

L'évolution de la montmorillonite ferrifère, des oxydes et hydroxydes de fer dans une séquence fersiallitique au Sénégal

Étude par spectrométrie Mössbauer de la fraction fine d'échantillons de sols

Charles TOBIAS* et Christian JANOT**

* Pédologue O.R.S.T.O.M., 13680 Lançon

** Laboratoire de physique du solide. (L. A. n° 155), Université de Nancy I. C. 0140

RÉSUMÉ

On a étudié les minéraux argileux et leurs relations avec les différentes formes de fer dans la fraction fine argileuse provenant d'échantillons de deux profils d'une séquence fersiallitique sols bruns eutrophes - vertisols au Sénégal, sur roche basique de type amphibolite.

Dans ce type de pédogenèse, la montmorillonite ferrifère apparaît de manière très précoce dès les horizons d'altération profonds ; elle y est constante tout au long de la séquence.

Au cours de l'évolution pédologique, deux voies fondamentales apparaissent, selon la position topographique des profils dans le paysage :

— l'amont n'est pas favorable au maintien de la montmorillonite ferrifère dans les horizons A et (B) : ce minéral s'efface en faveur de la kaolinite et des oxydes et hydroxydes libres de fer ;

— l'aval est le siège d'une importante néogenèse de montmorillonite ferrifère, qui se manifeste préférentiellement dans les horizons d'altération du vertisol ; l'horizon (B) présente une concentration moindre de montmorillonite ferrifère, qui se trouve alors associée à de la goethite.

Sur le plan méthodologique, on note l'importance de la spectrométrie Mössbauer dans la détermination quantitative et qualitative des composés du fer : elle apparaît à ce titre comme une méthode de référence.

On souligne l'intérêt de l'étude systématique des différentes fractions granulométriques composant l'échantillon de sol, tant sur le plan de la minéralogie des principaux constituants que de l'évolution géochimique globale de la topographie.

ABSTRACT

THE EVOLUTION OF IRON MONTMORILLONITE, OXYDES AND IRON HYDROXYDES IN A FERSIALLITIC SEQUENCE IN SENEGAL. STUDY OF THE FINE FRACTION OF SOIL SAMPLES THROUGH MÖSSBAUER SPECTROMETRY

This paper deals with clay minerals and their relationships with different forms of iron, as found in the $< 2 \mu$ fraction extracted from soil samples of two profiles of a fersiallitic brown eutrophic soils - vertisols sequence in Senegal developed on basic rocks such as amphibolite.

In this type of pedogenesis, iron montmorillonite is found in the weathering horizon of the profiles and it keeps constant along the whole sequence.

During the pedological evolution, two basic processes take place, according to the topographical situation of the profile in the landscape :

— the upper part of the sequence is unpropitious to iron montmorillonite in horizons A and (B) : this clay mineral disappears in favor of kaolinite and free iron oxydes and hydroxydes ;

— in the lower part, there takes place an important neogenesis of iron montmorillonite, which develops rather in the weathering horizon of vertisoil ; horizon (B) presents a lower concentration of iron montmorillonite which is found together with goethite.

The importance of Mössbauer spectrometry for qualitative and quantitative determination of iron compounds is emphasized : it can be looked as a method of reference.

The interest of studying systematically the different granulometric fractions of the soil sample is stressed, on the level of the mineralogy of the main constituents as well as on that of the geochemical evolution of the toposequence.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch Mössbauer Spektrometrie wurde die Tonfraktion einer fersialitischen Bodenkette aus Senegal untersucht. Ein eisenhaltiges Montmorillonit ist in allen C-Horizonten der Bodenkette vorhanden.

Im oberen Teil der Bodenkette sind in den A und (B) Horizonten der sogenannten eutrophen Braunerde hauptsächlich Kaolinite, Eisenoxyde und Hydroxyde vorhanden.

Im unteren Teil der Bodenkette, in Vertisolen, ist hauptsächlich neugebildetes eisenhaltiges Montmorillonit anwesend.

Die Mössbauer Spektrometrie wurde auf Verschiedenen Körnungsfractionen jedes Bodenmusters angewandt.

Introduction

Les études pédologiques menées en Afrique tropicale sous des climats à saisons contrastées montrent fréquemment une dépendance étroite entre la nature du substratum géologique et les séquences de sols qui se développent sur ces différents matériaux. Dans les sols à évolution fersialitique, cette dépendance est très nette : le matériau parental est toujours une roche éruptive basique ou un calcaire, ou tout au moins une roche contenant une quantité assez importante de minéraux ferro-magnésiens facilement altérables ; les minéraux argileux dominants dans les sols appartiennent alors à la famille des montmorillonites.

La topographie joue un rôle très important dans la différenciation de deux types de sols fondamentaux appartenant à ce domaine, fréquemment associés en séquences ; ce sont les *vertisols*, où le minéral argileux très nettement dominant est la montmorillonite, et l'ensemble encore assez mal défini des *sols bruns eutrophes - sols rouges tropicaux*, où la *kaolinite* apparaît à côté de la montmorillonite, et peut dans certains cas devenir le minéral dominant.

Les caractères morphologiques de ces deux types de sols sont fondamentalement différents : un des éléments de différenciation les plus marquants est l'état du fer, qui apparaît très bien individualisé dans les sols bruns eutrophes, et qui est masqué dans les *vertisols*.

Le but de cette note est de préciser, grâce à l'investigation minutieuse que permet la spectro-

métrie Mössbauer, les différents états dans lesquels se trouve le fer dans la fraction fine d'échantillons de deux profils caractéristiques d'une séquence observée au Sénégal, et de préciser les rapports entre cet élément et les minéraux argileux présents.

I. LES DONNÉES GÉNÉRALES CONCERNANT LA SÉQUENCE ET LES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS

1. Le contexte pédologique général

Les échantillons étudiés proviennent de deux profils d'une toposéquence fersialitique sols bruns eutrophes - *vertisols* située à Mamakhono, dans le Sénégal sud-oriental.

Le climat de cette région est intermédiaire entre les climats sahélo-soudanais et soudano-guinéens définis par A. AUBREVILLE ; il est caractérisé par un cycle annuel à deux saisons très tranchées, avec une pluviosité annuelle d'environ 1 000 mm. La roche mère est une amphibolite assez finement cristallisée.

Les principales données morphologiques sont résumées dans la figure 1.

L'ensemble de l'étude de cette toposéquence a porté sur l'observation et l'analyse de détail de onze profils pédologiques ; les résultats obtenus sont en accord avec les observations faites sur ce sujet par différents auteurs. Nous citerons parmi les princi-

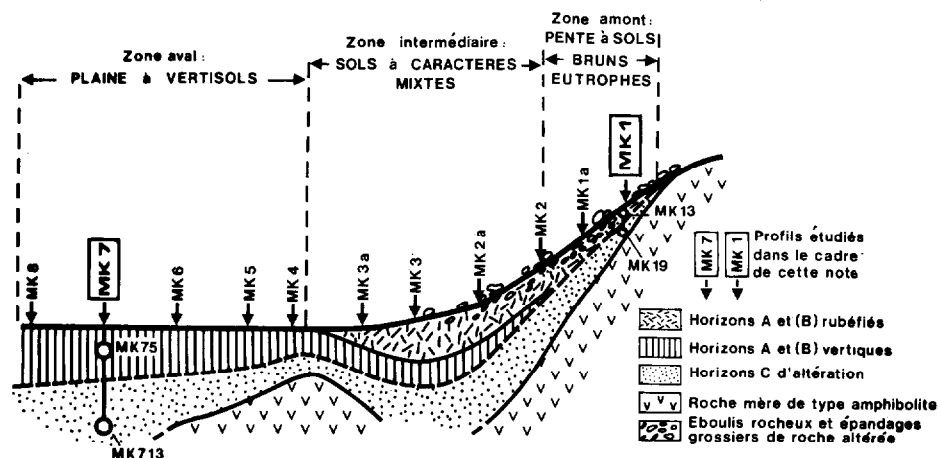


Fig. 1. — Coupe schématique de la toposéquence de Mamakhono.

paux : R. MAIGNIEN (1963), puis B. KALOGA (1966, 1970) et R. BOULET (1970) en Haute-Volta, A. CHAUVÉL (1966) et B. KALOGA (1976) au Sénégal, D. MARTIN *et al.* (1966) et G. SIEFFERMANN (1973) au Cameroun et G. BOCQUIER (1973) au Tchad. Nous avons pu confirmer et compléter certaines observations en deux points précis au Sénégal (toposéquence de Mamakhono) et au Nord-Cameroun (toposéquence de Bibémi).

Nous avons sélectionné deux profils qui nous paraissent les plus caractéristiques :

— LE PROFIL *MK 1* est situé sur le tiers supérieur de la butte (pente de 15 à 18 %) : c'est un SOL BRUN EUTROPHE TROPICAL FERRUGINISÉ (AUBERT, a, b).

Deux échantillons y ont été choisis :

- *MK 13* (profondeur : 30-45 cm) : horizon B très rubéfié, brun-rouge foncé 5 YR 3/4, à structure fine polyédrique très bien développée ;
- *MK 19* (profondeur : 120-135 cm) : altération C de la roche-mère, friable, de couleur brun-jaune très clair 10 YR 6/6.

— LE PROFIL *MK 7* est situé à environ 300 m en aval du précédent ; c'est un VERTISOL TOPOLITHOMORPHE NON GRUMOSOLIQUE MODAL.

On a également choisi deux échantillons :

- *MK 75* (profondeur : 60-75 cm) : base de l'horizon (B)₁, de couleur brun-gris foncé 10 YR 4/2, à structure prismatique large, à la limite du (B)₂ à faces obliques de glissement ;
- *MK 713* (profondeur : 200-220 cm) : horizon d'altération C₂ peu différencié, friable, de couleur brun-jaune clair 10 YR 5/6.

2. Les données analytiques

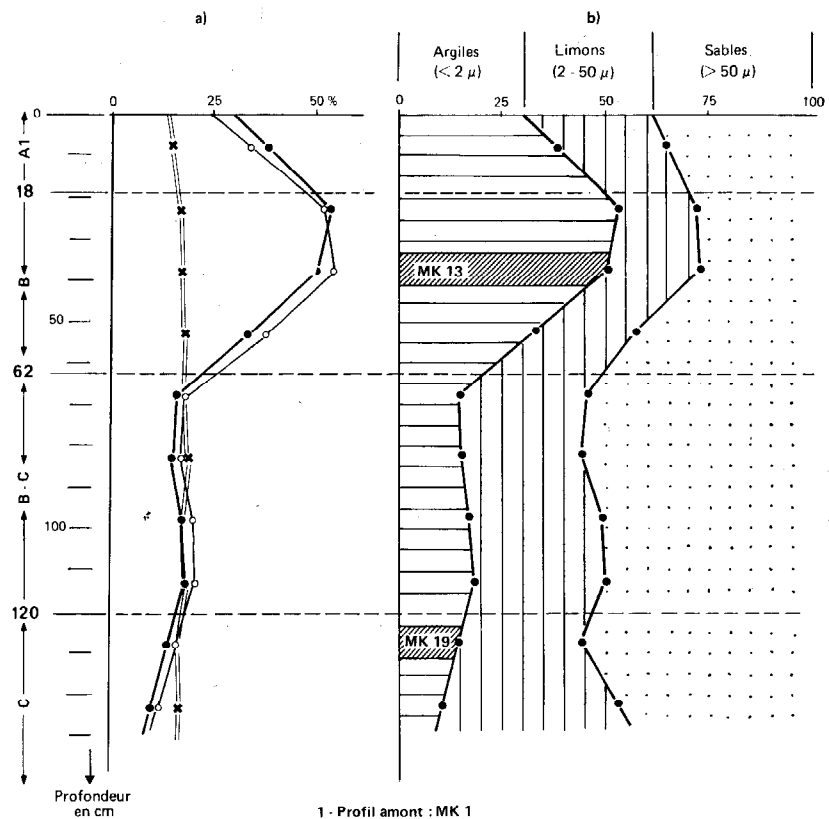
Les principales données analytiques concernant les quatre échantillons étudiés dans ce texte sont présentées dans le tableau I. La description des profils et les données analytiques plus spécifiquement pédologiques sont présentées en annexe.





Pour tous les échantillons de sol des deux profils, nous avons effectué une séparation des différentes fractions granulométriques : la fraction fine < 2 μ et les limons fins (2 < d < 20 μ) ont été séparés par sédimentation, suivant une méthode d'extraction par épuisements successifs en milieu dispersant faiblement ammoniacal ; les fractions plus grossières ont été séparées par tamisage (TOBIAS, 1976).

Les teneurs en fer total des échantillons de sol, déterminées par analyse triacide, sont assez différentes suivant les types de sols : dans le sol brun eutrophe, la teneur varie entre 16,5 et 17,2 % ; dans le vertisol, la teneur est nettement plus faible, voisine de 12 %. On note que, dans les deux cas, les variations verticales de ces teneurs en fer total sont très peu marquées, en particulier dans le cas du vertisol.

L'analyse de la répartition du fer total du sol dans les différentes fractions granulométriques, et plus précisément dans la fraction « argiles », ne confirme pas cette homogénéité apparente à l'échelle de l'échantillon de sol (fig. 2 a et b) :

- à l'amont (profil *MK 1*), une part importante du fer se trouve comprise dans la fraction argileuse de l'horizon B : il y a alors un véritable niveau d'accumulation, dans lequel 50 % du fer se trouve localisé dans cette fraction. Cette concentration diminue ensuite très rapidement quand on passe dans les horizons plus profonds : en



 Échantillons étudiés par spectrométrie Mössbauer
 a)  — Fe_2O_3 total du sol (an. triacide)
 — Taux d'argile du sol
 — % de Fe_2O_3 dans les argiles par rapport à la teneur en Fe_2O_3 total du sol

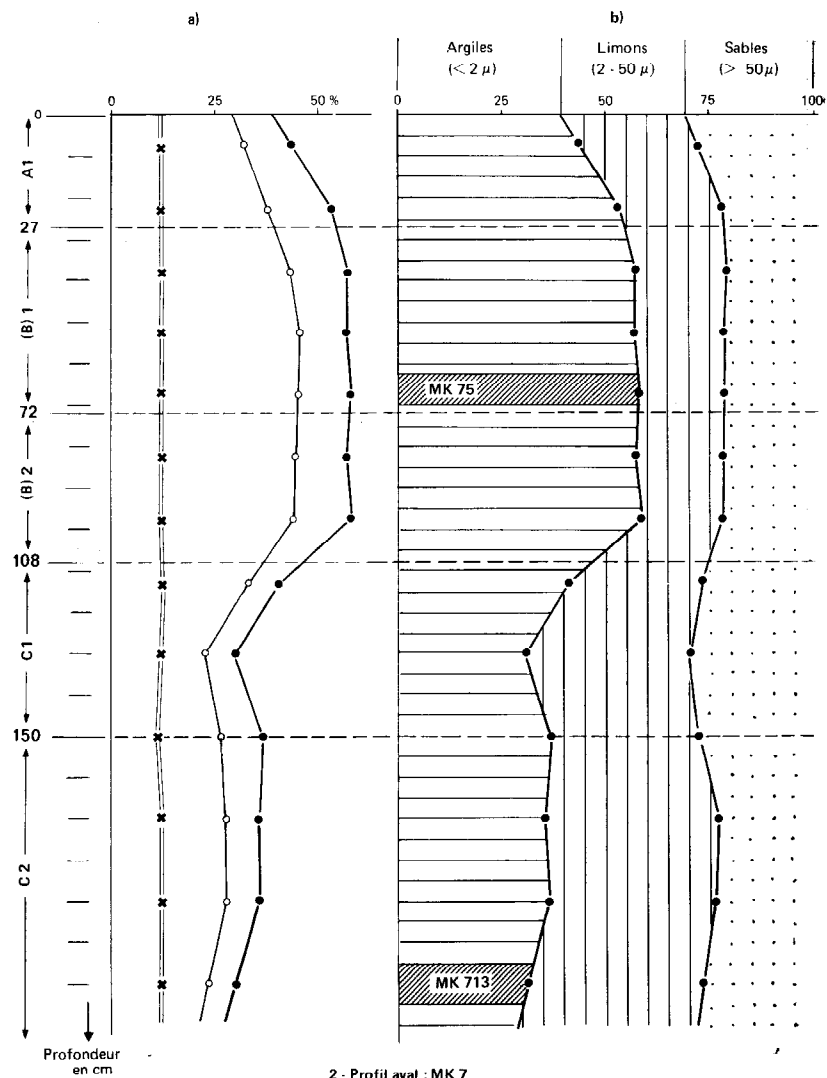


FIG. 2. — a) Répartition comparée des teneurs en fer total du sol*, en argile et en fer contenu dans cette fraction* ;
 b) Répartition du fer total du sol dans les trois fractions granulométriques principales*.
 * : exprimées en % de l'échantillon séché à 100°.

TABLEAU I
Principales données analytiques des échantillons étudiés

| Profils | Échantillons | % Argiles du sol | % Fe ₂ O ₃ du sol* | Fe _{arg.} /Fe _{tot} (%) | Composition chimique de la fraction argileuse* | | | | | | | | | | Composition minéralogique de la fraction argileuse** | | Couleur des échantillons (Munsell sol color chart) |
|-------------------|--------------|------------------|--|---|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|------------------|-------------------|---|-------|--|---|--|
| | | | | | Perte à 1 000° | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | K ₂ O | Na ₂ O | K | B (I) | (14 _C -14 _M) | M | |
| Sol brun eutrophe | MK 13 | 53,9 | 17,2 | 50 | 13,42 | 40,9 | 25,2 | 16,00 | 0,74 | 1,1 | 0,18 | 0,05 | 5 | tr. | 2 | 3 | 2,5 YR 3/6 (rouge foncé) |
| | MK 19 | 15,2 | 16,5 | 14 | 12,69 | 44,1 | 23,9 | 15,20 | 1,16 | 1,3 | 0,16 | 0,05 | 3 | — | — | 7 | 5 YR 5/6 (rouge jaunâtre) |
| Vertisol | MK 75 | 45,5 | 12,0 | 58 | 12,91 | 44,6 | 21,9 | 15,25 | 1,34 | 1,7 | 0,19 | 0,05 | 3 | — | — | 7 | 5 YR 4/2 (gris rougeâtre foncé) |
| | MK 713 | 24,3 | 11,8 | 20 | 6,85 | 53,8 | 18,5 | 14,85 | 2,38 | 1,7 | 1,51 | 0,77 | 1 | tr. | — | 9 | 10 YR 5/4 (brun jaunâtre) |

K = kaolinite ; B (I) = minéraux micacés ; (14_C-14_M) : interstratifié chlorite-montmorillonite ; M = montmorillonite.

* En % de l'échantillon séché à 110°.

** Nous devons ces déterminations à M^{me} H. PAQUET, laboratoire de Sédimentologie et de Géochimie de la surface, Université de Strasbourg.

MK 19 on ne trouve plus que 14 % du fer total dans la fraction fine, la majeure partie étant dans les sables. La concentration en fer est très étroitement liée à la teneur en argiles : les deux courbes sont pratiquement superposables.

- dans le profil de vertisol (MK 7), on note que globalement presque la moitié du fer total se trouve dans la fraction fine ; les variations de la proportion de fer total compris dans cette fraction se font de manière analogue à celles du profil amont, mais sont très atténuées (58 % en MK 75 et 30 % en MK 713) : il n'y a pas de niveau d'accumulation bien individualisée en (B).

Les minéraux argileux dominants sont la montmorillonite et la kaolinite (fig. 3) qui ne sont pas répartis de manière égale dans les fractions granulométriques ; on présente dans la figure 4 la répartition de

ces minéraux dans les fractions « argile », « limon fin » et « limon grossier » :

- dans le profil de l'amont, la kaolinite est surtout abondante dans la fraction la plus fine de l'horizon B ; la montmorillonite est le minéral le plus abondant dans les fractions limoneuses de l'horizon d'altération de ce même profil.
- à l'aval, la kaolinite est très peu abondante dans l'horizon (B) du vertisol, et pratiquement absente à la base du profil. La montmorillonite est le minéral très nettement dominant dans l'ensemble du profil : elle est surtout concentrée dans la fraction argileuse de l'horizon d'altération. Nous remarquons une répartition particulière de ce minéral qui diminue en deux points du profil, dans la fraction Limons Fins ; nous proposerons par la suite une explication à ce fait.

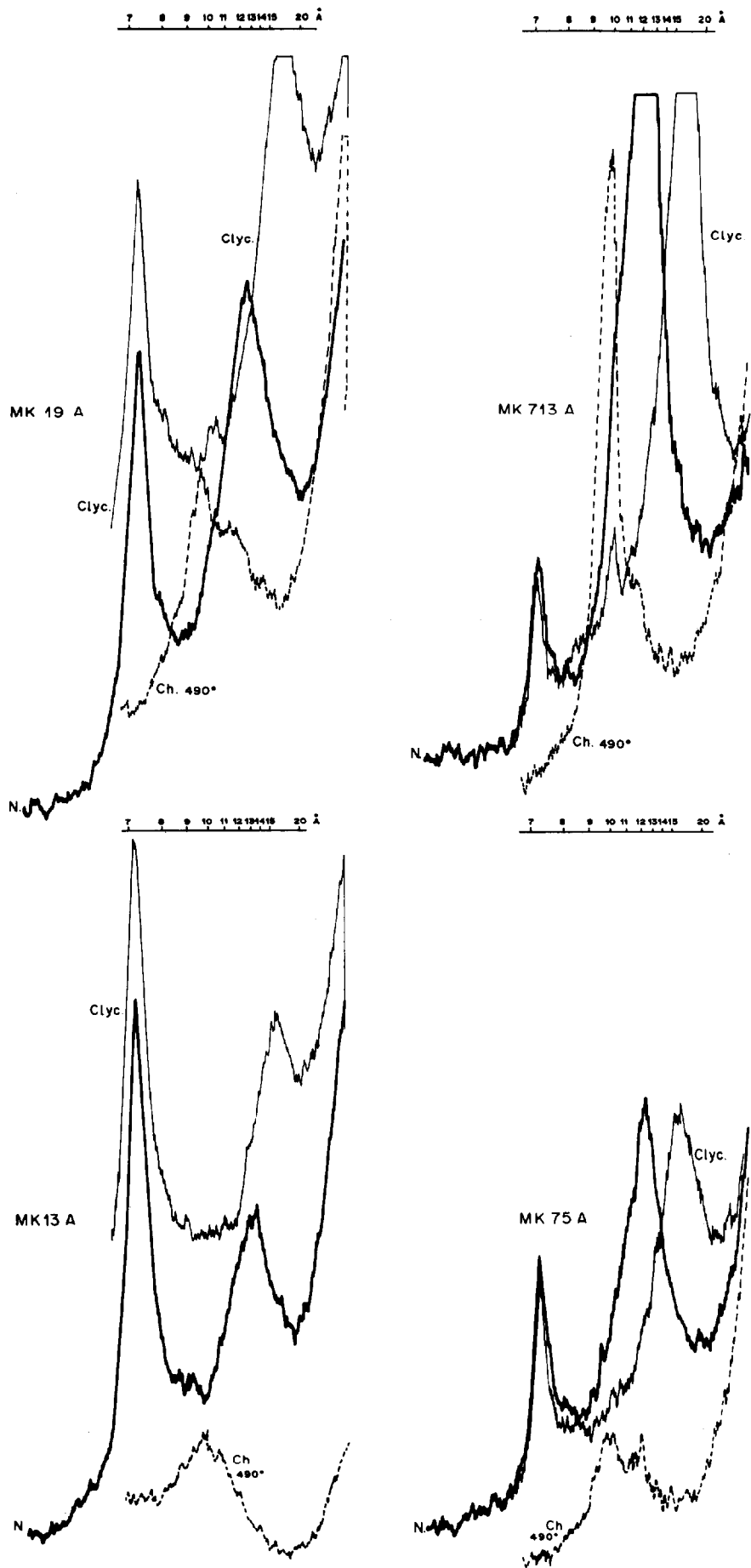


FIG. 3. — Les minéraux argileux des quatre échantillons de la fraction fine.

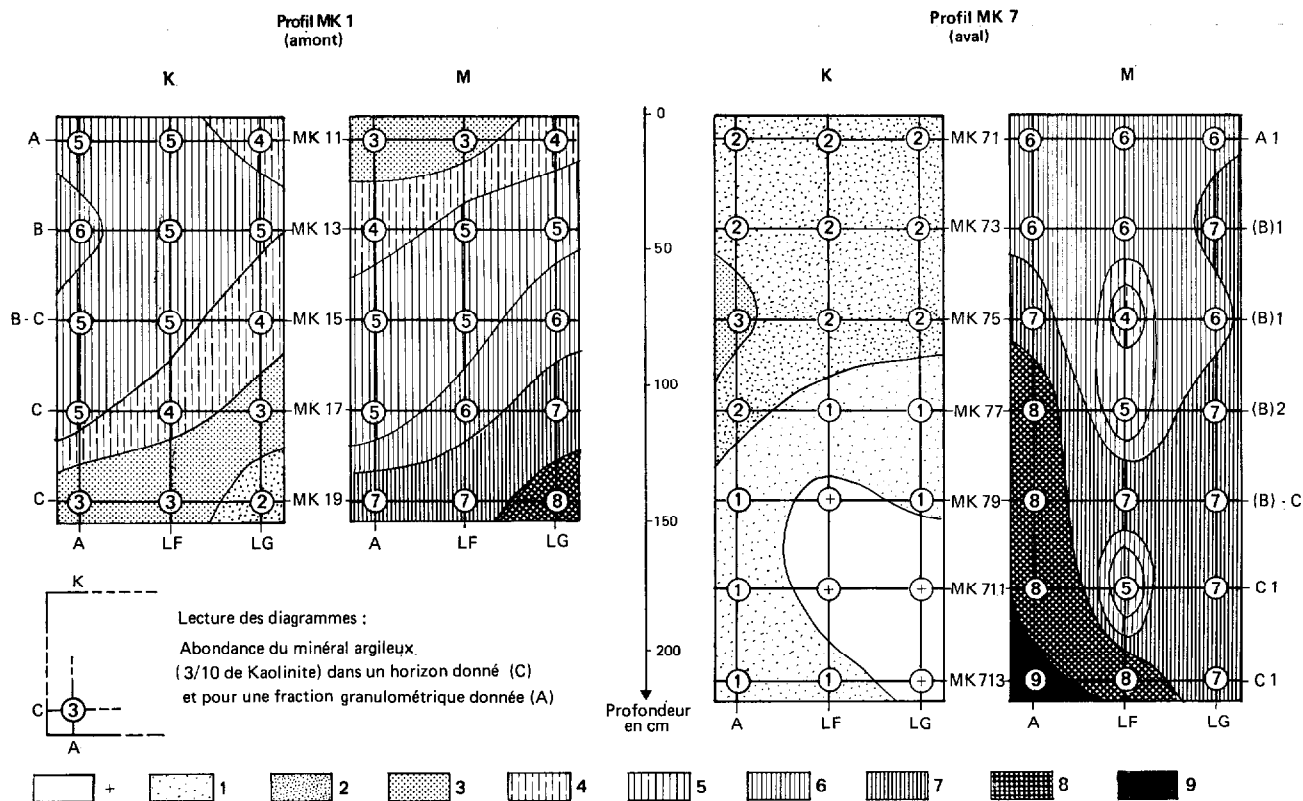


FIG. 4. — Diagrammes d'abondance de la kaolinite et de la montmorillonite dans les fractions « argile », « limon fin » et « limon grossier » (estimations d'après diffractométrie des R.X.).

II. MÉTHODE D'OBSERVATION

Nous avons observé quatre échantillons de la fraction inférieure à 2μ , provenant d'échantillons de sols représentatifs des principales situations géochimiques de la séquence :

- à l'amont, MK 13 (hor. B) et MK 19 (hor. C) ;
- à l'aval, MK 75 (hor. (B)₁) et MK 713 (hor. C).

La spectrométrie Mössbauer a été réalisée pour caractériser qualitativement et quantitativement la présence du fer, notamment en ce qui concerne la nature des formes chimiques en présence, leurs concentrations relatives, l'état de cristallisation, les taux de substitution éventuelle par des éléments tels que l'aluminium, l'état d'oxydation et la fraction du fer qui se trouve en substitution, par exemple dans les sites octaédriques ou tétraédriques des feuillets de matériaux argileux.

Nous ne reviendrons pas sur la description de cette méthode, qui a déjà été présentée dans les études antérieures (JANOT *et al.*, 1973 ; LAMOUROUX *et al.*, 1977).

La goéthite et l'hématite ont été décelées avec certitude par diffractométrie des rayons X dans le

cas les plus favorables (échantillons MK 13 et MK 75) ; mais la très faible taille de ces éléments et leur faible concentration rendent cette détermination aléatoire dans les horizons d'altération, et nécessitent une méthode d'investigation plus fine.

Des exemples de spectres Mössbauer obtenus à partir de l'échantillon MK 13 sont présentés dans la figure 5).

III. RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES SPECTRES

Les résultats obtenus pour l'analyse des quatre échantillons sont présentés dans le tableau II : on y indique, pour chaque échantillon, les différentes formes sous lesquelles se trouve le fer et la proportion de fer présente dans chacune de ces formes, exprimée par rapport à 100 g d'échantillon de sol. On précise en outre, pour l'hématite et la goéthite, une répartition de la taille des constituants en trois classes granulométriques : fraction ultra-fine comprise entre 30 et 80 Å, fraction fine comprise entre 80 et 150 Å et la fraction dite « massique » de taille

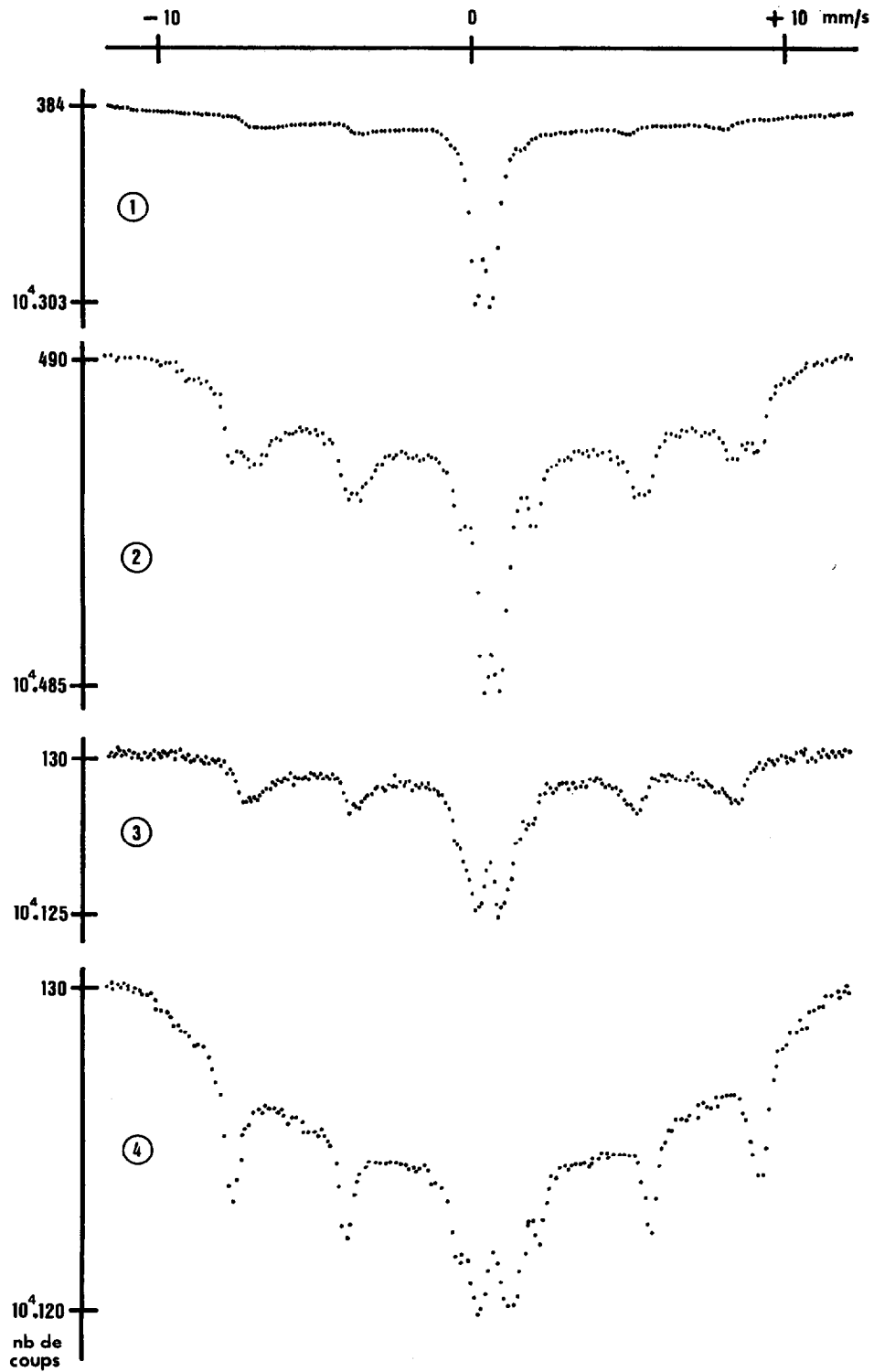


FIG. 5. — Exemples de spectres Mössbauer obtenus à partir de l'échantillon MK 13 A.
 1 : à la température ambiante ; 2 : à la température de l'azote liquide ;
 3 et 4 : après recuit de 5 heures à 450° C et observés aux mêmes températures que précédemment.

TABLEAU II

Les données de la spectrométrie Mössbauer : la répartition des formes du fer de la fraction argileuse

| Formes du fer | Sol brun eutrophe : profil MK 1 | | | Vertisol : profil MK 7 | | |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------|-------------------------------------|--|
| | Échant. | Fe ₂ O ₃ (%)* | Répartition des formes du fer** | Échant. | Fe ₂ O ₃ (%)* | Répartition des formes du fer** |
| Hématite α (Fe _{1-x} M _x) ₂ O ₃ | | 2,40 | 28 % du fer total 30 < d < 80 Å x ≈ 10-12 % (M ≈ Al) | — | — | non décelée |
| Goethite α (Fe _{1-x} M _x) O OH | MK 13 | 3,45 | dont { 40 % du fer total 15 % d > 200 Å 13 % 80 < d < 150 Å 12 % 30 < d < 80 Å x ≈ 10-12 % (M = Al) | MK 75 | 3,40 | 49 % du fer total 21 % 80 < d < 150 Å 28 % 30 < d < 80 Å x ≈ 10-12 % (M = Al) |
| Fer silicaté | | 2,76 | 32 % du fer total | | 3,54 | 51 % du fer total |
| Hématite α (Fe _{1-x} M _x) ₂ O ₃ | | — | — non décelée | | — | non décelée |
| Goethite α (Fe _{1-x} M _x) O OH | MK 19 | 1,17 | dont { 51 % du fer total 38 % 80 < d < 150 Å 13 % 30 < d < 80 Å x ≈ 8 % | MK 713 | 0,54 | ~ 15 % du fer total 30 < d < 80 Å x ≈ 8 % (M = Al) |
| Fer silicaté | | 1,13 | 49 % du fer total | | 3,07 | ~ 85 % du fer total |

* Teneur en fer sous la forme considérée pour 100 g de sol.

** Teneur en fer exprimée en % du fer total de la fraction < 2 μ.

d = dimension moyenne des particules.

x = taux de substitution du fer.

supérieure à 200 Å (0,02 μ) ; on donne également le taux de substitution du fer — principalement par de l'aluminium — dans le réseau cristallin.

Dans le cas de l'échantillon MK 713, l'analyse du fer silicaté en position octaédrique est un peu moins précise que pour les trois autres échantillons, car les sextuplets correspondant à α FeOOH restent mal résolus à toutes températures ; la valeur ~ 15 % indiquée pour la goethite signifie en réalité « compris entre 12 et 18 % ».

1. Localisation et nature des minéraux du fer libre

L'HÉMATITE α (Fe_{1-x}M_x)₂ O₃ a été décelée uniquement dans l'échantillon MK 13, où elle constitue environ le quart du fer total présent. Elle s'y trouve sous forme de particules ultra-fines de taille

inférieure à 80 Å (0,008 μ), où 10 à 12 % du fer est substitué, vraisemblablement par de l'aluminium.

Elle est totalement absente des autres échantillons. Il est probable que ce minéral est également absent, ou tout au moins très faiblement représenté, dans les fractions granulométriques plus grossières des trois autres échantillons de sol : on peut difficilement admettre, dans ce contexte pédologique, la localisation exclusive de ce minéral dans les fractions plus grossières sans le trouver dans la fraction argileuse, ne serait-ce qu'à l'état de traces.

LA GOETHITE α (Fe_{1-x}M_x) O OH est présente dans les quatre échantillons étudiés.

Elle est abondante dans les deux échantillons de sol brun eutrophe, où elle constitue 40 % du fer total en B ; cette proportion augmente jusqu'à 50,8 % dans l'horizon d'altération sous-jacent.

Elle est également abondante dans l'horizon (B) du vertisol (49, % du fer total), mais sa teneur baisse considérablement dans l'horizon d'altération où elle ne représente plus que 15 % du fer total. Ce minéral est très bien cristallisé dans l'horizon B du profil amont ; la qualité de la cristallisation régresse ensuite pour MK 19 et MK 75 : elle est très médiocre dans l'horizon d'altération du vertisol où la goethite ne se trouve plus que sous la forme de particules ultrafines.

On remarque enfin que le taux de substitution du fer par l'aluminium est plus élevé dans les horizons (B) (10 à 12 %) que dans les niveaux d'altération.

2. Le fer présent dans les réseaux silicatés

Le fer en position de substitution dans les feuillets tétraédriques de silicates, aisément décelable par cette méthode, n'a été observé dans aucun échantillon ; il n'a jamais été mis en évidence de Fe^{++} .

Tout le fer silicaté mesuré se trouve en substitution dans des feuillets octaédriques ; l'analyse minéralogique permet d'affirmer qu'il est intégré pour la plus grande part dans le réseau de la *montmorillonite*, qu'elle soit sous forme d'édifices réguliers, les plus abondants, ou d'interstratifiés de type 14_c-14_x faiblement représentés dans l'échantillon MK 13. L'interstratifiés B (I) n'est présent qu'à l'état de trace dans les deux échantillons.

Nous ne retiendrons pas la possibilité d'intégration du fer dans le réseau de la kaolinite ; des travaux antérieurs (JANOT, GIBERT et TOBIAS, 1973) ont montré qu'elle ne concerne que des quantités très faibles de fer.

Par convention, nous appellerons « fer silicaté » la forme de fer intégrée dans le feuillet octaédrique de la montmorillonite. Il est présent dans tous les échantillons étudiés, et peut atteindre des teneurs très élevées (~ 85 % du fer total de la fraction argileuse en MK 13) :

- dans le sol brun eutrophe, le fer silicaté représente 32 % du fer total de la fraction fine ; cette proportion augmente de manière notable dans la zone d'altération du même profil où il constitue environ la moitié du fer total présent.
- dans le vertisol, il représente la moitié du fer total dès l'horizon (B) ; cette valeur augmente considérablement en profondeur où le fer silicaté représente 85 % du fer total présent.

En valeur absolue, le fer des montmorillonites diminue plus que de moitié à l'amont en passant de B à C. A l'aval, les chiffres correspondant à ces deux niveaux sont peu différents et élevés.

IV. DISCUSSION DES RÉSULTATS

1. L'évolution des minéraux argileux

Nous avons comparé les résultats de l'analyse minéralogique et de l'estimation semi-quantitative des trois fractions « argile », « limon fin » et « limon grossier » (fig. 4). Ces déterminations n'ont pas été effectuées pour les fractions plus grossières, mais permettent néanmoins de saisir le sens de l'évolution générale des minéraux argileux.

(a) DANS LE PROFIL DE SOL BRUN EUTROPHE

La kaolinite est présente en faible quantité dès les horizons d'altération profonds ; sa teneur augmente de manière régulière dans chaque fraction granulométrique quand on s'élève dans le profil : cette augmentation est cependant plus rapide dans la fraction inférieure à 2μ .

La montmorillonite évolue de manière parallèle mais en sens inverse. Elle est surtout concentrée dans les fractions plus grossières : pour un échantillon donné, sa teneur diminue toujours vers les fractions fines. Pour chacune des fractions, sa teneur diminue depuis l'horizon d'altération jusqu'à l'horizon de surface ; comme pour la kaolinite, cette variation est plus rapide dans la fraction fine.

La complémentarité de l'évolution de ces deux minéraux apparaît ici évidente ; on peut formuler les remarques suivantes pour comprendre cette répartition :

- eu égard aux conditions physiques du milieu et aux répartitions respectives de ces deux minéraux, on pourrait conclure que la kaolinite est issue de la transformation des minéraux montmorillonitiques. Nous ne disposons d'aucun argument permettant d'affirmer que cette voie existe ou n'existe pas.
- on peut envisager, au cours de la pédogenèse du sol brun eutrophe, une destruction par hydrolyse des minéraux montmorillonitiques, conduisant à une concentration relative de la kaolinite qui est déjà présente dans les horizons profonds de l'altération. Nous avons déjà noté cette possibilité de concentration relative à propos du fer : elle existe certainement aussi en ce qui concerne la kaolinite, mais on ne peut préciser dans quelle proportion.
- les horizons superficiels de la partie amont de la séquence comprennent une proportion importante d'éléments grossiers (graviers et blocs de roche pouvant atteindre 75 % de la masse globale du matériau) ; si l'on considère la forte pente de l'amont de la séquence, on doit tenir compte d'un entraînement mécanique par ruissellement des éléments les plus fins aussi bien le long de la

séquence que verticalement dans le profil. Il y aurait simultanément appauvrissement en argile de l'horizon A par entraînement de surface, et accumulation dans l'horizon B d'un matériau à dominance kaolinique. Les courbes de répartition de la fraction fine dans les profils confirment ces deux dernières remarques.

(b) DANS LE PROFIL DE VERTISOL

La kaolinite est très peu représentée dans l'horizon d'altération, où on ne la trouve qu'à l'état de trace dans les fractions Limons Fins et Grossiers. Dans les horizons A et (B) sa teneur demeure relativement constante et faible dans les trois fractions.

La répartition de la montmorillonite est sensiblement différente : globalement, sa teneur diminue depuis les niveaux de l'altération jusqu'à l'horizon de surface. Mais on constate au niveau des horizons (B) et C une diminution assez nettement marquée de sa teneur dans la fraction Limons Fins ; ceci correspond à une concentration de minéraux de type Biotite-Illite. La présence de tels minéraux a également été notée à l'état de trace dans les échantillons de sol brun eutrophe :

- ce que nous savons du comportement géochimique de la séquence et notamment du rôle de « récepteur » joué par l'aval nous permet de penser que l'augmentation de la teneur en montmorillonite que l'on note dans la fraction fine — tant dans l'évolution des fractions granulométriques d'un même échantillon de sol que des variations verticales dans un même profil — peut être attribué à une néogenèse de ce minéral.
- au cours de leur processus d'altération, les minéraux de type micas se retrouvent souvent concentrés dans une fraction granulométrique précise ; ceci a été constaté pour d'autres échantillons de vertisols de cette séquence, et suggère la notion d'un « seuil granulométrique » que ces minéraux ne peuvent franchir au cours de leur altération sans subir de transformation profonde, dans un milieu qui n'est pas favorable à leur maintien.

Les quelques observations que nous avons pu effectuer sur les sables fins et sables grossiers montrent notamment une certaine abondance de minéraux micacés de type biotite, présents tout au long de la séquence et plus particulièrement dans les horizons d'altérations. Après extraction de ces minéraux par vibration sur plan incliné, nous avons dû constater que même après un lavage soigneux il subsiste une proportion importante de montmorillonite. La liai-

son entre ces deux minéraux est étroite, et suggère que la biotite s'altère en montmorillonite : celle-ci apparaît de manière très précoce dans le processus d'altération de la roche mère de la séquence.

2. Les variations du fer total de la fraction argileuse

Les fractions $< 2 \mu$ des quatre échantillons ont des teneurs en fer total assez voisines : elles se situent entre les deux valeurs extrêmes de 14,85 % pour MK 713 et 16,00 % pour MK 13.

Par suite des différences de teneur en argiles des échantillons de sol, on observe des variations corrélatives importantes dans la répartition du fer total des sols, qui se traduisent comme suit (tableau III) :

- dans les horizons (B) la moitié du fer total de l'échantillon de sol se trouve dans la fraction fine. Cette proportion augmente légèrement vers l'aval où elle atteint 58 %. En tenant compte des variations de la teneur en éléments fins, on constate que la valeur de P, qui exprime le taux de fer total compris dans la fraction fine pour 100 g de sol passe de 8,6 à 6,9 %.
- dans les horizons d'altération C, la quantité de fer de la fraction inférieure à 2μ est beaucoup plus faible qu'en (B) : elle ne concerne que 14 % du fer total de l'échantillon de sol à l'amont, mais cette valeur augmente notablement, jusqu'à 30 %, à l'aval. La variation de P est inversée par rapport aux horizons (B) : ce rapport passe de 2,3 à l'amont à 3,6 à l'aval.

Ces variations traduisent la tendance générale qu'a le fer, au cours de la formation de ces sols, à se déplacer de l'amont vers l'aval et à se concentrer en certains points des profils. Au cours de travaux effectués par ailleurs, on a appliqué à l'ensemble des profils étudiés et à ces mêmes échantillons le raisonnement isotitane, où l'on compare les variations des teneurs respectives en fer et en titane ; ceci permet d'affirmer que, entre autres mécanismes possibles, une accumulation absolue du fer intervient de manière certaine dans la répartition que l'on observe :

- la teneur en fer dans la fraction fine augmente toujours lorsqu'on passe des horizons C aux horizons (B) ; cette concentration est très importante en amont de la séquence (rapport 8,6/2,3 \sim 4) ; elle est plus faible à l'aval (rapport 6,9/3,6 \sim 2).
- au long de la séquence, il y a une variation latérale qui se fait en sens contraire en (B) par rapport à C : la quantité totale de fer comprise dans la fraction argileuse des horizons (B) diminue d'amont en aval, alors qu'elle augmente dans les horizons C.

3. La répartition des différentes formes du fer de la fraction argileuse (tableaux II et III)

(a) DANS LE SOL BRUN EUTROPHE

Les teneurs en *goethite*, exprimées par rapport à l'échantillon de sol, varient entre 1,17 % en C et 3,45 % en (B) : il y a donc une augmentation quantitative importante de ce minéral en s'élevant dans le profil (rapport $3,45/1,17 = 2,95$). Cette variation ne se fait pas dans le même sens si on rapporte les résultats plus précisément à la fraction argileuse, dont la teneur varie considérablement entre (B) et C : la *goethite* est alors légèrement plus concentrée dans la fraction fine de l'horizon C (Fe B sont respectivement de 7,69 et 6,40 %, avec un rapport de 0,83).

Globalement, ceci correspond à une *augmentation importante en (B) de la goethite, par rapport à C.*

On a déjà noté la présence exclusive d'*hématite* dans l'horizon (B) ; elle s'y trouve en quantité non négligeable si on la compare aux autres formes de fer présentes.

Le *fer silicaté* varie de manière sensiblement analogue à la *goethite* : sa teneur dans l'échantillon de sol est très voisine de celle de la *goethite* en C, un peu plus faible en (B) (rapport de l'ordre de 2,4) ; mais sa concentration dans la fraction argileuse est un peu plus marquée que pour la *goethite* : Fe B passe de 5,12 % en (B) à 7,43 % en C (rapport 0,69).

Goethite et fer silicaté de la fraction argileuse du sol brun eutrophe varient de manière analogue : leur quantité en valeur absolue augmente quand on s'élève dans le profil, mais la concentration de ces deux formes de fer dans cette même fraction fine est plus élevée dans l'horizon d'altération.

(b) DANS LE PROFIL AVAL : VERTISOL

La teneur en *goethite*, exprimée par rapport à l'échantillon de sol, augmente considérablement quand on s'élève dans le profil : les valeurs passent respectivement de 0,54 % en C à 3,40 % en (B) et leur rapport est très élevé (6,30). La différence de composition granulométrique entre C et (B) atténue cette

TABLEAU III

Répartition du fer total et des différentes formes du fer dans les échantillons de sol et dans la fraction < 2 μ

| Échantillons | Fe ₂ O ₃ (%) du sol | Fe ₂ O ₃ (%) de la fraction « argile » | Rapport P (%) (1) | Fer _{arg.} / Fer _{sol} (%) | Hématite | | Goethite | | Fer silicaté | | |
|----------------------|---|--|----------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| | | | | | FeA (%) (2) | FeB (%) (3) | FeA (%) (2) | FeB (%) (3) | FeA (%) (2) | FeB (%) (3) | |
| Sol brun eutrophe | MK 13 (hor. (B)) | 17,20 | 16,00 | 8,61 | 50 | 2,40 | 4,45 | 3,45 | 6,40 | 2,76 | 5,12 |
| | MK 19 (hor. C) | 16,50 | 15,20 | 2,3 | 14 | — | — | 1,17 | 7,69 | 1,13 | 7,43 |
| Rapport MK 13/MK 19 | | | | | | | | 2,95 | 0,83 | 2,44 | 0,69 |
| Vertisol | MK 75 (hor. (B)) | 12,00 | 15,25 | 6,9 | 58 | — | — | 3,40 | 7,47 | 3,54 | 7,78 |
| | MK 713 | 11,80 | 14,85 | 3,6 | 30 | — | — | 0,54 | 2,22 | 3,07 | 12,63 |
| Rapport MK 75/MK 713 | | | | | | | | 6,30 | 3,36 | 1,15 | 0,61 |

(1) Teneur en fer total de la fraction « argile » pour 100 g de sol.

(2) Teneur en Fe₂O₃ de la forme considérée pour 100 g de sol = FeA.

(3) — — — — — 100 g d'argile = FeB.

augmentation : ce rapport demeure cependant élevé, égal à 3,36.

Les teneurs en fer silicaté en (B) et C sont assez peu différentes quand on les exprime par rapport à l'échantillon de sol. Par contre, on note une très forte augmentation de la teneur en fer silicaté dans la fraction inférieure à 2μ quand on passe de (B) en C : le rapport des deux teneurs est très bas (0,61) et la valeur absolue des teneurs est particulièrement élevée, notamment en MK 713.

Goethite et fer silicaté sont répartis de manière très différente dans le profil de vertisol : dans deux échantillons dont la teneur en fer total est très voisine ($\sim 15\%$), ces deux formes sont également représentées dans l'horizon (B) ; le passage à l'horizon C se traduit par une augmentation considérable du fer silicaté (qui double pratiquement) et une diminution de la goethite dont la proportion devient plus que trois fois faible. Il est remarquable que la teneur en fer silicaté dans l'horizon C est très élevée en valeur absolue : elle y représente 85 % du fer total présent dans la fraction inférieure à 2μ .

Dans des échantillons qui apparaissent relativement homogènes pour ce qui concerne la teneur en fer total de la fraction fine, l'étude détaillée des formes du fer montre des divergences importantes dans la répartition de ces différentes formes, tant au niveau des profils que de la séquence :

- globalement, la pédogenèse conduit à l'amont à une individualisation très marquée des oxydes et hydroxydes de fer ; on trouve simultanément la goethite et l'hématite. Ce fait n'est pas nouveau, et a été décrit de nombreuses fois par ailleurs pour ce type de sol.
- à l'aval, la différenciation pédologique depuis l'horizon d'altération se fait avec une augmentation importante de la goethite ; ceci n'est pas confirmé par l'examen morphologique des profils et notamment par la couleur des échantillons de sol, qui ne font pas apparaître d'oxydes et hydroxydes de fer individualisés.
- dans tous les cas, la fraction fine des horizons C contient une proportion importante de fer silicaté, dont la proportion augmente vers l'aval. Les données de l'analyse minéralogique et de la spectrométrie Mössbauer montrent qu'il s'agit de minéraux argileux de type montmorillonite ferrifère.

On note une similitude curieuse du point de vue de la forme et de la répartition du fer dans les horizons d'altération de l'amont (éch. MK 19) et dans l'horizon (B) de l'aval (éch. MK 75). Les seules différences portent sur une cristallinité meilleure de la goethite à l'amont et sur une substitution un peu plus élevée de ce minéral à l'aval.

Ces deux échantillons ont une composition miné-

ralogique des argiles analogues ($M = 7$; $K = 3$). Cette dernière constatation met l'accent sur la complémentarité étroite qui existe entre les différents états du fer et les minéraux argileux présents. Cette situation ne peut s'expliquer que dans un contexte géochimique plus large.

4. La dynamique géochimique de la séquence

Les deux types fondamentaux de sols qui sont décrits se développent toujours sur une roche basique à la faveur d'une pente et sous un climat à saisons contrastées.

Le processus qui conditionne la différenciation de cette séquence fersiallitique est une libération d'éléments (alcalins, alcalino-terreux, silice, et dans une certaine mesure le fer) et leur migration latérale depuis un amont très perméable, jusqu'à l'aval, milieu confiné peu favorable aux circulations d'eau, qui joue le rôle de récepteur.

Ces déplacements d'éléments s'accompagne d'une nouvelle organisation du matériau pédologique, que l'on peut étudier aussi bien à l'échelle des fractions granulométriques de l'échantillon de sol que du profil ou de la séquence ; nous avons déjà noté les conséquences de cette dynamique sur la nature et la répartition des minéraux argileux et des composés du fer.

H. PAQUET (1970) et par la suite de nombreux auteurs ont signalé la présence générale de montmorillonite dans les profils développés sur roche basique en zone tropicale sèche à saisons contrastées ; des travaux antérieurs (TRAUTH *et al.*, 1967) ont montré que les montmorillonites des vertisols sont ferrifères : l'origine proposée est une néoformation de ces minéraux par recombinaison des éléments libérés dans le milieu par hydrolyse des silicates.

Lors de la saison des pluies, le milieu est saturé en eau pendant une assez longue période ; la température moyenne élevée aidant, le contexte est alors particulièrement favorable à l'hydrolyse des minéraux primaires : parmi ceux-ci les micas et les amphiboles vont libérer des quantités importantes de fer oxydé et de silice. Les conditions de drainage et de topographie de l'amont permettent une évolution des produits libérés, qui vont se réorganiser dans leur site d'accueil à l'aval.

— *Éluviation de l'ensemble du profil amont, illuviation de l'aval et néoformation différée de minéraux secondaires (H. PAQUET, 1970) seront les deux processus dominants.*

On a constaté une humidité résiduelle relativement élevée dans l'horizon d'altération pendant la saison sèche, permettant encore à l'altération de se poursuivre dans les niveaux profonds.

— *La néoformation directe sera alors le processus dominant* (LAMOUROUX, 1972).

Les éléments solubilisés par l'altération vont rester en place, en adoptant une structure cristalline susceptible d'évoluer suivant les conditions de pédogenèse pendant la saison des pluies. Cette évolution sera très rapidement bloquée dans les horizons supérieurs des profils ; elle pourra se poursuivre, bien que lentement, pendant une grande partie de la saison sèche dans les horizons d'altération, probablement favorisée par la concentration progressive des solutions (évaporation et remontées capillaires, consommation d'eau par les plantes).

CONCLUSIONS

L'essentiel de cette étude, qui concerne l'analyse par spectrométrie Mössbauer d'une fraction granulométrique précise de sols, repose sur l'observation d'un nombre limité d'échantillons ; il convient donc de situer les conclusions dans le cadre restreint de la séquence étudiée, et d'éviter une généralisation que seule l'étude d'un grand nombre de cas autoriserait.

1. L'évolution du fer, et les relations de cet élément avec les minéraux argileux de type montmorillonite

Les problèmes concernant plus précisément la formation et l'évolution des minéraux argileux dans les sols fersiallitiques ont été étudiés en détail par différents auteurs, parmi lesquels nous citerons M. PAQUET (1970) dans les régions méditerranéennes et tropicales à saisons contrastées, M. LAMOUROUX au Liban (1972) et G. SIEFFERMANN au Cameroun (1973).

En ce qui concerne les relations entre la montmorillonite et le fer d'une part, et d'autre part l'évolution des oxydes et hydroxydes de fer libres, on peut dégager les faits marquants suivants :

— *dans la séquence fersiallitique sol brun eutrophe-vertisol du Sénégal, la montmorillonite ferrifère est le minéral argileux qui apparaît en premier lieu, dès les premiers stades de la pédogenèse dans les horizons profonds de l'altération.*

Ce minéral caractérise un type d'altération de roche basique, dans laquelle le fer est assez abondant ; il se développe aussi bien à l'amont qu'à l'aval dans ce milieu moyennement drainé.

Le mécanisme principal qui intervient dans l'édification de ce minéral est la *néoformation* à partir

d'éléments solubilisés par hydrolyse, qui dans notre cas peut être directe ou différée ; il est dominant à l'aval. Plusieurs auteurs ont noté également la possibilité dans ces conditions d'une *transformation par dégradation* de minéraux micacés (MILLOT, 1964 ; TARDY, 1969 ; NOVIKOFF *et al.*, 1972) qui pourraient conduire, suivant la position dans le profil, à de la montmorillonite (hor. C) ou à de la kaolinite (hor. (B)).

La topographie permet une redistribution le long de la séquence des produits libérés, avec lixiviation de l'amont et accumulation à l'aval, comme le montrent les résultats de l'analyse chimique. Les deux zones principalement touchées par cette redistribution sont la partie supérieure des profils amont et les horizons profonds de l'altération aval :

— à l'amont, et dans les horizons d'altération, le fer se répartit de manière égale entre la montmorillonite ferrifère et la goéthite, dans l'horizon B la proportion de montmorillonite ferrifère diminue, une partie plus importante du fer se trouve sous forme libre cristallisée en goéthite et hématite : c'est la rubéfaction de l'horizon B.

La pédogenèse du sol brun eutrophe est opposée au maintien de la montmorillonite ferrifère dans la partie supérieure du profil. Les conditions physico-chimiques nouvelles de ce milieu lixivié et bien drainé favorisent l'apparition de la kaolinite, associée à des oxydes et hydroxydes de fer.

— la portion aval de la séquence montre une illuviation importante, avec probablement une concentration ionique plus élevée des solutions d'imprégnation. Pour des raisons de constitution physique du milieu (porosité et perméabilité du matériau), on peut admettre que le transit des solutions est beaucoup plus important en C qu'en (B). Cette hypothèse est confirmée par la répartition des éléments très mobiles comme les alcalins et alcalino-terreux. La teneur en silice est élevée, et permet l'élaboration d'un maximum de montmorillonite, dont l'analyse montre qu'elle est surtout ferrifère : 85 % du fer total présent s'y trouve piégé, associé à une faible quantité de goéthite mal cristallisée. Nous avons noté par ailleurs que cette concentration en silice peut conduire à des phénomènes de silicification secondaire, qui ont été observés dans la séquence de Bibémi (Nord-Cameroun) et au Sénégal par J. M. WACKERMANN (1967).

Dans l'horizon (B) du vertisol, il y a autant de fer silicaté que de fer sous forme de goéthite.

Au cours de la pédogenèse verticale, l'horizon C est le siège d'une très importante néogenèse de montmorillonite ferrifère ; l'évolution des minéraux argileux montre que le passage de l'horizon C à l'horizon (B) est peu favorable à la néogenèse de montmorillonite ferrifère : le fer choisit alors de manière égale la voie « silicatée » et la voie « hydroxydes libres ».

Dans ce contexte, si l'on tient compte de la répar-

tition de la fraction argileuse totale et des teneurs en fer, on doit admettre que montmorillonite ferrifère et montmorillonite alumineuse ou alumino-magnésienne coexistent au niveau de l'horizon (B) du vertisol.

2. La nature et la répartition des composés libres du fer

— *la couleur des échantillons* en relation avec la nature des composés libres du fer est en accord, pour les échantillons de l'amont de la séquence, avec les observations faites antérieurement à ce sujet (P. SEGALLEN, 1969 ; M. LAMOUREUX *et al.*, 1977) : la couleur rouge foncé de MK 13 est liée à la présence d'hématite ; la présence d'une quantité croissante de goethite fait passer la couleur dans les tons brun-jaune. Ceci est moins net pour les échantillons extraits du vertisol : après élimination de la matière organique par traitement à H_2O_2 apparaît une couleur brun-jaune en profondeur et à tendance rouge assez nette en (B) malgré l'absence d'hématite. On ne peut qu'émettre des hypothèses, et invoquer par exemple l'intervention de la matière organique qui, dans l'échantillon brut de sol (de couleur gris foncé) masque totalement les composés du fer, ou un état particulier des cristallites de goethite sur la surface des minéraux montmorillonitiques. SCHWERTMANN (1966) note que la goethite peut parfois se présenter dans des couleurs rougeâtres (7,5 YR).

— *la goethite* est l'élément dominant dans la séquence ; elle est abondamment représentée dans la fraction fine en (B) du vertisol, et devient rare dans l'horizon d'altération où la plus grande partie du fer se trouve dans le réseau d'un minéral argileux.

— *l'hématite* est localisée exclusivement dans la partie supérieure du profil de sol brun eutrophe. Il semble logique de penser que l'occurrence de goethite ou d'hématite soit liée en premier lieu à un état global d'hydratation et au pouvoir oxydant du milieu. Dans l'horizon (B) de l'amont, ce sont les conditions physico-chimiques du milieu, aéré et sec pendant la plus grande partie de l'année, qui orienteraient la cristallisation du fer vers la forme « oxyde » plutôt que vers la forme « oxy-hydroxyde ». M. LAMOUREUX (1977) a observé que l'hématite ne se maintient pas en milieu mal drainé, et se transforme en goethite ; ceci est en accord avec nos observations. U. SCHWERTMANN (1966) note que la présence de composés organiques (encore assez abondants dans cet horizon) peut inhiber la transformation de goethite en hématite.

— Il n'a pas été mis en évidence de Fe^{++} : cette forme de fer ne saurait exister dans la fraction fine de cette séquence que de manière très fugace et à l'aval seulement. Il aurait été instructif de poursuivre cette recherche vers les fractions granulométriques plus

grossières, pour suivre les variations de cette forme réduite du fer dans les amphiboles et les micas.

— Tous les minéraux présentent une substitution partielle du fer par de l'aluminium, qui est plus importante dans les horizons (B) que dans l'altération. Sans apporter d'explication à cette situation, on peut rapprocher ces résultats de l'augmentation parallèle de la teneur en Al_2O_3 total de l'échantillon.

— Enfin, la spectrométrie Mössbauer n'a pas mis en évidence de *composés amorphes du fer* ; ce fait a également été noté par M. LAMOUREUX *et al.* Ce fer amorphe que l'on détermine habituellement par des méthodes d'extraction chimique *ne semble être en fait qu'une forme microcristalline de la goethite ou de l'hématite.*

A. J. HERBILLON *et al.* (1973) ont étudié le passage des sols bruns eutrophes aux sols rouges tropicaux (ce dernier type de sol représente un terme plus avancé de l'évolution pédologique). Ces auteurs insistent notamment sur l'importance de conditions climatiques précises permettant la rubéfaction de ces types de sols : la période humide est favorable à la désilicification du milieu (avec entraînement simultané des bases alcalines et alcalino-terreuses), la saison sèche permet l'individualisation du fer. L'étude qui est présentée ici confirme ces résultats tant pour le déplacement d'éléments que pour la rubéfaction du profil en milieu bien drainé. Elle complète les connaissances géochimiques sur ce type d'évolution en précisant le devenir de quelques éléments libérés, qui s'accumulent en milieu mal drainé.

3. Apports méthodologiques

(a) APPORTS DE LA SPECTROMÉTRIE MÖSSBAUER

Cette technique est relativement récente dans ses applications à l'étude de matériaux pédologiques. Elle apparaît comme une *technique d'étude fondamentale, qui doit être utilisée comme méthode de référence* pour tout ce qui concerne l'étude qualitative et quantitative des composés du fer, qu'ils soient sous forme d'oxydes et d'hydroxydes, ou inclus dans un réseau de minéral silicaté ; on peut souligner plus précisément les apports de cette méthode à l'étude des montmorillonites ferrifères.

LAMOUREUX *et al.* (1977) ont montré qu'il est possible de remplacer cette méthode, dont la généralisation ne peut être envisagée pour des raisons de difficulté de mise en œuvre, par des techniques de routine utilisant la dissolution différentielle des composés du fer en milieu acide ou réducteur, permettant de mesurer avec une assez bonne approximation ces différents composés.

(b) IMPORTANCE DE L'ÉTUDE DES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

Les premiers travaux utilisant la séparation des fractions granulométriques ne sont pas récents ; cette technique a d'ailleurs été appliquée souvent, comme c'est le cas ici, à l'étude minéralogique et géochimique de la fraction argileuse $< 2 \mu$. Notons les travaux antérieurs de F. LELONG (1967) sur la « manière d'être » de la kaolinite et de la gibbsite dans des matériaux latéritiques de Guyane. Plus récemment, A. CHAUVEL (1977) a largement utilisé cette technique pour l'étude des sols du Continental Terminal de Casamance (Sénégal) : il a notamment soumis l'échantillon brut de sol à différents traitements en vue de « décortiquer » les assemblages secondaires complexes, pour analyser les « ciments » et les éléments granulaires qui se trouvaient emprisonnés dans ces ciments.

Dans les phénomènes d'altération d'une roche, différents processus interviennent simultanément, qui sont d'ordre physique, chimique et minéralogique. Celui qui est le plus évident macroscopiquement est d'ordre physique : c'est la fragmentation du matériau cohérent qu'est la roche mère en éléments texturaux libres, dont la taille diminue lorsque l'intensité ou la durée du processus d'altération augmentent.

On peut admettre de manière schématique que les minéraux qui sont présents dans les fractions grossières d'un niveau d'altération jeune sont ceux qui apparaissent en premier lieu au cours de l'altération ; ils sont les témoins des premiers stades de l'évolution minéralogique. Lorsque l'altération se poursuit, la taille moyenne des constituants diminue : l'étude des fractions séparées met en évidence les variations minéralogiques qui accompagnent ce processus de fragmentation.

Nous avons noté que lors de la pédogenèse fersiallitique de notre type de séquence apparaît une importante quantité d'argile : cette fraction constitue une importante étape dans l'ensemble des transformations des minéraux présents, que ce soit dans les horizons C profonds (altération relativement peu développée, avec différenciation d'une faible quantité d'argile), ou dans les horizons (B) ou B très argileux.

Cette fraction peut donc être considérée comme un élément de référence :

- elle est le point d'aboutissement de toute une série de transformations granulométriques et minéralogiques des éléments initialement présents dans la roche ;
- elle est le stade sous lequel apparaissent en premier lieu les minéraux secondaires de néoformation issus de ces transformations.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'ORSTOM le 29 août 1980.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1965 a. — Classification des sols. Tableaux des Classes, Sous-Classes, Groupes et Sous-Groupes de sols utilisés par la Section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. (1965). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 3 : 269-288.
- AUBERT (G.), 1965 b. — La classification pédologique utilisée en France. Pédologie, Symp. intern. 3. Class. des Sols, Gand : 25-56.
- BOCQUIER (G.), 1973. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 62, Paris, 342 p.
- BOULET (R.), 1970. — La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3 : 246-270.
- CHAUVEL (A.), 1966. — Carte pédologique du Sénégal au 1/200 000 ; notice explicative de la feuille KEDOU-GOU, KOSSANTO, KENIEBA. Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar (Sénégal), 153 p., *multigr.*
- CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse. *Travaux et Documents de l'O.R.S.T.O.M.*, n° 62, 532 p., O.R.S.T.O.M., Paris.
- HERBILLON (A. J.), MAKUMBI (L.) et FRANKART (R.), 1973. — Sur l'existence au Zaïre de sols bruns eutrophes, précurseurs probables des « sols rouges tropicaux ». Aspects de la dynamique du fer lors de la formation de ces sols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XI, n° 1 : 15-18.
- JANOT (Ch.), GIBERT (H.) et TOBIAS (Ch.), 1973. — Caractérisation de kaolinites ferrifères par spectrométrie Mössbauer. *Bull. Soc. Fr. Minéral. et Cristallogr.*, n° 96 : 281-291.
- KALOGA (B.), 1966. — Étude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge (2^e partie). Les vertisols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IV, n° 3 : 29-61.
- KALOGA (B.), 1970. — Étude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge (3^e partie). Sols associés aux vertisols : sols bruns eutrophes et sols halomorphes. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 1 : 3-31.
- KALOGA (B.), 1976. — Carte pédologique de reconnaissance du Sénégal oriental au 1/200 000 ; notice explicative de la feuille de DALAFI. Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar (Sénégal), *multigr.*, 103 p.
- LAMOUROUX (M.), 1972. — Étude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 56, 266 p. O.R.S.T.O.M., Paris, 1972.
- LAMOUROUX (M.), LOYER (J. Y.), BOULEAU (A.) et JANOT (Ch.), 1977. — Formes du fer des sols rouges et bruns fersiallitiques. Application de la spectrométrie Mössbauer. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XV, n° 2 : 199-210.
- LELONG (F.), 1967. — Sur les formations latéritiques de Guyane française : « manière d'être » de la kaolinite et de la gibbsite ; origine des phyllites micacées. *C. R. Acad. Sci.*, t. 264 : 2713-2716.
- MAIGNIEN (R.), 1963. — Les sols bruns eutrophes tropicaux. *Sols africains*, vol. VIII, n° 3 : 485-496.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.) et VALLERIE (M.), 1966. — Les sols rouges du Nord-Cameroun. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IV, n° 3 : 3-38.

- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles, 499 p. Masson éd. Paris.
- NOVIKOFF (A.), TSAWLASSOU (G.), GAC (J. Y.), BOURGEAT (F.), TARDY (Y.), 1972. — Altération des biotites dans les arènes des pays tempérés, tropicaux et équatoriaux. *Sci. Géol., Bull.*, 25, 4, 287-305.
- PAQUET (H.), 1970. — Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse. *Mém. Serv. géol. d'Als. et de Lor.*, Université de Strasbourg, n° 30, 210 p.
- SCHWERTMANN (U.), 1966. — Die Bildung von Goethit und Hämatit in Böden und Sedimenten. *Proc. Intern. Clay Conf.*, Jerusalem, 1, 159-165.
- SEGALEN (P.), 1969. — Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VII, n° 2 : 224-236.
- SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Thèse. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 66, 183 p. O.R.S.T.O.M. Paris, 1973.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse. *Mém. Serv. Carte géol. Als. et de Lor.*, 270 p.
- TOBIAS (Ch.), 1976. — Méthode de séparation des fractions granulométriques des sols utilisée au Centre O.R.S.T.O.M. de N'Djamena (Tchad). 6 p. *multi-gr.*
- TRAUTH (N.), PAQUET (H.), LUCAS (J.) et MILLOT (G.), 1967. — Les montmorillonites des vertisols lithomorphes sont ferrifères : conséquences géochimiques et sédimentologiques. *C. R. Ac. Sc.*, t. 264, 1577-1759, (20 mars 1967), Sér. D.
- WACKERMANN (J. M.), 1967. — Les faciès pétrographiques de la série de Mako dans les régions de Kanéméré et Mamakhono (Sénégal oriental). Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar, 34 p., *multi-gr.*

ANNEXES

DESCRIPTION DES DEUX PROFILS PRINCIPAUX ÉTUDIÉS ET DONNÉES ANALYTIQUES

PROFIL MK 1

Sur pente forte (15 %), avec blocs de roche diversement altéré épandus en surface : recouvrement graminéen dense à base d'*Andropogon tectorum* ; savane arborée lâche à *Butyrospermum parkii*, avec *Acacia dudgeoni* et *Ziziphus mauritiana*.
Quelques ravines d'érosion dans les zones dénudées.

Profil :

0-18 cm :

Horizon humifère gris-foncé à matière organique très liée à la matière minérale ; nombreux graviers de roche altérée : 40 % de terre fine.
Structure polyédrique de taille moyenne à fine à tendance grumeleuse, avec agrégats assez fragiles.
Cohésion d'ensemble faible.
Porosité remarquablement développée, de type physique et biologique (pores, tubes et canaux).
Enracinement particulièrement dense dans les 5 cm supérieurs.

passage très progressif à

18-62 cm :

Couleur homogène brun-rouge foncé 5 YR 3/4 .
Graviers de roche très altérée et de quartz atteignant 50 % du matériau, terre fine argileuse faiblement sableuse.
Les graviers de roche sont très altérés, friables, à section de couleur jaune au centre et rouge à la périphérie ; avec un fin réseau de diaclases brun-noir ferromanganésifères.
Structure d'ensemble très bien définie, de type polyédrique fin à moyen ; vers 50 cm, quelques fentes verticales peu marquées individualisent des prismes de petite taille : ce type de structure se rencontre surtout dans les poches les plus profondes de cet horizon, qui est d'épaisseur variable.
Porosité d'ensemble élevée, cohésion faible, enracinement moyennement développé.

passage progressif à

62-120 cm :

Horizon de passage à l'altération de la roche-mère : nombreux fragments de roche moins rubéfiée, à contours polygonaux, relativement peu remaniés, à section de couleur brun-jaune pâle 10 YR 6/4, sillonnés par un très fin réseau de diaclases noires ; ces fragments de roche alternent avec des poches verticales plus ou moins développées de matériau argileux brun-rouge foncé à structure polyédrique ; quand ces poches atteignent une grande taille, leur centre et leur base prennent une couleur à tendance brun-vert olive verticale, avec une très fine structure prismatique.
Dans tout le niveau, individualisation très nette de manganèse sous forme de petites taches et concrétions noires.

passage assez nettement marqué à

120-150 cm :

Horizon d'altération de la roche-mère, découpée en polyèdres de taille croissante vers le bas, délimités par des diaclases à très fin revêtements noirs ferro-manganésifères, à section brun-jaune clair, à minéraux altérés peu discernables, à cohésion d'ensemble moyenne.

CENTRE O.R.S.T.O.M.
DAKAR (Sénégal)
Section Pédologie

FICHE ANALYTIQUE

IDT GTO 142

| | |
|-------------|---|
| TYPE DE SOL | SOL BRUN EUTROPHE TROPICAL FERRUGINISÉ |
|-------------|---|

| |
|---------------|
| PROFIL : MK 1 |
|---------------|

| N° Echantillon $\frac{1}{2}$ sol | MK11 | MK12 | MK13 | MK14 | MK16 | MK19 | | |
|----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|---------|--|--|
| Profondeur cm. | 0-15 | 15-30 | 30-45 | 45-60 | 75-90 | 120-135 | | |
| Refus 2 mm % | 67 | 61 | 61 | 60 | 49 | 51 | | |
| CO ₃ Ca % | | | | | | | | |
| Humidité % | 5,2 | 8,4 | 6,7 | 6,2 | 10,3 | 7,1 | | |

ANALYSE MECANIQUE

| | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Argile % | 42,7 | 52,5 | 53,9 | 39,5 | 23,0 | 15,2 | | |
| Limon fin % | 21,0 | 14,7 | 18,2 | 20,7 | 22,7 | 24,2 | | |
| Limon grossier % | 6,5 | 3,9 | 4,3 | 5,8 | 7,9 | 10,8 | | |
| Sable fin % | 7,2 | 5,0 | 5,3 | 9,2 | 12,2 | 19,1 | | |
| Sable grossier % | 12,3 | 13,3 | 11,2 | 15,4 | 15,6 | 22,2 | | |

MATIERE ORGANIQUE

| | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|--|--|--|--|--|
| Mat. org. totale % | 5,5 | 2,9 | 2,6 | | | | | |
| Carbone % | 3,18 | 1,67 | 1,53 | | | | | |
| Azote % | 0,16 | 0,11 | 0,12 | | | | | |
| C/N | 19 | 16 | 13 | | | | | |

ACIDE PHOSPHORIQUE

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|--|--|--|--|
| P ₂ O ₅ total % | 0,55 | 0,50 | 0,42 | 0,41 | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|--|--|--|--|

FER

| | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Fe ₂ O ₃ libre % | 11,3 | 14,3 | 12,7 | 14,6 | 14,6 | 13,0 | | |
| Fe ₂ O ₃ total % | 15,4 | 18,0 | 17,2 | 16,5 | 15,8 | 16,2 | | |
| Fer libre/Fer total | 73 | 79 | 80 | 88 | 92 | 79 | | |

Bases totales ME pour 100 g de sol

| | | | | | | | | |
|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Calcium | | | | | | | | |
| Magnésium | | | | | | | | |
| Potassium | | | | | | | | |
| Sodium | | | | | | | | |

Bases échangeables ME pour 100 g de sol

| | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Calcium | 16,4 | 17,3 | 16,8 | 15,2 | 19,3 | 24,2 | | |
| Magnésium | 3,5 | 7,9 | 8,5 | 9,7 | 7,3 | 10,7 | | |
| Potassium | 0,28 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | | |
| Sodium | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | | |
| S | 24,2 | 21,4 | 22,4 | 22,9 | 26,7 | 35,0 | | |
| T | 28,1 | 26,5 | 26,9 | 26,0 | 29,7 | 34,1 | | |
| S/T = V % | 86 | 80 | 83 | 88 | 89 | 82,5 | | |

ACIDITE ALCALINITE

| | | | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| pH eau | 5,9 | 5,7 | 5,8 | 5,9 | 6,2 | 6,7 | | |
| pH KCl | 5,0 | 4,8 | 4,8 | 5,0 | 5,0 | 5,3 | | |

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Poids spéc. réel | | | | | | | | |
| Poids spéc. appar | | | | | | | | |
| Porosité % | | | | | | | | |
| pF 4 2 | | | | | | | | |
| pF 3 | | | | | | | | |
| pF 2,5 | | | | | | | | |
| Eau utile % | | | | | | | | |
| Instabilité structurale Is | | | | | | | | |
| Perméabilité Kcm/h | | | | | | | | |

CENTRE O.R.S.T.O.M.
DAKAR (Sénégal) —
Section Pédologie

FICHE ANALYTIQUE

101 GTO 142

| | |
|-------------|---|
| TYPE DE SOL | VERTISOL TOPO LITHOKORPHE NON GRUMOLOLIQUE MODAL |
|-------------|---|

PROFIL : MK 7

| N° Echantillon | MK 71 | MK 73 | MK 75 | MK 77 | MK 79 | MK 711 | MK 713 |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| Profondeur cm. | 0-15 | 30-45 | 60-75 | 90-105 | 120-140 | 160-180 | 200-220 |
| Refus 2 mm % | 9 | 5 | 0,5 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| CO ₃ Ca % | | | | | | | |
| Humidité % | 5,9 | 9,3 | 7,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 11,4 |

ANALYSE MECANIQUE

| | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Argile % | 42,5 | 46,7 | 45,5 | 44,2 | 30,2 | 28,0 | 24,3 |
| Limon fin % | 20,0 | 19,2 | 18,2 | 22,0 | 22,0 | 32,7 | 32,0 |
| Limon grossier % | 17,3 | 10,7 | 12,2 | 10,1 | 3,7 | 12,2 | 10,1 |
| Sable fin % | 9,0 | 7,7 | 8,0 | 7,2 | 13,5 | 17,2 | 18,2 |
| Sable grossier % | 6,3 | 4,3 | 5,7 | 5,1 | 5,6 | 0,9 | 0,9 |

MATIERE ORGANIQUE

| | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|--|--|--|--|
| Mat. org. totale % | 3,8 | 2,2 | 1,1 | | | | |
| Carbone ‰ | 2,17 | 1,29 | 0,65 | | | | |
| Azote ‰ | 0,11 | 0,08 | 0,05 | | | | |
| C/N | 19 | 16 | 13 | | | | |

ACIDE PHOSPHORIQUE

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|--|--|--|--|
| P ₂ O ₅ total ‰ | 0,41 | 0,36 | 0,27 | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|--|--|--|--|

FER

| | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Fe ₂ O ₃ libre % | 2,4 | 9,1 | 8,6 | 9,2 | 9,5 | 9,0 | 8,5 |
| Fe ₂ O ₃ total % | 11,5 | 12,0 | 12,0 | 12,2 | 11,8 | 11,8 | 11,8 |
| Fer libre/Fer total | 72 | 77 | 71 | 77 | 80 | 76 | 72 |

Bases totales ME pour 100 g de sol

| | | | | | | | |
|-----------|--|--|--|--|--|--|--|
| Calcium | | | | | | | |
| Magnésium | | | | | | | |
| Potassium | | | | | | | |
| Sodium | | | | | | | |

Bases échangeables ME pour 100 g de sol

| | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| Calcium | 21,4 | 23,5 | 21,5 | 26,8 | 36,8 | 25,8 | 25,3 |
| Magnésium | 19,1 | 11,4 | 11,4 | 15,8 | 16,5 | 17,4 | 18,2 |
| Potassium | 0,15 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,05 | 0,05 | 0,24 |
| Sodium | 0,05 | 0,08 | 0,03 | 0,13 | 0,17 | 0,20 | 0,21 |
| S | 33,5 | 35,1 | 33,1 | 42,8 | 55,5 | 53,4 | 54,3 |
| T | 36,9 | 36,7 | 33,6 | 39,0 | 51,1 | 48,5 | 42,4 |
| S/T = V % | 91 | 95 | 98 | nat. | nat. | nat. | nat. |

ACIDITE ALCALINITE

| | | | | | | | |
|--------|--|--|--|--|--|--|--|
| pH eau | | | | | | | |
| pH KCL | | | | | | | |

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

| | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Poids spéc. réel | | | | | | | |
| Poids spéc. appar | | | | | | | |
| Porosité % | | | | | | | |
| pF 4 2 | | | | | | | |
| pF 3 | | | | | | | |
| pF 2.5 | | | | | | | |
| Eau utile % | | | | | | | |
| Instabilité structurale Is | | | | | | | |
| Perméabilité Kcm/h | | | | | | | |

PROFIL MK 7

Au centre de la cuvette aval, avec pente très faible (inférieure à 1 %), microrelief uniforme, larges fentes de dessiccation polygonales ; zone cultivée en sorgho depuis longtemps, avec quelques repousses de *Calotropis procera*, *Acacia dudgeoni*, et combrétacées.

Profil :

0-27 cm :

Horizon humifère brun-noir foncé.

Texture argileuse avec quelques fragments rares et petits de roche altérée et de quartz.

Structure polyédrique de taille moyenne bien développée en surface, devenant plus large vers le bas ; fentes verticales très marquées, localement remplies en surface de matériau polyédrique argileux fin.

Cohésion d'ensemble moyenne, cohésion des agrégats élevée. Enracinement moyennement développé superficiel (sorgho)

passage nettement marqué à

27-72 cm :

Horizon de couleur brun foncé en surface 10 YR 3/2 devenant un peu plus clair à la base.

Texture argileuse avec quelques graviers de quartz.

Structure prismatique typique, large, fentes de 3 à 4 cm d'ouverture ; dans la partie supérieure de cet horizon, les prismes se découpent en petits prismes secondaires.

A partir du milieu de l'horizon, nombreux pisolithes noirs durs, ferromanganésifères.

Cohésion des éléments structuraux élevée, porosité très limitée à quelques pores parfois bordés d'hydroxydes de couleur rouille.

Quelques nodules calcaires de taille moyenne à la base de l'horizon.

passage bien marqué par la structure à

72-108 cm :

Horizon de couleur brun-gris foncé à tendance vert-olive. Texture argileuse.

La structure prismatique qui prolonge celle de l'horizon sus-jacent disparaît à la base de l'horizon ; faces obliques de glissement de grande taille, très rapprochées à la partie supérieure de l'horizon (structure « feuilletée » oblique) qui disparaissent progressivement à la base de l'horizon.

Quelques nodules calcaires de taille moyenne, durs, et « plombs de chasse » ferromanganésifères.

Cohésion d'ensemble très élevée, horizon plastique.

passage sur 30 cm à la roche mère altérée :

108-240 cm :

Sur les 30 premiers cm, le matériau vertique se trouve en mélange avec des débris de roche altérée et de quartz.

À partir de 150 cm matériau brun-jaune clair d'altération en place (présence d'un filon de quartz morcelé en place) avec réseau plus foncé d'anciennes diaclases qui s'estompe dans la masse. Quelques traînées verticales de matériau vertique de couleur grise.

Le matériau est de texture argilo-limoneuse vers le haut et devient progressivement plus grossier, en même temps que se dessinent de gros polyèdres bien différenciés limités par des diaclases tapissées de matériau ferromanganésifère. A partir de 240 la roche altérée devient dure ; il se différencie dans les gros polyèdres un cortex altéré brun-jaune et une partie centrale foncée, où l'on distingue des minéraux peu ou pas altérés.