

**Intérêt de mesures physiques sur échantillons non remaniés
dans la caractérisation des sols ferrallitiques
Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie)**

Method KILASARA(1) et Daniel TESSIER(2)

(1) adresse permanente : Soil Science Department, Sokoine University of Agriculture, PO BOX 3008 Morogoro, Tanzanie
(2) Station de science du sol, Inra 78026 Versailles, France

RÉSUMÉ

Cet article fait suite à l'étude des sols de la région de Muhesa en Tanzanie (KILASARA, 1989). Le climat est tropical sub-humide et sub-équatorial. Le long des toposéquences, d'amont en aval, on trouve des sols rouges ferrallitiques profonds et microagrégés, des sols cuirassés sur pente, puis des sols à microstructure polyédrique devenant hydromorphes en bas de pente. Les données physico-chimiques indiquent que ces sols sont faiblement désaturés en amont et sont saturés en aval.

Les résultats obtenus montrent que si les données minéralogiques et physico-chimiques permettent de classer les sols, les caractères utilisés sont insuffisants pour répondre à des préoccupations agronomiques. La majeure partie du fonctionnement actuel des sols apparaît liée à la structure des sols et à la taille et à la continuité des pores. Des données quantitatives relatives à la porosité et à la rétention d'eau obtenues sur des échantillons non remaniés (des mottes) permettent de mieux définir et mieux utiliser les sols ferrallitiques.

MOTS CLÉS : Sols ferrallitiques – Tanzanie – Classification – Propriétés physiques – Minéralogie – Porosité – Rétention de l'eau.

SUMMARY

AN EVALUATION OF PHYSICAL MEASUREMENTS OF CRUDE SAMPLES AS A RESEARCH TOOL
IN THE CHARACTERIZATION OF FERRALLITIC SOILS. EXAMPLES OF THE FERRALLITIC
COVER IN THE MUHEZA DISTRICT (TANZANIA).

This work was conducted on soil pedons of a toposequence situated at 5°S and 39°E in Muheza district in Tanzania. The climate of the studied zone is sub-humid. From the summit to the valley, the soils are distributed in the following manner : strongly microaggregated deep ferrallitic soils on the top, lateritic soils on the steepest slope, fine polyedric structured and weakly leached ferrallitic soils and massive structured hydromorphic soils on the valley. Both mineralogical and physico-chemical properties varie in a logical order from the more developed summit soils to the youngest ones on the valley. The data obtained show that, if the physico-chemical and mineralogical results satisfactorily classified most of the soils in their respective categories, the characters used are not sufficient to give an answer for agricultural problems. The extent of soil development and a greater degree of the current soils behaviour appear to be related to the soils structure, particularly the pore size distribution and pore continuity. Quantitative data on soil porosity and water retention obtained from undisturbed soil samples show to be a very useful contribution to a better definition and management of ferrallitic soils.

KEY WORDS : Oxisols – Tanzania – Soil taxonomy – Physical properties – Mineralogy – Porosity – Water retention.

INTRODUCTION

Ce travail porte sur les sols ferrallitiques de la Tanzanie septentrionale, dont les caractéristiques générales sont tout à fait classiques. La genèse de ces sols est donc le résultat d'un long processus d'altération qui aboutit notamment à la différenciation d'une couverture pédologique. L'apparition de nouveaux constituants minéraux par rapport à ceux des matériaux d'origine est, en outre, un des traits essentiels de ce type de pédogenèse. C'est la raison pour laquelle les classifications de ces sols sont essentiellement basées sur des caractéristiques minéralogiques et des données physico-chimiques

(nature des argiles, capacité d'échange en cations, nature des cations échangeables et taux de saturation en alcalins et alcalino-terreux (CPCS, 1967 ; Soil Conservation Service, 1975). Cependant, ce type d'approche ne fait pas référence à d'autres données, importantes pour les utilisateurs, comme celles relatives au fonctionnement. Si l'on a des préoccupations de type agronomique, les caractères utilisés par les classifications sont donc insuffisants.

Le but de cet article est de montrer comment la prise en compte de paramètres physiques permettrait de supprimer certains incohérences des systèmes de classification actuellement utilisés, notamment dans une perspective de mise en valeur.

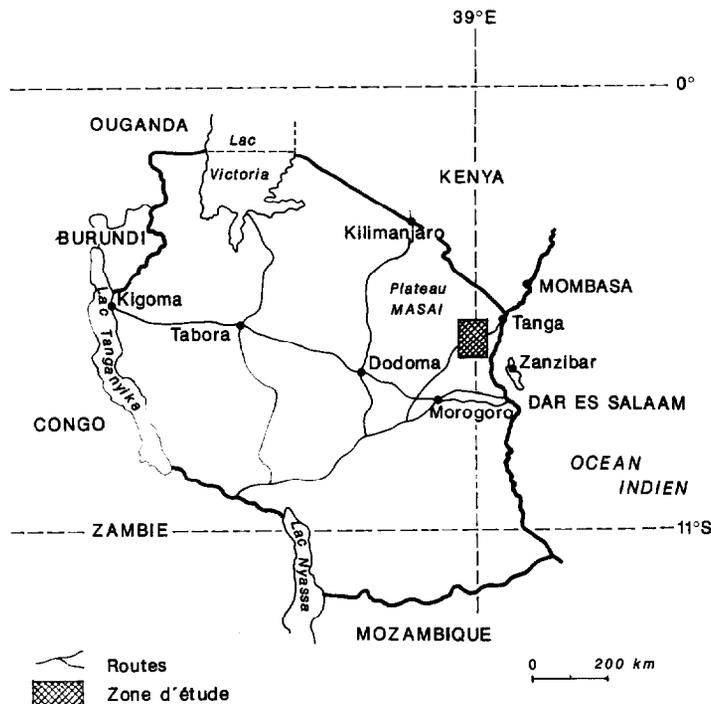


FIG. 1. - Localisation de la zone d'étude.
Location of the studied area.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU

Climat

La zone étudiée se trouve à proximité de l'océan Indien (fig. 1). Les coordonnées approximatives sont 5°S et 39°E. Les résultats de la station météorologique du Tanzanian Agricultural Research Organization située à Mlingano montrent

que le climat est sub-humide et sub-équatorial. Les précipitations annuelles s'élèvent à 1 140 mm en moyenne distribuées tout au long de l'année (fig. 2). Deux saisons plus humides, de mars à juin et d'octobre à novembre, correspondent aux vents de mousson. Les variations annuelles et interannuelles sont importantes. Le bilan hydrique n'est positif que pendant trois mois, c'est-à-dire d'avril à juin (fig. 2).

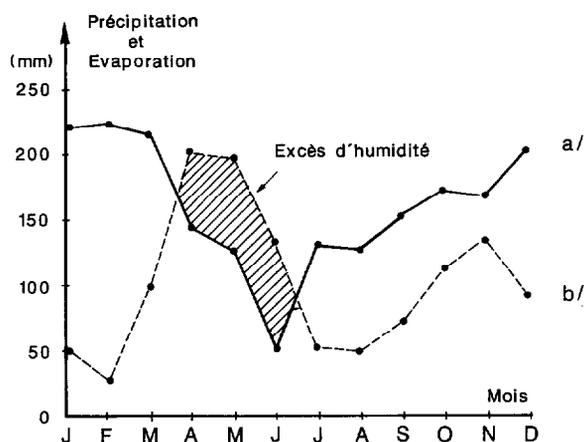


FIG. 2. - Répartition des précipitations et données sur l'évapotranspiration avec : (a) évaporation atmosphérique moyenne annuelle et (b) précipitation moyenne annuelle.
Rainfall distribution and evapotranspiration data with (a) mean annum atmospheric evaporation and (b) mean annum rainfall.

présence de biotites et d'amphiboles, ainsi que des gneiss à hornblende et à grenat.

Le périmètre d'étude est fortement incisé par le réseau hydrographique. Le sommet des collines s'élève à 100-200 m. Les dénivelés entre sommets et vallons atteignent de 15 à 25 m.

Végétation et mise en valeur

Trois grands types de mise en valeur sont rencontrés :

- culture industrielle de sisal qui occupe 65-70 % des terres cultivables ;
- cultures de céréales, notamment de maïs sur des parcelles de quelques hectares ;
- jachère dans des zones ayant été consacrées durant un temps à la culture du sisal.

À l'origine, le paysage était une savane arborée à feuilles caduques, avec des arbres tels que les « mvules » ou « irokos » (*Chlorophora excelsa*) qui demeurent dominants.

Géologie et géomorphologie

Le substrat géologique de la zone d'étude est d'origine métamorphique et appartient au système géologique Archéen selon la carte géologique de Tanzanie (1967). Les roches principales sont des quartzites, des schistes à micas et cyanite avec

LES SOLS ET LEUR RÉPARTITION DANS LE PAYSAGE

La démarche suivie au cours de la prospection a consisté à décrire la répartition des sols en fonction de la géomorphologie. Nous avons étudié dans le détail, trois toposéquences, dont l'une a servi de base à cet article (fig. 3) (KILASARA, 1989).

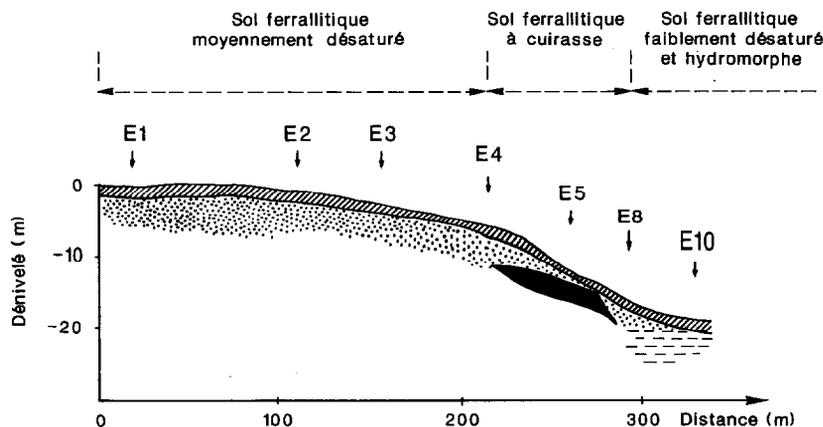


FIG. 3. - Distribution des sols le long d'une toposéquence représentative du district de Muhéza.
Soil distribution along a toposequence representative of the Muheza district.

En position sommitale, on trouve des sols profonds, puisque l'altérite se situe à environ 6 m de profondeur. Les sols contiennent environ 60 %

d'argile répartie uniformément sur toute l'épaisseur du profil. Leur structure est de type microagrégé, notamment dans les horizons B. Les sols sont

friables, à macrostructure massive et de couleur rouge. Ils sont très remaniés par l'activité biologique. Ces sols ne sont ni collants, ni concrétionnés, et ne possèdent pas de véritables glébules dans les horizons meubles.

En aval, sur la pente la plus forte, des sols ferrallitiques à cuirasse sont caractérisés par la présence des glébules durs dans les horizons A et AB. En dessous, une cuirasse à blocs de taille métrique surmonte un horizon gravillonnaire portant des glébules et des cailloux arrondis. Ces derniers se situent juste au-dessus de l'altérite.

En bas de pente, juste à l'aval de la zone cuirassée, les sols sont à structure polyédrique fine. Ils sont peu collants et peu plastiques à l'état humide, en particulier dans l'horizon B, mais deviennent relativement durs à l'état sec. On note une hydromorphie temporaire à la base de l'horizon B, ce dernier prend alors une couleur jaunâtre.

Dans le talweg, les sols sont hydromorphes jusqu'en surface et présentent des taches de couleur rouille. Leur teneur en argile est analogue aux sols plus en amont (55 %). La structure est continue. Lorsque le matériau reste en permanence humide, il est très collant et plastique. Il devient, après dessiccation, extrêmement dur et compact.

APPROCHE CLASSIQUE DE LA CLASSIFICATION DES SOLS

Caractères physico-chimiques et minéralogiques des sols. Méthodes utilisées

L'étude minéralogique des échantillons par la diffraction des rayons X a été réalisée sur des poudres d'échantillons de sols broyés et sur la fraction $< 2 \mu\text{m}$ de l'argile extraite du sol. Les dépôts orientés ont été obtenus en suivant le protocole décrit par ROBERT et TESSIER (1974).

L'analyse thermopondérale (ATP) a permis de déterminer la quantité de kaolinite et d'hydroxydes. Les teneurs en fer libre et en fer mal cristallisé ont été obtenues sur la base des protocoles de MEHRA et JACKSON (1960) et SCHWERTMANN (1964).

Pour déterminer la répartition des composés ferriques bien cristallisés de la fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$), il est nécessaire d'éliminer les constituants silicatés. Les échantillons concernés ont ainsi subi un traitement en présence de NaOH 5N (NORRISH et TAYLOR, 1961 ; KÄMPF et SCHWERTMANN, 1982). Sur le résidu obtenu, le fer total a été dosé par colorimétrie, tandis que le fer hydroxylé a été évalué par l'ATP. Par différence, on

a estimé la teneur en hématite de la fraction argileuse.

La capacité d'échange cationique a été déterminée en suivant le protocole décrit par CHAPMAN (1965) utilisant une solution d'acétate d'ammonium tamponnée à pH 7. Les cations Ca et Mg échangeables ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique, tandis que Na et K ont été analysés par photométrie de flamme. L'aluminium échangeable a été déterminé par la méthode au KCl 1N (ESPILAU et PEYRONNEL, 1976). Enfin, la granulométrie a été effectuée suivant le protocole préconisé par RIVIERE (1977).

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Parallèlement à l'évolution morphologique des sols le long des toposéquences, on peut mettre en évidence une évolution minéralogique latérale et verticale (fig. 4 et 5). À partir des données de diffraction des rayons X, il apparaît que l'ensemble

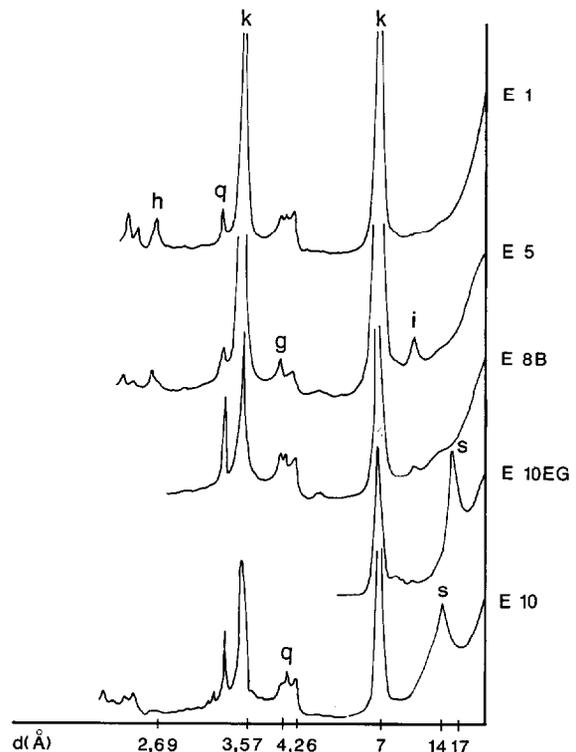


FIG. 4. - Évolution de la composition minéralogique en fonction de la profondeur dans le sol ferrallitique typique de Mlingano-Est avec (k) kaolinite, (i) illite, (q) quartz, (h) hématite et (s) smectite.

Mineralogical composition changes as a function of depth in Mlingano-East toposéquence (typical oxisol), with (k) kaolinite, (i) illite, (q) quartz, (h) hematite and (s) smectite.

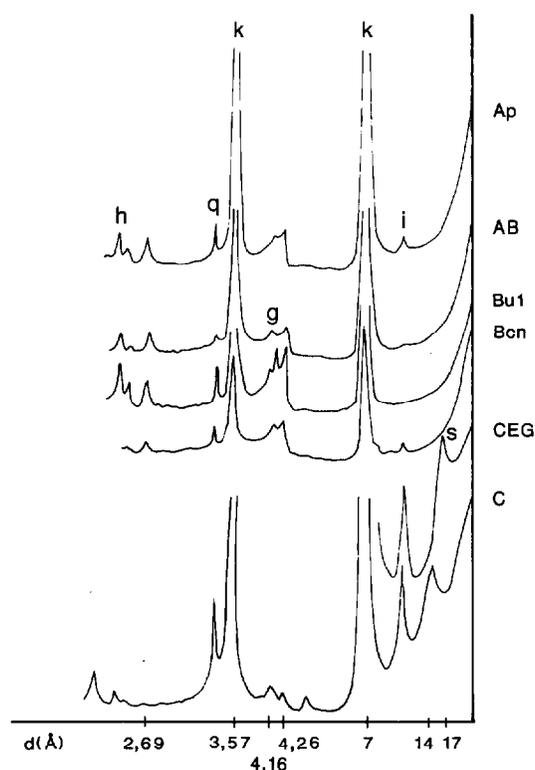


FIG. 5. - Évolution de la composition minéralogique dans les horizons B le long de la séquence de Mlingano-Ès avec (k) kaolinite, (i) illite, (q) quartz, (h) hématite et (s) smectite. *Mineralogical composition changes in the B horizons along Mlingano-East toposequence, with (k) kaolinite, (i) illite, (q) quartz, (h) hematite and (s) smectite.*

des horizons meubles est caractérisé par la présence de kaolinite, d'oxydes de fer (goéthite et hématite) et de quartz. Dans les horizons BC et C, s'ajoutent à ces derniers, des argiles micacées et des smectites (raies à 10 et 15 Å°).

Le tableau I montre aussi que la teneur en fer total ne varie pratiquement pas en fonction de la profondeur pour un même sol, mais change d'un type de sol à l'autre. On passe de 7,9 à 11,6 % dans les sols ferrallitiques de haut de pente à 4,3-6,5 % dans les sols hydromorphes. Le fer libre évolue en fonction de la profondeur de la même façon que le fer total, mais la proportion de fer mal cristallisé devient supérieure dans les sols hydromorphes. En effet, le rapport fer mal cristallisé/fer libre reste constant dans les sols ferrallitiques de sommet (2,5 % et croît dans les sols hydromorphes pour atteindre 9,1 à 19,6 %.

La nature du fer présent dans la fraction < 2 µm est largement de type hématite dans les sols de sommet. Elle diminue au profit de la goéthite vers l'aval (tableau I).

DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES

Les sols de sommet sont acides ($5,0 < \text{pH} < 5,5$) (tabl. II). Ils deviennent de plus en plus alcalins vers l'aval. Les valeurs de ΔpH sont systématiquement négatives dans tous les sols, ce qui, selon GILLMAN (1984), est l'indicateur d'une charge électrique des argiles à dominante négative. Les valeurs de ΔpH atteintes permettent aussi de

TABLEAU I
Évolution des différents types d'oxydes de fer dans le sol du district de Muhéza
Evolution of iron oxides in Muheza district oxisols

Sol	Horizon	Fer libre	Fer total	Fer mal	Rapport	Rapport
		Fe_2O_3	Fe_2O_3	cristal.	(3)(1)	goéthite
		%	%	Fe_2O_3	%	hématite
		(1)	(2)	(3)		%
Sol ferral- litique moyennement désaturé	Ap	7.7	7.9	0.21	2.7	28
	AB	8.3	9.3	0.24	2.9	21.3
	Bu1	11.4	11.6	0.24	2.1	26.1
	Bu4	9.0	9.6	0.22	2.4	30.7
Sol ferral- litique faiblement désaturé	Ap	5.8	6.0	0.25	4.3	52.4
	Bg	7	7.6	0.2	2.9	ND
	AB	7	7.8	0.22	3.0	48.6
	B	6.2	7.8	0.18	2.9	35.2
Sol hydromorphe	Ag	4.4	5.2	0.87	19	46.6
	Bg	3.9	4.3	0.42	10	67.8
	2Bg	3.2	6.5	0.29	9.1	17.5

distinguer les sols ferrallitiques de sommet des autres sols, puisque dans les sols bien drainés de sommet de pente le Δ pH est compris entre -0,6 et -0,7, tandis qu'il atteint -1,2 à -1,9 dans les horizons hydromorphes. Ainsi, les sols à minéralogie de type kaolinite possèdent-ils des valeurs de

Δ pH très inférieures aux sols contenant, à côté de la kaolinite, des minéraux 2/1.

Le tableau III rassemble les données concernant la capacité d'échange en cations (CEC) du sol et de la fraction argileuse du sol. On constate, notamment au niveau de l'argile, une augmentation

TABLEAU II
Données relatives au pH de quelques horizons représentatifs de l'ensemble des sols des séquences de Mlingano et Kitisa.
pH data in some representative horizons of the Mlingano and Kitisa soil sequences

Profil	Horizon	pH eau	pH KCl	Δ pH
E1	Ap	5.5	4.8	-0.7
	Bu1	5.0	4.3	-0.7
	Bu2	5.5	4.9	-0.6
	C	7.1	6.2	-0.9
E10	Ag	7.8	6.6	-1.2
	2Bg	8.3	6.5	-1.8

TABLEAU III
Caractéristiques relatives à l'échange cationique des différents types de sols
Cation exchange data of the different soil types

Sol	Horizon	cations échangeables mé/100g sol					CEC	CEC	S/T
		Ca	Mg	K	Na	Al	(T) mé/100g sol	mé/100g argile	%
Sol ferral- litique typique	Ap	3.70	1.42	0.80	0.08	0.02	6.9	14.4	87
	AB	1.80	1.38	0.04	0.04	0.10	6.3	11.2	60
	Bu1	0.60	1.56	0.03	0.03	0.10	4.5	5.9	67
	Bu2	0.30	2.23	0.03	0.03	0.10	4.5	7.0	62
Sol ferral- litique faiblement désaturé	Ap	5.00	2.19	0.88	0.06	ND	9.5	22.0	86
	B	5.40	2.31	0.91	0.08	ND	9.5	16.6	92
	Bg	3.43	2.47	0.19	1.61	ND	7.7	15.2	100
Sol hydro- morphe	Ag	2.94	2.20	0.20	0.96	0.0	6.3	20.3	100
	Bg	3.95	2.51	0.24	1.00	0.0	7.7	23.2	100
	2Bg	4.82	4.02	0.20	1.32	0.0	10.7	25.4	100

notable de la CEC dans le sol hydromorphe qui confirme l'apparition des minéraux 2/1.

Par ailleurs, le taux de saturation en bases demeure le plus faible dans le sol ferrallitique typique. Il est de 62-67 % dans l'horizon B, mais atteint 87 % dans l'horizon Ap des sols sous culture. Sur certains sols ferrallitiques typiques, étudiés sur d'autres séquences, les taux de saturation se situent entre 30 et 49 % dans l'horizon B et 13 à 56 % dans l'horizon Ap. Cette variation peut s'effectuer sur une courte distance (environ 100 mètres). Au total, l'évolution du taux de saturation peut être attribuée à la mise en culture ou à l'hétérogénéité des sols dans le paysage. Mais il est important de noter la quasi-absence d'aluminium échangeable et en même temps, l'absence de gibbsite dans l'ensemble des sols étudiés.

Classification des sols

SOL D'AMONT

Sur la base des seuls critères morphologiques, il est clair que le sol d'amont peut être classé dans le système de classification américain dans l'ordre des oxisols, car il comporte un véritable horizon oxisol (Soil Conservation Service, 1975). En outre, les critères définissant le sous-ordre « orthox » sont respectés y compris le taux de saturation en bases, qui dépasse 35 % dans l'horizon oxisol. La capacité d'échange étant supérieure à 1,5 mé/100 g d'argile et les bases échangeables plus aluminium dépassant 1,5 mé/100 g d'argile, le sol d'amont appartient au groupe « eutrothox ».

Dans le système de classification français, le sol d'amont peut être classé en se référant au taux de saturation comme un *sol ferrallitique moyennement désaturé* avant un B appauvri (CPCS, 1967).

SOL À CUIRASSE

Rappelons que ce sol se trouve en aval du sol ferrallitique. Les principales difficultés rencontrées pour le classer tiennent à ses caractéristiques morphologiques et à son taux de saturation élevé (environ 90 %). Les données minéralogiques, la répartition de l'argile en fonction de la profondeur nous permettent, en l'absence d'autres critères, de classer ce sol comme un *sol ferrugineux tropical lessivé, induré*.

Bien que le taux de saturation en bases et la teneur en bases échangeables dépassent la limite préconisée (80 % et 8 mé/100 g respectivement), ce sol peut aussi être classé dans les sols ferrallitiques

faiblement désaturés. La présence de minéraux altérables (feldspaths) et l'influence de l'érosion permettent un classement dans le groupe des sols ferrallitiques faiblement désaturés, rajeunis et pénévoués.

Dans le système américain, le sol à cuirasse ne peut être classé comme un oxisol, un ultisol ou encore un alfisol en raison de l'absence des horizons diagnostics de type oxisol ou argillique. Ce sol ne comporte pas non plus les caractères propres à d'autres ordres tels que les entisols, mollisols et vertisols. Il répond, en revanche, aux critères de classification des *inceptisols* du fait de la présence d'un horizon diagnostic cambique à minéralogie mixte kaolinite-minéraux 2/1. Le taux de saturation en bases important (> 50 %) permet de le classer respectivement dans le sous-ordre des tropepts et le grand groupe des eutropepts.

SOL DE TRANSITION « FERRALLITIQUE-CUIRASSE »

En aval de la cuirasse, on trouve un sol ferrallitique faiblement désaturé appauvri en argile et hydromorphe. Sa composition minéralogique étant similaire au sol cuirassé et la CEC étant supérieure à 16 mé pour 100 g d'argile, ce sol est classé dans l'ordre des inceptisols dans la classification américaine. Le régime thermique (isohyperthermique) et la présence d'un épipédon de type ochrique, conduisent à définir ce sol comme appartenant au sous-ordre « tropept ». Le régime hydrique du sol étant de type « ustique », il fait partie du grand groupe des ustropepts. En combinant les propriétés morphologiques de l'horizon B et les caractéristiques physico-chimiques, le sol peut être aussi classé dans le sous-groupe oxisol-ustropept.

SOL HYDROMORPHE DU TALWEG

Du fait de la présence de sels solubles et de critères d'hydromorphie, ce sol est classé dans le système CPCS comme un sol hydromorphe minéral peu humifié à gley salé. Le caractère alluvial de ce sol, dont la partie supérieure provient de matériaux colluviaux, ne peut être pris en compte dans la classification CPCS.

Dans le système américain, ce sol est classé comme un « aérique fluvaquent ».

Conclusion

À la lumière de ces données, nous voyons que certains facteurs immédiatement accessibles à l'observation directe des profils, comme la présence d'une cuirasse, ne sont pas toujours pris en compte dans les classifications (Soil Taxonomy). Par ail-

leurs, pour la mise en valeur des sols et en particulier pour la croissance des plantes, les critères retenus par les systèmes de classifications, c'est-à-dire essentiellement les paramètres chimiques sont souvent moins importants que les paramètres physiques. C'est la raison qui nous a conduit à introduire des données physiques dans l'étude des sols.

INTRODUCTION DE DONNÉES RELATIVES AU COMPORTEMENT

Présentation

L'utilisation à des fins agronomiques de données relatives à la rétention de l'eau et à l'évolution de la densité apparente des sols n'est certes pas nouvelle. Ainsi, la capacité de rétention en eau des sols déterminée au laboratoire est-elle une donnée qui figure généralement dans les tableaux d'analyse des sols en France comme aux États-Unis. Dans ce dernier pays, les valeurs de potentiel retenues, -32 KPa et -1,6 MPa, sont établies sur des matériaux préalablement séchés à l'air, broyés, puis tamisés. Cependant, ce type de donnée n'est pas réellement utilisé dans le système de classification américaine des sols, ni d'ailleurs dans la CPCS. Depuis quelques années, des travaux français ont montré l'intérêt de réaliser des mesures de rétention d'eau et de porosité sur des échantillons de sol, *non remaniés mécaniquement*, mais aussi, *non séchés* (REEVE et HALL, 1978 ; TESSIER et BERRIER, 1979 ; BRUAND, 1986 ; GRIMALDI et TESSIER, 1986 ; CHRETIEN et TESSIER, 1988). Il ressort de ces résultats qu'il est possible aujourd'hui de déduire des courbes de rétention d'eau et de porosité établies sur des mottes, des informations relatives au comportement et aux caractéristiques réelles du sol en place dans le domaine des hauts potentiels (LESSARD, 1985 ; ROBAIN et CURMI, 1986).

Échantillonnage et réalisation des mesures

Dans des fosses pédologiques fraîchement creusées, des fragments de taille décimétrique ont été prélevés au sein des horizons caractéristiques des différents pédons. Ces fragments ont été protégés de la dessiccation à l'air en les plaçant dans une double enveloppe en matière plastique. Le transport a été réalisé en évitant les chocs pour préserver leur structure.

Au laboratoire, les blocs ont été stockés au frais et, au moment de la mesure, des mottes de 5 à 10 cm³ en ont été extraites.

Les potentiels de l'eau à -3,2 KPa, -32 KPa et -1,6 MPa ont été réalisés en utilisant le dispositif de filtration développé par TESSIER et BERRIER (1979). Le volume apparent des échantillons humides a été déterminé par la technique développée par MONNIER *et al.*, 1973 et TESSIER (1984), dont le principe repose sur la mesure de la poussée d'Archimède exercée par l'échantillon dans du kérosène. Chaque résultat obtenu est la moyenne de 5 mesures au moins. Parallèlement à l'étude du volume apparent de mottes, des cylindres de 136 cm³ ont été prélevés dans les horizons bien drainés. Sur de gros fragments (50-80 cm³), la détermination du volume a été faite après enrobage dans un vernis imperméable. Les poids sec et humide des échantillons ont été établis par référence à un chauffage à 110° C pendant 24 heures.

Mesures de densité apparente

Les résultats obtenus sur cylindres et gros fragments indiquent que la densité apparente des horizons B des sols augmente en moyenne d'amont en aval (tabl. V). Ce sont les horizons des sols les mieux drainés qui sont les moins denses, donc les plus poreux. Au contraire, les horizons des sols les plus hydromorphes sont les plus compacts, donc aussi les moins poreux. On remarque d'un autre côté, que la densité apparente des horizons A, cultivés ou non, est généralement voisine de 1,5. Notons enfin, que les valeurs obtenues sur mottes sont, dans ces sols ferrallitiques, comparables à celles réalisées sur cylindres ou blocs (KILASARA, 1989).

Mesures du contenu en eau

Les données relatives aux trois types principaux de pédons sont présentées en indice d'eau θ c'est-à-dire que le volume d'eau est rapporté au volume de solide (fig. 6 a, b et c). L'examen de l'ensemble des résultats montre que le contenu en eau évolue d'une façon décroissante du sol ferrallitique de sommet au sol hydromorphe d'aval. Cette variation est beaucoup plus importante pour les mesures effectuées à -3,2 KPa qu'elle ne l'est à -32 KPa et surtout à -1 600 KPa. Ainsi, dans les horizons B, θ moyen à -3,2 KPa passe de 0,54-0,57, pour le sol du sommet, à 0,49 dans le sol ferrallitique faiblement désaturé sur pente et à 0,35 dans le sol hydromorphe.

TABLEAU IV
Caractéristiques géochimiques relatives aux eaux de la nappe
correspondant au sol ferrallitique faiblement désaturé et au sol hydromorphe
*Geochemical data relative to the water table composition
in the slightly and hydromorphic oxisols*

Sol	Profon- deur (m)	Cl	SO ₄	Si	Ca	Mg	K	Na	Al	pH	Conductivité totale mmho/cm
Ferral- litique faiblement désaturé	2.0	2.4	95	8.9	277	201	9.4	1025	1.6	8.1	6.73
Hydro- morphe	1.3	2.7	85	10.5	315	253	11.4	1137	1.8	8.3	ND

TABLEAU V
Évolution de la densité apparente dans les sols étudiés
Bulk density changes of the studied soils

Sol	Horizon	da g/cm ³
Sol ferrallitique moyennement désaturé	Ap	1.50
	AB	1.44
	Bu1	1.23
	Bu2	1.17
Sol ferrallitique faiblement désaturé	Ap	1.46
	AB	1.37
	B	1.28
	Bg	1.51
Sol hydromorphe	Ag	1.55
	Bg	1.72
	2Bg	1.41

Dans le cas de l'horizon de surface, on peut noter une diminution comparable de θ à -3,2 KPa, bien que l'écart entre les valeurs observées dans les sols d'amont et d'aval soit beaucoup moins important.

Quant aux mesures effectuées -3,2 KPa et à -1 600 KPa, on peut constater que les valeurs les plus élevées de θ sont obtenues dans les sols bien drainés, notamment dans le sol du sommet. Nous notons aussi que les horizons supérieurs contien-

nent moins d'eau que ceux se trouvant plus en profondeur, et ce, quel que soit le sol. La valeur de θ passe par exemple à -1 600 KPa de 0,34-0,41 dans le sol de sommet à 0,20-0,36 dans le sol hydromorphe. Une évolution analogue est observée à -32 KPa. Cependant, il est clair que les variations de teneurs en eau obtenues à -3,2 KPa sont les plus importantes, et ce, que l'on considère l'évolution au sein d'un même profil, ou même d'un profil à l'autre, au sein de la toposéquence.

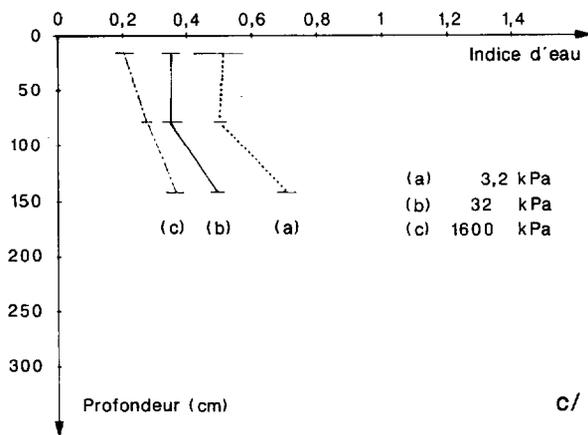
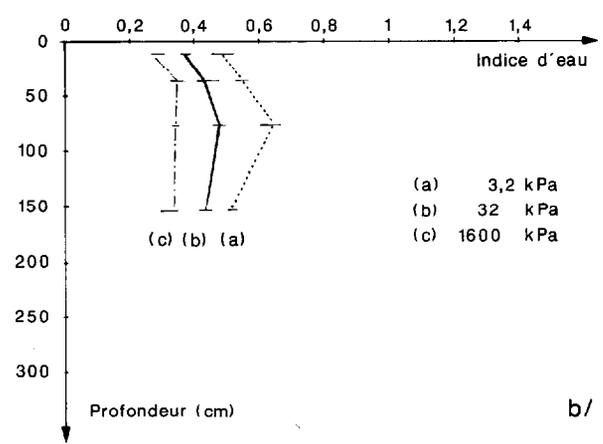
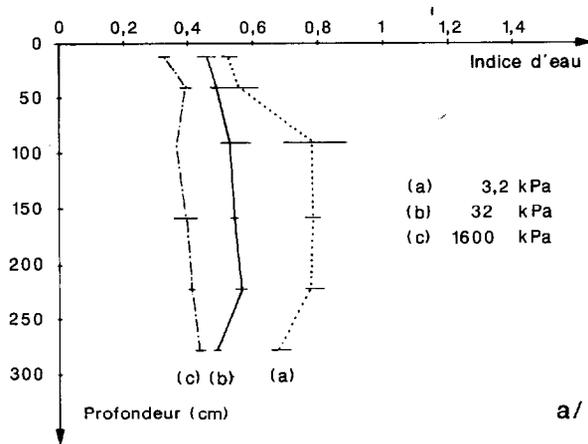


FIG. 6. - Courbes de rétention d'eau des trois profils (a) sol ferrallitique moyennement désaturé-pédon E1, (b) sol ferrallitique faiblement désaturé-pédon E8 et (c) sol ferrallitique hydromorphe-pédon E10.
Water retention curves of three soil profiles : (a) medium unsaturated oxisol-pedon E1, (b) slightly unsaturated oxisol-pedon E8 and (c) hydromorphic oxisol-pedon E10.

DISCUSSION

La discussion portera successivement sur l'utilisation de données physiques dans le domaine agropédologique ainsi que sur des problèmes de pédogenèse et de classification.

Intérêt des données physiques en relation avec les aspects agropédologiques

Rappelons d'abord que les études classiques de rétention de l'eau sont réalisées en laboratoire sur des échantillons préalablement séchés à l'air, broyés < 2 mm, réhumectés brutalement avec un excès d'eau pendant une nuit, puis soumis à la valeur du potentiel de l'eau souhaité.

Il est clair que cette méthode cherche à caractériser un échantillon homogène. Elle conduit cependant à modifier l'organisation des constituants par rapport à celle du sol en place. C'est la raison pour laquelle, aux hautes valeurs de potentiel

(< pF 3 environ, -100 KPa), les teneurs en eau obtenues sont souvent très différentes de celles d'échantillons non remaniés ou même du sol lui-même (LESSARD, 1985). L'expérience a d'ailleurs montré qu'il faut soumettre les échantillons de terre à des valeurs du potentiel de l'eau très différentes en fonction de leur granulométrie pour avoir, sur échantillons remaniés, une teneur en eau analogue à la capacité au champ (BONNEAU, 1961). En revanche, pour l'estimation du point de flétrissement (pF 4,2, -1 600 KPa), les résultats obtenus ne sont jamais très différents quelle que soit l'approche, car les pores concernés par la rétention de l'eau à ce potentiel sont très fins et ne sont pas modifiés par la fragmentation de l'échantillon.

Il ressort enfin des résultats de la littérature, qu'une étude faite à partir d'échantillon *non remaniés*, en se référant à une valeur du potentiel de l'ordre de pF 1,5 à 1,7 (-3,2 à -5 KPa) donne en général un bon ordre de grandeur de la teneur

en eau maximale susceptible d'être retenue par le sol, c'est-à-dire, à la capacité au champ (HALL *et al.*, 1977). Par différence entre la teneur en eau à pF 1,5 et à pF 4,2 (-1,6 MPa) sur des mottes, on peut estimer l'eau utile pour les plantes et donc obtenir des informations sur la potentialité agromique du sol.

Intérêt des données physiques en relation avec les problèmes de pédogenèse et de classification

On sait depuis fort longtemps, que la granulométrie d'un sol joue un rôle direct sur la forme de sa courbe de rétention d'eau. Cette dernière ainsi que les valeurs de densité apparente sont d'ailleurs considérées comme des caractéristiques physiques de base d'un sol. À partir de ces données, des modèles ont été développés pour en évaluer le spectre poral. Leur principe repose sur la sommation des contributions des différentes classes de pores concernés par la rétention de l'eau dans un milieu non saturé d'eau (MUALEM, 1976 ; VAN GENUCHTEN, 1980 ; LESSARD, 1985). Plus récemment, le concept de structure fractale appliqué aux sols et aux matériaux a permis de mieux asseoir la pertinence de tels modèles en mettant l'accent sur l'aspect plus ou moins continu de la phase solide et du spectre poral. Ainsi, des données simples comme l'évolution de la densité apparente et la courbe de rétention d'eau servent-elles de support à ce type d'étude (VAN DAMME *et al.*, 1989 ; RIEUX et SPOSITO, 1991). Des aspects aussi importants que la cohésion des matériaux avec toutes ses conséquences sur la stabilité structurale ainsi que la contribution des classes de pores dans les écoulements peuvent en être déduits.

Il apparaît donc que les études de rétention d'eau et de densité apparente réalisées sur les horizons caractéristiques de différents pédons répartis le long d'une toposéquence, permettent d'obtenir une vision continue de l'évolution du sol, verticale et latérale en ce qui concerne sa structure et son spectre poral.

L'examen des courbes de porosité et de contenu en eau à différents potentiels de l'eau permet de repérer les horizons filtrants ou ceux d'arrêt pour l'eau. Si l'on se réfère à de nombreux travaux portant sur le spectre poral des sols et leur aptitude au retrait (BRUAND, 1986 ; GRIMALDI et TESSIER, 1986), l'attention doit porter essentiellement sur l'existence de pores de grande taille, c'est-à-dire, retenant l'eau avec de faibles énergies, donc dans le domaine des très hauts potentiels ($\psi > -100$ KPa,

pF < 3, pores > 1 μ m). D'après les données établies à -3,2 KPa et -32 KPa, puisque les pores concernés sont de ~ 50 et ~ 5 μ m respectivement, on obtient des informations à la fois sur les possibilités de ressuyage rapide du sol, mais aussi sur les écoulements latéraux dans la mesure où ces types de pores sont en continuité. C'est le cas, par exemple, des horizons du sommet de la séquence de Muhéza pour lesquels les valeurs et les variations de teneurs en eau retenues entre -3,2 et -32 KPa sont considérables. La densité apparente est alors faible. Au contraire, dans les sols d'aval les variations de teneur en eau entre deux valeurs de potentiel deviennent très faibles. Nous en concluons que, dans ces pédons, la taille des pores est petite (< 1 μ m) et la circulation de l'eau devient alors particulièrement lente. On note aussi que les valeurs de densité apparente sont élevées là où se trouvent des argiles de type smectite. Le caractère hydro-morphe du sol serait donc lié au spectre poral et à l'arrivée d'eau latéralement depuis les horizons d'amont avec un changement de l'ambiance physico-chimique dont l'apparition de smectite semble être la conséquence (KILASARA, 1989). Les critères de densité et les courbes de rétention d'eau permettent par les données quantitatives, d'entrevoir et même d'accéder à des caractéristiques dynamiques.

CONCLUSIONS

Les divers sols ferrallitiques de la région de Muhéza présentent des fonctionnements différents que l'utilisation de données physiques permet d'appréhender par l'étude des échantillons de sol *non remaniés*. L'intérêt de ce type de données est qu'il permet de fournir des informations pour l'utilisation des sols. Sans que l'on puisse négliger les aspects géochimiques et physico-chimiques (cations échangeables, facteurs de toxicité pour les plantes), les données physiques sont de première importance pour évaluer la potentialité d'un sol à une utilisation agricole. Elles renseignent, en effet, sur la rétention de l'eau, l'aération et peuvent fournir des éléments sur la stabilité structurale au sens large.

En ce qui concerne la classification des sols, les données physiques obtenues, du fait qu'elles sont quantitatives, permettent de caractériser le sol en mettant l'accent sur la présence de pores de plus ou moins grande taille. Elles doivent donc contribuer à fixer des limites pertinentes entre les grands

types de sols. Cette approche permet aussi de mieux comprendre les transformations ou les déséquilibres actuels des sols, grâce à la mise en évidence de chemins préférentiels pour l'eau, révélés par la présence de pores assurant l'écoulement gravitaire de l'eau (cylindres ou mottes) retenant seulement l'eau aux très hauts potentiels.

On constate ainsi qu'il existe un parallélisme entre l'évolution du spectre poral dans le domaine des pores de grande taille ($> 5 \mu\text{m}$), et celle des caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques.

On notera enfin, que les mesures restent simples à obtenir, qu'elles n'exigent pas un matériel coûteux et qu'elles peuvent donc être utilisées comme des techniques de routine au laboratoire.

In fine, il apparaît donc que pour mieux définir et utiliser les sols ferrallitiques, les données physiques s'avèrent indispensables. Il restera à examiner l'importance de telles données dans d'autres contextes pédologiques.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 10 mars 1992

BIBLIOGRAPHIE

- BONNEAU (M.), 1961. – Évaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. AFES*, numéro spécial : 16-26.
- BRUAND (A.), 1986. – Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Science du Sol* 24 (4) : 351-362.
- CHAMPAN (H. D.), 1965. – Cation exchange capacity. In Black, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agron. n° 9*, Am. Soc. Agron. Madison.
- CHRETIEN (J.), TESSIER (D.), 1988. – Influence du squelette sur les propriétés physiques des sols : hydratation, gonflement et aération. *Bull. AFES* 26 (4) : 255-268.
- Commission de pédologie et de cartographie des sols, 1967. – Classification des sols. *Doc. multigr.* 96 p., Grignon.
- DAMME (Van H.), Ben OHOUD (M.), 1989. – From flow to fracture and fragmentation in colloidal media. Part II. Local order and fragmentation geometry. Disorder and fracture, Nato Asi Series, J.C. Charnet Ed. Plenum.
- ESPIAU (P.), PEYRONNEL (A.), 1976. – L'acidité d'échange dans les sols : méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Science du Sol* : 161-175.
- GENUCHTEN (VAN M. Th.) 1980. – A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (44) : 892-898.
- GILLMAN (G. P.), 1984. – Using variable charge characteristics to understand the exchangeable cation status of oxic soils. *Aust. J. Soil Res.* (22) : 71-80.
- Government of the United Republic of Tanzania, 1967. – Geological Map of Tanzania 1 : 3/000.000.
- GRIMALDI (M.), TESSIER (D.), 1986. – Changement des propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'eau d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Science du Sol* 24 (4) : 313-336.
- HALL (D.G.M.), REEVE (M.J.), THOMASSON (A.J.), WRIGHT (V.F.), 1977. – Water retention porosity and density of field soils. Soil Survey Tech. Monogr. n° 9, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, 75 p.
- KÄMPF (N.), SCHWERTMANN (U.), 1982. – The 5-M-NaOH Concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays and clay Miner.*, 30 (6) : 401-408.
- KILASARA (M.), 1989. – Évolution actuelle des sols de la couverture ferrallitique de Muhéza (Tanzanie). Origine et conséquences. Thèse univ. Paris-VI, 356 p.
- LESSARD (L.), 1981. – Caractérisation hydrodynamique d'un sol non saturé et évolution structurale. *Science du Sol* (1) : 55-72.
- LESSARD (L.), 1985. – Étude de l'organisation d'un sol argilo-limoneux. Modélisation de la conductivité hydraulique à partir des relations expérimentales teneur en eau-succion. *Science du Sol* (2) : 75-88.
- MEHRA (O. P.), JACKSON (M. L.), 1960. – Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and clay Miner.* (7) : 317-327.
- MUALEM (Y.), 1976. – A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12 (3) : 513-522.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), FIES (J.C.), 1973. – Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.* 24, (5) : 533-545.
- NORRISH (K.), TAYLOR (R. M.), 1961. – The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci. Proc.* 14-17.
- REEVE (M. J.), HALL (D. J.), 1978. – Shrinkage in clayey subsoils of contrasting structure. *J. Soil Sci.*, 19 : 315-323.

- RIEUX (M.), SPOSITO (G.), 1991. - Relation pression capillaire-teneur en eau dans les milieux poreux fragmentés et identification du caractère fractal de la structure des sols. *C. R. Acad. Sci. R.* 312, série 2 : 1483-1489.
- RIVIÈRE (A.), 1977. - *Méthodes granulométriques. Techniques et méthodes sédimentologiques*. Paris, Masson, 170 p.
- ROBERT (M.), TESSIER (D.), 1974. - Méthode de préparation des argiles des sols pour études minérologiques. *Ann. Agron.*, 25 (6) : 859-882.
- ROBAIN (H.), CURMI (P.), 1986. - Rôle de la structure pédologique sur le comportement hydrique du sol aux faibles pF. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 303, II (6) : 509-514.
- SCHWERTMANN (U.), 1964. - The differentiation of iron oxides in soils by extraction with ammonium oxalate solution. *Z. Pflanzenähr., Düng., Bodenkunde* (105) : 194-202.
- Soil Conservation Service, 1975. - Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U.S. Dept. Agr., *Hand Book* n° 436, 754 p.
- TESSIER (D.), 1984. - Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation de la réhumectation. Thèse Dr ès Sciences Paris-VII, Inra Éd., 361 p.
- TESSIER (D.), BERRIER (J.), 1979. - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude du sol. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol* (1) : 67-82.