illite et montmorillonite) semble le processus pédogénétique le plus important, car elle explique un grand nombre des propriétés physiques et chimiques de ces sols.

Cette synthèse ne se fait pas en milieu hydromorphe de stagnation d'eau, mais bien en milieu enrichi en bases par insuffisance de percolation : l'hydrolyse courte, mais intense, sous l'action des eaux chaudes du climat tropical, agissant sur des roches relativement basiques, libère des quantités importantes de cations métalliques, en particulier Ca et Mg, qui, en se concentrant, vont favoriser la formation de montmorillonite et de chlorite. Quant à l'illite et à la kaolinite, elles peuvent se former, soit directement à partir de certains minéraux de la roche, soit à partir des premiers minéraux argileux formés (montmorillonite, chlorite) quand intervient une amélioration de la percolation vers le haut du profil. Il est possible que cette synthèse se poursuive dans l'horizon B, ce qui expliquerait la teneur en argile plus forte que dans l'horizon C. En fait, ces problèmes sont encore peu connus et mériteraient d'être étudiés aussi bien par les géologues d'altération que par les pédologues.

Individualisation du fer.

L'individualisation du fer se marque surtout morphologiquement, par l'intensité de la couleur rouge du sol dans l'horizon B : en effet, cette individualisation n'est pas complète, puisque 40 à 65% seulement du fer total sont sous forme libre (méthode DEB), et ce fer paraît fortement fixé sur les minéraux argileux, car il n'existe aucun indice qu'il puisse migrer facilement. Non seulement le fer ne migre pas, mais il doit contribuer à former la bonne structure stable de l'horizon B, assurant ainsi au sol une bonne perméabilité et expliquant l'absence de phénomènes d'hydromorphie : paradoxalement, cette action s'apparenterait à celle observée dans les sols ferrallitiques rouges à perméabilité élevée, avec des minéraux argileux entièrement différents. Le mode de liaison hydroxydes de fer-argile serait un problème important à étudier dans ces sols.

Action de la matière organique.

Nous avons noté que la matière organique était relativement abondante par rapport aux autres sols de la région, et caractérisée par un rapport C/N assez élevé. De plus, elle colore très peu le sol. Ces caractéristiques la différencient assez nettement, aussi bien de celle des sols ferrugineux tropicaux (matière organique colorant fortement le sol et à C/N élevé) que de celle des sols bruns subarides (matière organique colorant le sol à C/N faible). Il faut remarquer aussi que, malgré les taux de matière organique et la bonne saturation du complexe, on n'observe jamais les bonnes structures grenues à grumeleuses, auxquelles on pourrait s'attendre : faut-il voir là l'influence d'un mode de liaison particulier entre les minéraux argileux, la matière humique et les hydroxydes de fer ou l'influence néfaste du magnésium, particulièrement abondant dans certains profils (voir tableau II, échantillons BIB 11 et 12 et BZR 141 et 142).

Lessivage.

Les phénomènes de lessivage paraissent très restreints et ne se marquent pas dans la morphologie des profils : cependant, malgré la forte évaporation, la percolation n'est certainement pas nulle. Un léger lessivage en bases peut expliquer la baisse du pH dans l'horizon B de certains profils et le maximum de fer libre de l'horizon B par rapport à l'horizon A. De même, pour l'argile, l'absence de migration et d'accumulation est une caractéristique importante : la texture plus légère de l'horizon A s'explique par l'importance de l'érosion superficielle, qui entraîne les éléments les plus fins.

L'absence de lessivage de fer et d'argile paraît liée au type de matière organique.

3.4.3 - CONCLUSION.

Les "sols rouges" se forment sous des conditions climatiques, géologiques et géomorphologiques parti-

culières, qui leur impriment un ensemble de caractéristiques assez bien définies. Malgré leur faible épaisseur, ce sont cependant des sols évolués au profil bien développé : leur association avec des vertisols dans des paysages géomorphologiques jeunes fait penser que ce sont des sols climaciques. La différenciation de leur profil sous l'action des principaux processus pédogénétiques qui les caractérisent (synthèse argileuse, individualisation du fer) doit permettre de les classer au niveau du "groupe". Les études en cours permettent d'envisager les sous-groupes suivants :

- peu évolué : intergrade vers les sols peu évolués d'érosion régosolique
- modal
- verticale : structure prismatique de l'horizon B et présence de petites faces de glissement.

4 - PLACE DANS LA CLASSIFICATION.

4.1 - Corrélation avec d'autres pays.

Les "sols rouges" du Nord-Cameroun ne sont pas particuliers à cette région, et des sols, qui paraissent voisins, ont été décrits dans d'autres pays tropicaux et subtropicaux. Nous allons les passer en revue, ainsi que les sols qui paraissent nettement différents, mais dont la comparaison avec les "sols rouges" pourra éclairer leur classification.

Aux Indes (RAYCHAUDHURI, 1963), on a décrit des "sols rouges" (Red Soils) sous des pluviométries assez variées. Près de Colmbatore (RAYCHAUDHURI, 1943), sous une pluviométrie de 550 mm, les sols rouges formés sur gneiss à biotite, en position bien drainée, sont peu épais (moins de 30 cm), ont un pH neutre ou basique et un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,7 et 3 ; la capacité d'échange de leur fraction argileuse est de l'ordre de 35 meq./100g. Sur le plateau de Ranchi (GHOSH, 1963), beaucoup plus pluvieux (1350 mm) des "sols rouges" bien drainés se sont formés sur roche gneissique : l'étude aux rayons X a permis de montrer que leur fraction argileuse contient 25 à 45% de kaolinite, 15 à 25% d'illite et 30 à 50% d'un minéral à 14 Å assimilé à une chlorite ; le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est compris entre 2,35 et 2,55.

L'Australie (RADOSLAVITCH, 1958) possède des "terres brun-rouge" (Red-Brown Earths) dans une large bande climatique : 350 à 625 mm en pluies d'hiver ou d'été. Ces sols ont un horizon B presque toujours calcaire, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est compris entre 2,9 et 3,4, la fraction argileuse contient de la kaolinite toujours associée à de l'illite, de la montmorillonite ou de l'halloysite ; la capacité d'échange de l'argile est comprise entre 30 et 60 meq./100 g.

Au Queensland, FERGUSON (1954) a étudié les "limons rouges" formés sur basalte et associés à des vertisols. Les "limons rouges" se forment en situation bien drainée, et Ferguson croit possible la transformation de la montmorillonite en minéral du groupe de la kaolinite par perte de bases et de fer, ce dernier restant dans le profil à l'état d'hydroxydes.

En Afrique du Sud, (VAN DER MERWE, 1955), sous une pluviométrie de 500 à 700 mm on trouve des "sols rouges" formés sur norite et basalte, toujours en position bien drainée par rapport aux vertisols qui leur sont associés : ces sols sont très argileux, ont un pH supérieur à 6, un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,3 et 3,4 ; la montmorillonite y est toujours associée à la kaolinite.

Au Nyasaland (RAYCHAUDHURI, 1941), les "sols rouges" associés aux vertisols sous une pluviométrie de 825 mm ont un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,25 et 2,4, tandis que le rapport $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ oscille entre 1,7 et 1,85.

En Angola, BOTELHO DA COSTA et al. (1958, 1959) ont appelé "sols semi-arides tropicaux brun-rouge" des sols assez voisins de ceux que l'on trouve au Cameroun. Ils sont ainsi caractérisés : climat semi-aride à subhumide sec (500 à 700 mm) ; horizon A à moins de 1,4% de matière organique à C/N inférieur à 14, très faiblement structuré ; horizon B plus ou moins développé avec augmentation de la teneur en argile en profondeur ; haut degré de saturation ; fraction argileuse "siallitique" à rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 2,3 et 3,4 et qui contient kaolinite et illite ou mélange de montmorillonite, illite et kaolinite. Les auteurs portugais rapprochent ces sols des sols "brun-rouge" d'Amérique du Nord, de certains sols rouges méditerranéens et des sols bruns et brun-rouge subarides d'Afrique de l'Ouest.

En Angola, (BOTELHO DA COSTA, 1958, 1959) puis au Brésil (Equipe pédologique franco-brésilienne 1965) on a appelé "sols fersiallitiques" des sols ainsi caractérisés : pluviométrie de 550 à 900 mm, rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3$ voisin de 2,2, fraction argileuse formée d'un mélange de kaolinite et d'illite, absence d'accumulation de fer sous forme de concrétions.

Au Brésil, l'Equipe pédologique franco-brésilienne (1965) a appelé "intergrade fersiallitiques-vertisols" des sols formés sur roche basique, à forte influence de la montmorillonite, et qui sont très proches des sols "brun-rouge semi-arides tropicaux" d'Angola.

Au Vénézuéla, sous climat tropical humide (1500 à 2000 mm) NICOLAS et VERDIER (1964, 1965) ont étudié l'altération de roches basiques dans la Sierra de Imataca. Les profils d'altération sont très épais (jusqu'à 40 m) et de couleur vert pistache : ils contiennent essentiellement nontronite et goéthite. Ce type d'altération ressemble assez à celle observée sur les collines de Maroua.

Dans la même région, (NICOLAS et VERDIER, 1964b, 1965) mais sur gneiss acides, se forment des "sols rouges" assez épais (2 à 5 m), non cuirassés et essentiellement kaoliniques sans hydroxydes d'alumine : les auteurs interprètent ces sols comme des sols faiblement ferrallitiques.

On peut encore citer les "sols rouges" de la zone subtropicale de Chine (CHANG et LEE, 1958) qui contiennent kaolinite et montmorillonite, ont un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3$ compris entre 2 et 2,3 et une capacité d'échange de l'argile de 20-35 meq./100g., les sols brun-rouge, dérivés de gneiss à Ceylan, dont la fraction argileuse contient kaolinite, illite et montmorillonite. Quant aux paléosols d'Ecosse (GODARD et al., 1961) formés sur basalte et à très forte dominance de montmorillonite, leur composition minéralogique les rapprocherait plus des "sols rouges" que des sols ferrugineux tropicaux.

Pour terminer cette revue des sols susceptibles d'éclairer le problème de la classification des "sols rouges", nous évoquerons trois grandes catégories de sols particulièrement importantes et bien étudiées en Afrique de l'Ouest. Les sols ferrugineux tropicaux (AUBERT, 1962 et MAIGNIEN, 1964) sont limités par les isohyètes 500 et 1400 mm : ce sont des sols à profil ABC riches en sesquioxides de fer individualisés et très facilement mobilisables, leur fraction argileuse comprend souvent de l'illite en plus de la kaolinite ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3 \geq 2$), les processus de lessivage et d'hydromorphie prennent une grande importance dans leur pédogenèse.

Les sols bruns subarides tropicaux (BOCQUIER et MAIGNIEN, 1963) se rencontrent sous des pluviométries de 250 à 500 mm et sont caractérisés par le processus de steppisation (horizon humifère épais à C/N bas) et secondairement par la carbonatation et la ferruginisation : ce sont des sols à profil A C.

Quant aux sols bruns eutrophes (MAIGNIEN, 1963) ils existent dans une large bande climatique (700 à 1700 mm), mais seraient des sols jeunes non climatiques, qui se situent en tête d'une évolution vers les sols ferrallitiques, les sols ferrugineux tropicaux ou les vertisols, selon les conditions de climat et de drainage. Ils sont caractérisés par une faible épaisseur de profil de type A B C ou A (B) C, à horizon B textural, structural ou de couleur, une saturation en bases élevée, une bonne teneur en matière organique et une structure de surface excellente, une fraction argileuse à dominance de minéraux 2/1.

En dehors de la zone climatique tropicale, les sols rouges méditerranéens peuvent offrir certaines analogies avec les "sols rouges" étudiés ici. Les sols rouges méditerranéens non lessivés, en particulier, sont caractérisés par leur profil A B C à horizon B de couleur et de structure, une forte individualisation du fer, l'absence de lessivage d'argile, un pH faiblement acide et un taux de saturation élevé ; ils sont formés principalement sur calcaires ; leur fraction argileuse contient essentiellement kaolinite et illite, la dynamique du fer est liée à l'existence de complexe ferro-silicique.

4.2 - Discussion.

En comparant les critères de caractérisation des "sols rouges" du Nord-Cameroun et ce que nous venons de dire rapidement de sols voisins de plusieurs pays, on s'aperçoit que la corrélation est moyenne avec les "terres brun-rouge" (Redbrown Earths) d'Australie, assez bonne avec les sols rouges d'Afrique du Sud et du Nyasaland associés à des vertisols sur roche basique, bonne avec les "sols rouges" (Red Soils) des pédologues indiens. La corrélation la meilleure semble cependant exister avec les "sols semi-arides tropicaux brun-rouge" d'Angola et les "intergrades fersiallitiques-vertisols" du Brésil. Les sols fersiallitiques définis dans ces deux pays offrent déjà des différences importantes avec les "sols rouges" du Nord-Cameroun : épaisseur du sol et minéraux argileux.

Il ne semble pas qu'en Afrique de l'Ouest on ait décrit des sols se rapprochant des "sols rouges" du

Nord-Cameroun. Toujours est-il qu'il n'existe aucune corrélation avec les sols ferrugineux tropicaux, qu'ils soient ou non lessivés : développement du profil, type d'horizon organique, lessivage d'argile et de fer, minéraux argileux. Avec les sols bruns subarides tropicaux, malgré une certaine convergence climatique (forte évaporation, drainage limité, mais pluviométrie plus élevée au Nord-Cameroun), il faut noter les différences suivantes : pas de steppisation, pas de carbonatation, aucun rôle de l'hydromorphie dans les "sols rouges".

Le rapprochement avec les sols rouges méditerranéens est certain (développement du profil, pH et taux de saturation), mais les différences sont importantes : pluies de saison froide et roche-mère calcaire des sols rouges méditerranéens, présence constante de montmorillonite en plus de la kaolinite et de l'illite dans les "sols rouges". Mais, comme pour les sols rouges méditerranéens (LAMOUROUX, 1965), le processus de formation des "sols rouges" n'est pas absolument connu, en particulier en ce qui concerne le fer : formes du fer, processus d'individualisation des hydroxydes à partir des minéraux primaires, possibilité de formation de complexes avec les matières humiques, et de lessivage, rôle du fer dans la structuration.

La comparaison avec les sols bruns eutrophes offre aussi des analogies certaines : développement du profil, taux de saturation élevé, réserves minérales et minéraux argileux. Les différences fondamentales portent sur la structure de l'horizon supérieur, et l'importance de ce processus de libération du fer ne permet pas de placer ces sols dans les "Sols à Mull" (Classe VI) dont font partie les sols bruns eutrophes. Ces sols sont ainsi définis : "sols formés sous l'influence d'une matière organique fortement évoluée, à humus de type mull, et qui n'ont qu'une proportion limitée de sesquioxydes libérés qui restent liés au complexe argilo-humique".

Par contre les "sols rouges" pourraient plus facilement entrer dans la classe des sols à hydroxydes (Classe VIII), qui est ainsi définie : "sols caractérisés par la décomposition rapide de leur matière organique (humus bien évolué) et l'individualisation des sesquioxydes métalliques (teneur relative élevée en sesquioxydes de fer)".

Cependant, comme nous venons de le voir, aucune des sous-classes actuelles (sols rouges méditerranéens, sols ferrugineux tropicaux et à fortiori sols ferrallitiques) ne leur convient parfaitement.

Dans l'état actuel de nos connaissances sur ces sols, il est donc difficile de préciser la classification des "sols rouges" au-dessus du niveau groupe. Il n'est cependant pas interdit de préciser leur appellation en accord avec les processus de pédogenèse qui les caractérisent. On pourrait reprendre l'appellation "semi-aride tropical brun-rouge" des auteurs portugais, mais le terme "semi-aride" voisin de "subaride" est réservé à une zone climatique déjà beaucoup plus sèche. L'appellation "sol rouge tropical" pourrait convenir : elle est calquée sur l'appellation "sol rouge méditerranéen" cependant utilisée au niveau de la sous-classe, elle précise le terme "sol rouge" (Red Soils) des pédologues indiens et elle met bien en évidence le processus de forte coloration du sol en régime climatique tropical (climat à deux saisons contrastées et pluies de saison chaude).

5 - CONCLUSION.

L'altération sous climat tropical de roches métamorphiques ou volcaniques basiques conduit à la formation d'un type de sol bien défini par ses caractéristiques morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques. Les processus pédogénétiques les plus importants observés dans ces sols rouges tropicaux portent sur la synthèse argileuse et l'individualisation du fer : la synthèse argileuse en milieu à percolation insuffisante aboutit à un mélange en proportion variable de kaolinite, d'illite et de montmorillonite ; l'individualisation du fer est en relation avec l'intense couleur rouge du sol, bien qu'une partie importante du fer reste dans les minéraux primaires ou dans le réseau des argiles.

Cependant, les données actuelles sont encore insuffisantes pour permettre une explication globale de la pédogenèse de ces sols et les principaux problèmes à étudier concernant l'altération de roche basique en milieu tropical, l'individualisation du fer et les formes que prend celui-ci dans le sol, le rôle de la matière organique en liaison avec l'argile et le fer.

Les faits acquis permettent cependant de différencier ces sols au niveau du groupe, sans que l'on puisse leur assigner une place définie dans la classe des sols à hydroxydes.

BIBLIOGRAPHIE.

- AUBERT (G.) - 1963 - Classification pédologique utilisée par les pédologues français. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 1, 3, pp. 1-7.
- BOCQUIER (G.), MAIGNIEN (R.) - 1963 - Les sols bruns subarides tropicaux d'Afrique de l'Ouest. Sols Afric., VIII, 3, pp. 359-370.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.) et al. - 1958 - Carte geral dos Solos de Angola. 1 Distrito da Huila. Mem. Junta Invest. Ultram., n° 9. Lisboa, 482 p.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.) - 1959 - Ferrallitic, Tropical Ferrallitic and Tropical Semi-arid soils. Conf. Inter-afric. Sols, 3, 1959 Dalaba, 1., pp. 317-319.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), POVOAS (J.C.) - 1959 - pH - base saturation relationships of Ferrallitic, Tropical Ferrallitic and Tropical Semi-arid soils of Southern-Angola. Conf. Inter-afric., Sols, 3, 1959 Dalaba, 1, pp. 189-193.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.), FRANCO (E.P. Cardoso), et al. - 1959 - Grey - brown and reddish brown Semi-arid soils of Southern Angola. Conf. Inter-afric. Sols, 3, 1959 Dalaba, 1, pp. 245-252.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.), FRANCO (E.P. Cardoso) et al. - 1959 - Non-calcic (quartz-feldspathic) brownish and reddish brown soils of Southern-Angola. Conf. Inter-afric. Sols, 3, 1959 Dalaba, 1, pp. 253-257.
- CHANG (S.N.), LEE (C.K.) - 1958 - Composition des minéraux argileux dans les principaux types de sols de la Chine du Sud. Acta Pedol. sinica, 6, pp. 178-192.
- CLAISSE (G.) - 1954 - Prospection préliminaire du Lamidat de Bibemi. Rapport IRCAM, Yaoundé, 3 p. (mult.).
- COMBEAU (A.) - 1955 - Les sols du reboisement de Maroua. Rapport IRCAM, P 66, Yaoundé, 7 p. (mult.).
- CURIS (M.), MARTIN (D.) - 1957 - Carte pédologique du Canton de Lam. Rapport IRCAM, P 89, Yaoundé, 12 p. (mult.).
- CURIS (M.) - 1954 - Etude pédologique autour de Kaélé. Rapport IRCAM, Yaoundé, 20 p. (mult.).
- DIAS (J.C.S.) - 1959 - As argilas dos Solos da Huila. Mem. Junta Invest. Ultram., n° 12, Lisboa, 71 p.
- DUMORT (J.C.) - 1962-1963 - Monographie géologique du Diamaré. Rech. Etud. Camer., 9, pp. 13-30.
- EQUIPE PEDOLOGIQUE FRANCO-BRESILIENNE - 1965 - Caractéristiques et classification des principaux sols du Val Jaguaribe (Etat du Ceara, Brésil). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., III, 1, pp. 3-20.
- FERGUSON (J.A.) - 1954 - Transformations of clay minerals in Black Earths and Red Loams of basaltic origin. Austr. J. Agric. Res., V, 1, pp. 98-108.
- GHOSH (S.I.), DAS (S.C.) - 1963 - Nature of Minerals in the Soil Clays of some Red Soils of Ranchi. J. Indian Soc. Soil Sci., XI, pp. 69-72.
- GODARD (A.), PAQUET (H.), MILLOT (G.) - 1961 - Contribution à l'étude de quelques paléosols du nord de l'Ecosse. Bull. Serv. Cart. géol. Als. Lorr., XIV, 4, pp. 101-109.

- GRIM (R.) - 1953 - *Clay Mineralogy*. Mc Graw-Hill, Londres, 384 p.
- KALPAGE (F.S.C.P.), MITCHELL (B.D.), MITCHELL (W.A.) - 1963 - The mineralogy of some Ceylan soils. *Clay Min. Bull.*, V, 30, pp. 308-318.
- LAMOUREUX (M.) - 1965 - Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 1, pp. 21-41.
- MAIGNIEN (R.) - 1963 - Les sols bruns eutrophes tropicaux. *Sols Afric.*, VIII, 3, pp. 485-490.
- MAIGNIEN (R.) - 1964 - Les sols ferrugineux tropicaux. Résumé des Comm. VIII congrès Intern. de la Sci. S., Bucarest, V, pp. 436-438.
- MARTIN (D.) - 1962 - Reconnaissances pédologiques dans le département de la Bénoué. Rapport IRCAM, P 128, Yaoundé, 46 p. (mult.)
- MARTIN (D.) - 1963 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/100 000. Feuille Kaélé. Rapport IRCAM, P 133, Yaoundé, 101 p. (mult.)
- NICOLAS (J.), VERDIER (J.) - 1964a - Sur l'altération des quartzites ferrugineux et des roches basiques de la Sierra de Imataca (Venezuela). *C.R. Acad. Sci.*, 259, pp. 4077-4078.
- NICOLAS (J.), VERDIER (J.) - 1964b - Sur l'altération des roches acides de la Sierra de Imataca (Venezuela). *C.R. Acad. Sci.*, 258, pp. 5922-5924.
- NICOLAS (J.), VERDIER (J.) - 1965 - Contribution à l'étude géochimique des terrains métamorphiques de la "Sierra de Imataca". (Rio Caroni, Guyane vénézuelienne). *Rev. Geogr. phys. Geol. dyn.*, VIII, 4, pp. 311-321.
- PIAS (J.), GUICHARD (E.) - 1958 - Etude pédologique du Bassin alluvionnaire du Logone-Chari (Nord-Cameroun). ORSTOM, Paris, 312 p. mult.
- RADOSLOVICH (E.W.) - 1958 - *Clay Mineralogy of some Australian Red Brown Earths*. *J. Soil Sci.*, IX, 2, pp. 242-251.
- RAYCHAUDHURI (S.P.) - 1941 - Studies of the physico-chemical properties of associated Black and Red Soil profiles of Nyasaland. *Indian J. Agric. Sci.*, XI, pp. 100-109.
- RAYCHAUDHURI (S.P.) et al. - 1943 - Physico-chemical and mineralogical studies of Black and Red Soil profiles near Colmbatore. *Indian J. Agric. Sci.*, XIII, pp. 264-272.
- RAYCHAUDHURI (S.P.), AGARWAL (R.R.), DATTA BISWAS (N.R.), et al. - 1963 - *Soils of India*. Indian council of Agricultural Research, New Delhi, 496 p.
- SEGALEN (P.), BACHELIER (G.) - 1956 - Les sols du Cameroun : Notice de la Carte pédologique au 1/2000 000 de l'Atlas du Cameroun.
- SEGALEN (P.) - 1962 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/100 000. Feuille Maroua. Rapport IRCAM, P 126, Yaoundé, 67 p. (mult.)
- SEGALEN (P.), MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.) - 1962-1963 - Les sols du Diamaré. *Rech. Etud. Camer.*, 9, pp. 43-72.
- SEGALEN (P.), VALLERIE (M.) - 1963 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/100 000. Feuille Mokolo. Rapport IRCAM, P 129, Yaoundé, 72 p. (mult.)
- SERVICE METEOROLOGIQUE - 1960 - *Annales des Services météorologiques de la France d'Outre-Mer*. Paris, 433 p.

- SIEFFERMANN (G.) - 1959 - Premières déterminations des minéraux argileux des sols du Cameroun. Conf. Inter-afric. Sols, 3, 1959, Dalaba, 1, pp. 139-150.
- SIEFFERMANN (G.), SUSINI (J.) - 1960 - Appareil d'analyse thermique différentielle réalisée au Centre de Pédologie de l'IRCAM. Rech. Etud. Camer., 1, pp. 123-139.
- SIEFFERMANN (G.), MARTIN (D.) - 1963 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/100 000. Feuille Mousgoy. Rapport IRCAM, P 134, Yaoundé, 102 p. (mult.).
- SIEFFERMANN (G.) - 1964 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/50 000. Feuille Pitoa. Rapport IRCAM, P 140, Yaoundé, 51 p. (mult.).
- SIEFFERMANN (G.) - 1964 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/50 000. Feuille Boula-Ibib. Rapport IRCAM, P 141, Yaoundé, 55 p. (mult.).
- SUSINI (J.) - 1964 - Détermination de la capacité totale d'échange des argiles par microméthode. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 11, 2, pp. 51-56.
- U.S.D.A. - 1960 - Soil classification. A comprehensive system. 7e Approximation. U.S.D.A., Washington, 265 p.
- VALLERIE (M.) - 1964 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/50 000. Feuille Bidzar et Guider. Rapport IRCAM, P 139, Yaoundé, 70 p. (mult.).
- VAN DER MERWE (C.R.), HEYSTEK (H.) - 1955 - Clay minerals of South-African Soil groups : Sub-tropical Black Clays and related Soils. Soil Sci., 79, 2, pp. 147-158.

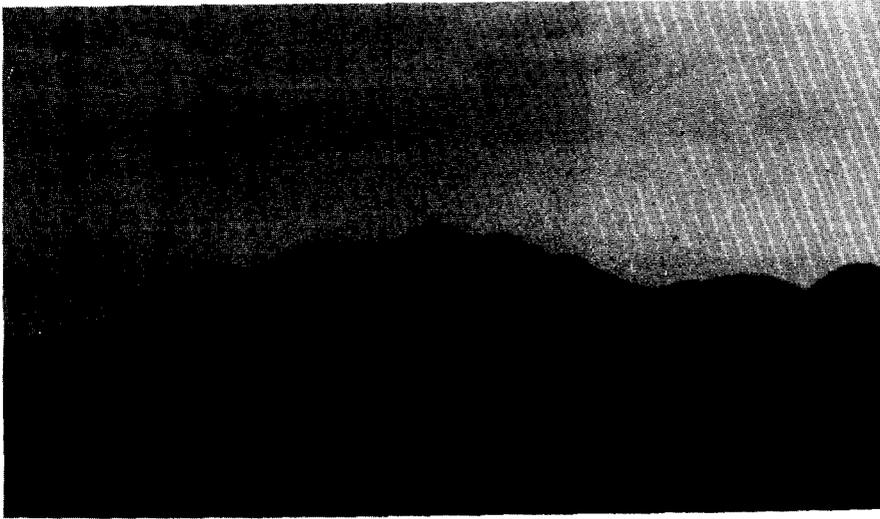


Photo n° 1 —. Les collines de Maroua et les piedmonts qui leur sont associés.

Cliché D. Martin

Horizon A nombreux cailloux et pierres →

Horizon B à structure prismatique →

Horizon BC →

Horizon C d'altération de la roche verte →



Photo n° 2 —. Profil de sol rouge tropical sur les collines de Maroua



Photo n° 3. Surface aplanie au nord-est de Bibémi vue du profil BIBI savane arborée claire

Cliché D. Martin



Horizon A brun-rouge



Horizon B rouge bien structuré



Horizon B C



Horizon C
d'altération de schiste à amphibole.

Photo n° 4. Profil BIBI : sol rouge tropical sur schiste à amphibole.