

# LA PHYSICO-CHIMIE DU COMPLEXE ABSORBANT DANS LES SOLS BRUNS EUTROPHES SES RELATIONS AVEC LEUR DIFFÉRENCIATION MORPHOLOGIQUE ET LEUR CLASSIFICATION

B. KALOGA\* et C. THOMANN\*

## RÉSUMÉ

*Dans les sols bruns eutrophes de Haute-Volta et du Sénégal oriental, le caractère de sol à « mull » est directement lié à la différenciation de couleur du profil, les sols à « mull » étant caractérisés par un profil de type brun ou brun-rouge, paraissant humifère, à faible différenciation de couleur sur une grande profondeur.*

*Les sols du complexe d'altération montmorillonitique qui présentent un profil à horizon humifère peu épais bien différencié par rapport à un horizon B de couleur brun vif ou rouge et ne paraissant pas humifère ont un profil humique identique à celui des sols à sesquioxydes individualisés. Ils ne peuvent pas être classés dans les sols à « mull ».*

*La formation de « mull », c'est-à-dire d'un complexe argilo-humique de couleur foncée, où matière minérale et matière organique sont intimement liées, nécessite une forte capacité d'échange, des phénomènes d'échange facile entre matière minérale et matières humiques que la présence de fer semble inhiber dans certaines conditions.*

*Dans les sols bruns eutrophes, le degré de polymérisation des acides humiques semble être le facteur qui commande les variations du rapport C/N.*

## ABSTRACT

*In the brown eutrophic soils of the High-Volta and the Eastern Senegal, the mull character of the soil is directly connected to the colour differentiation of the profile, the mull soils being characterized by a profile of a brown or red-brown type, looking humiferous with a weak colour differentiation along great depths.*

*The soils of the montmorillonitic weathering complex presenting a well differentiated thin humiferous horizon profile with regard to a B horizon with a bright brown or red colour and not seeming humiferous have a humic profile, which is identical with that of the specified sesquioxid soils. They can not be classified in the mull soils.*

---

\* Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar-Hann (Sénégal).

*The mull formation, i. e. the formation of a clay-humic complex with a dark colour where mineral and organic material are closely connected, necessitates a great exchange capacity, and phenomena of easy exchange between mineral and humic material, exchanges which seem to be inhibited by the presence of iron on certain conditions.*

*In the brown eutrophic soils, the degree of polymerisation of the humic acids seems to be the factor which commands the variation of the ratio C/N.*

## PLAN

### INTRODUCTION

#### 1. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ÉTUDIÉS

- 1.1. *Caractéristiques générales*
- 1.2. *Caractéristiques morphologiques essentielles*

#### 2. LA MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE

- 2.1. *Répartition dans les profils*
- 2.2. *Décomposition de la matière organique - rapport C/N*

#### 3. LES DIFFÉRENTES FRACTIONS HUMIQUES

- 3.1. *Sols de type brun à faible différenciation du profil*
- 3.2. *Sols de type brun à profil bien différencié par la couleur*
- 3.3. *Sols de type rouge*

#### 4. DISCUSSION DES RÉSULTATS

- 4.1. *Rapport C/N et degré de polymérisation de la matière humique*
- 4.2. *Répartition des différentes fractions humiques dans les profils, comparaison des différentes catégories de sols étudiés, et caractéristiques morphologiques corrélatives*
- 4.3. *Principaux facteurs de formation des acides humiques liés au Ca*
- 4.4. *Rôle du fer dans la différenciation des sols bruns eutrophes*

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

## INTRODUCTION

### 1. BUT DE L'ÉTUDE

Le but de ce travail est de préciser les rapports entre la morphologie des sols bruns eutrophes et la physico-chimie de leur complexe absorbant (notamment les liaisons matière organique - matière minérale) de façon à pouvoir bien définir leur place dans la classification.

## 2. JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE

Le genèse des sols bruns eutrophes des bassins versants des Volta Blanche et Rouge, leur place dans les sols du complexe d'altération montmorillonitique, ont été étudiées par KALOGA (1965 et 1967). Lors de ce travail, SÉGALEN <sup>(1)</sup>, frappé par de nombreuses similitudes entre les caractéristiques des Sols Bruns eutrophes de Haute-Volta et des Sols Rouges du nord Cameroun (étudiés par MARTIN, SIEFFERMANN et VALLERIE, 1966) a suggéré à l'auteur de faire une comparaison de ces deux types de sols.

Cette comparaison a abouti à la mise en évidence de l'importance de l'individualisation du fer sur les liaisons argiles-humus et sur le type d'humus (KALOGA, 1967).

Il convenait donc de vérifier si les différents types de sols classés en sols bruns eutrophes principalement d'après leur richesse chimique, la composition minéralogique de leur fraction argileuse, la structure, répondent au concept des sols à mull (mull eutrophe). Ces différents types de sols vont d'un pôle de sols de couleur brun foncé à brun rouge foncé sur une grande profondeur, à un pôle de sols de couleur rouge plus proches des sols fersiallitiques.

Le mull est défini comme une matière organique fortement évoluée et totalement incorporée à la matière minérale sous forme de complexe argilo-humique.

Or, les sols bruns eutrophes sont d'abord définis comme des sols brunifiés « eutrophes » à mull.

## 3. MÉTHODES

Les méthodes analytiques employées pour l'étude de la matière organique sont les suivantes :

— le carbone total est déterminé par la méthode Anne, l'azote total par la méthode Kjeldahl ;  
— le fractionnement des composés humiques est effectué par la méthode Tiurin, modifiée par DUCHAUFOUR (1960). Cette méthode est applicable à des sols tropicaux minéraux pour lesquels la fraction légère de la matière organique — susceptible de modifications au cours de l'extraction par la soude — est très faible.

On obtient ainsi cinq fractions humiques :

a) deux pour les acides fulviques :

- acides fulviques libres =  $F_1$
- acides fulviques liés aux acides humiques =  $F_2$

b) trois pour les acides humiques :

- acides humiques mobiles =  $H_1$
- acides humiques liés aux argiles par  $Ca^{++}$  =  $H_2$
- acides humiques liés aux argiles par  $Fe^{+3}$  et  $Al^{+3}$  =  $H_3$ .

---

(1) Inspecteur Général de Recherches à l'O.R.S.T.O.M. - Services Scientifiques Centraux - Bondy.

## 1. CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ÉTUDIÉS

### 1.1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Cette étude porte sur onze profils en provenance de Haute-Volta et sur trois profils en provenance du Sénégal oriental.

Pour les caractéristiques morphologiques et analytiques détaillées de ces sols, il faut se reporter pour les sols de Haute-Volta aux études de KALOGA (1965, 1966 et 1967) et pour les sols du Sénégal oriental à celles de CHAUVEL (1966).

Le tableau n° 1 donne les caractéristiques pédogénétiques générales (conditions écologiques) de ces sols.

### 1.2. CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ESSENTIELLES

Il a été signalé (KALOGA, 1967) que les caractères structuraux (type, taille et développement de la structure) sont extrêmement variables dans les sols bruns eutrophes de Haute-Volta et ne peuvent servir de critère dans la classification de ces sols. Par ailleurs, la texture est argileuse et varie peu dans les sols étudiés. Nous classerons donc ceux-ci selon leur différenciation de couleur. Cette dernière caractéristique a en outre un certain rapport avec l'individualisation des sesquioxydes de fer dont nous nous proposons d'étudier l'influence sur les autres caractères physico-chimiques.

Le dépouillement des caractéristiques de couleur nous permet de classer les sols étudiés en quatre types :

#### **1.2.1. Les sols du type brun ou brun-rouge à faible différenciation du profil au point de vue couleur sur une grande profondeur (horizon A morphologiquement bien développé)**

##### **a) Sols de transition vers les Vertisols :**

Ils sont représentés par le profil VS 26 de Haute-Volta.

##### **b) Sols à profil bien développé (épaisseur de l'ordre de 50 cm ou plus) :**

Ils sont représentés par les profils V 78, VL 24, V 64, V 46, tous en provenance de Haute-Volta. Le type en est le profil V 78.

##### **c) Sols à profil peu développé :**

Ce sont des sols développés sur matériaux polyphasés gravillonnaires, graveleux ou caillouteux en profondeur, l'épaisseur du matériau argileux à caractère brun eutrophe se trouvant limité à 35 cm

TABLEAU 1

Conditions de Station des sols étudiés

N°	Profondeur (cm)	Pluviométrie (mm)	Topographie	Végétation	Roche-mère
VL 24 Haute-Volta	0- 90	900	Zone plane	Savane parc à <i>Butyrospermum Parkii</i> , champ de mil.	Matériaux d'apport.
V 64 Haute-Volta	0- 70	750- 800	Zone plane dominée par une colline schisteuse.	Jachère récente, végétation herbacée indéterminée.	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
V 78 Haute-Volta	0-160	750- 800	Zone plane basse (léger talweg).	Savane parc à <i>Butyrospermum Parkii</i> et <i>Bauhinia</i> sp. avec quelques <i>Faidherbia albida</i> .	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
V 46 Haute-Volta	0-100	750- 800	Plaine haute alluviale à termitières brun-rougeâtre.	Savane arbustive à <i>Pourpartina birrea</i> , <i>Acacia seyal</i> , <i>Ziziphus</i> sp., <i>Acacia</i> sp., <i>Bauhinia</i> sp., <i>Combretum</i> sp.	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
VS 60 Haute-Volta	0- 35	800- 900	Plaine haute brunâtre à gros cailloux de quartz.	Savane à <i>Acacia seyal</i> .	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
V 47 Haute-Volta	0- 90	750- 800	Zone très plane, dominée par une colline tabulaire cuirassée.	Savane parc anthropique à <i>Butyrospermum Parkii</i> .	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
V 72 Haute-Volta	0- 75		Zone plane avec quelques affleurements de cuirasse.	Champ de mil ; quelques <i>Lanea</i> sp. et <i>Faidherbia albida</i> .	Matériaux argileux d'apport dérivés de schistes.
VB 23 Haute-Volta	0- 30	900-1 000	Zone plane à termitières et à affleurements de granite.	Savane à <i>Butyrospermum Parkii</i> .	Gneiss à amphiboles.
VMK 23 Haute-Volta	0- 50	900-1 000	Zone plane alternant avec des buttes de quartz et des dépressions.	Savane arborescente à <i>Acacia gourmensis</i> , <i>Acacia senegal</i> , <i>Combretum glutinosum</i> , <i>Lanea velutina</i> , Strate herbacée bien venu à <i>Andropogon gayanus</i> .	Schistes argileux.
VS 26 Haute-Volta	0-135	800	Zone plane bordant un talweg.	Savane parc anthropique à <i>Faidherbia albida</i> .	Matériaux argileux dérivés de schistes.
VRZ 31 Haute-Volta	0- 85	1 000	Sommet de petite colline brunâtre, très caillouteuse.	Jachère récente sans végétation.	Schistes à amphiboles.
K 88 Sénégal-Oriental	0- 60	1 200	Versant en pente faible d'une colline de roche basique.	Savane arbustive à <i>Oxythecnanthera</i> , <i>Andira</i> , <i>Acacia</i> , <i>Terminalia</i> .	Roches volcaniques basiques.
K 80 Sénégal-Oriental	0- 70	1 200	Pente forte (18 %) sur versant inselberg.	Champ de mil (défriche récente dans savane arbustive).	Roches basiques.
B 137 Sénégal-Oriental	0- 75	1 200	Sommet de colline.		Dolérite.

TABLEAU 2

Tableau récapitulatif de la couleur des sols et de ses variations à travers le profil  
a. Sols du type brun à faible différenciation du profil au point de vue couleur

Profils	Horizons (cm)	Echantillons correspondants (cm)	Couleur Munsell	Appréciations morphologiques
VS 26	0- 10 10- 39  39- 90 90-136	VS 261 : 0- 10 262 : 10- 39  263 : 39- 70 264 : 90-136	5 YR 4/4 5 YR 4/3,7  5 YR 4/4,5 5 YR 4/5	Brun humifère. Brun, ne diffère du précédent que par des détails de structure. Brun identique au précédent mais plus compact. Brun à nombreuses taches brun-jaune.
V 78	0- 10 10- 34 34-101 101-130  130-162	Non prélevé. V 782 : 10- 34 783 : 34- 80 784 : 101-130  785 : 130-162	10 YR 4/3,5 7,5 YR 4/4 7,5 YR 4,5/4  7,5 YR 5/6	Apport récent brun-gris clair superposé au profil. Brun-gris, humifère. Brun, encore humifère. Brun identique au précédent à des détails de structure près. Brun jaune à plages plus jaunes, ne paraît pas humifère.
VL 24	0- 57  57- 90  90-110	VL 241 : 0- 30 242 : 40- 57  243 : 63- 80  244 : 90-110	5 YR 3/3 5 YR 4/4 à 7,5 YR 4/4	Brun foncé un peu rougeâtre, humifère.  Brun foncé, humifère. Essentiellement gravillonnaire avec des cailloux de quartz. Carapace gravillonnaire moyennement indurée.
V 64 sur matériaux polyphasés	0- 47  47- 68  68- 84 84-115	V 641 : 0- 20 642 : 25- 45  643 : 47- 68	7,5 YR 4/4 7,5 YR 4/4  7,5 YR 5/6	Brun foncé, humifère, paraissant discontinu par rapport au suivant parce que reposant par endroits sur un lit de pavés de quartz. Brun jaune ne paraissant pas bien humifère, lit argilo-gravillonnaire à petits cailloux de quartz.  Argile vertique typique brun jaune clair.
V 46	0- 26  26- 62 62- 97 97-152	V 461 : 0- 26  462 : 28- 58 463 : 73- 93	5 YR 3,7/4  5 YR 4/4 5 YR 4,5/4	Brun gris foncé, humifère, passage très progressif au suivant. Brun foncé, humifère. Brun avec des taches plus jaunes. Brun jaune.
VS 60	0- 14 14- 35 35-110	V 601 : 0- 14 602 : 14- 30	5 YR 3/4 5 YR 3/4	Brun, humifère. Brun humifère. Lit de gros cailloux et pavés de quartz.
V 72	0- 20 20- 38 38- 75 à 75	V 721 : 0- 20 722 : 20- 38	10 YR 5/4 10 YR 5,5/4	Brun gris humifère. Brun moins gris et moins humifère. Essentiellement gravillonnaire. Cuirasse ferrugineuse à induration forte.
VB 23	0- 13 13- 32  32- 60  60-136	VB 231 VB 232	10 YR 4/3 10 YR 4/3,5	Brun, humifère. Brun à très nombreux nodules et concrétions calcaires. Essentiellement constitué de nodules et concrétions calcaires. Granite orienté à amphiboles à nodules et plages calcaires.

b. Sols du type brun à profil bien différencié par la couleur

Profils	Horizons (cm)	Echantillons correspondants (cm)	Couleur Munsell	Appréciations morphologiques
VMK 23	0- 10	VMK 231 : 0-10 232 : 10-25	10 YR 3,5/3	Brun foncé, paraissant bien humifère. Brun, paraissant un peu moins humifère que le précédent. Brun vif tranchant nettement sur le précédent par sa couleur et par l'absence apparente de matière organique. Couleur assez identique, un peu plus rouge gravillonnaire à nombreux petits cailloux de quartz. Couleur identique, constitué de gros cailloux de quartz. Identique à l'horizon n° 4.
	10- 25		7,5 YR 4,5/4	
	25- 50	233 : 32-50	7,5 YR 5/5,5	
	50- 73	234 : 50-73		
V 47	0- 26	V 471 : 0-26 472 : 26-48	5 YR 4/4	Brun foncé, humifère. Brun clair ne paraissant que très faiblement humifère, assez tranché sur le précédent. Brun jaune clair, ne paraît pas humifère. Essentiellement constitué de gros gravillons ferrugineux avec quelques cailloux de quartz.
	26- 48		7,5 YR 5/6	
	48- 90	473 : 48-90	7,5 YR 5,5/6	
	90-125			

c. et d. Sols du type rouge

Profils	Horizons (cm)	Echantillons correspondants (cm)	Couleur Munsell	Appréciations morphologiques
VRZ 31	0- 19 19- 40 40- 85	VRZ311 : 0- 14 312 : 19- 40 313 : 40- 70	2,5 YR 3,5/6 2,5 YR 4/6 2,5 YR 4/8 à 5 YR 4/8	Brun gris à l'état frais, humifère. Brun à l'état frais, hétérogène. Brun plus jaune que le précédent à l'état frais.
K 80	0- 7 7- 20 20- 70	K 801 : 0- 7 802 : 7- 20 803 : 20- 35 804 : 35- 50 805 : 50- 70	5 YR 3/3,5 5 YR 3/4 2,5 YR 3,5/6 2,5 YR 3,5/6 2,5 YR 4/6	Brun sombre, humifère. Brun un peu plus clair. Rouge brun, plus clair vers le bas.  Couleur hétérogène brun foncé à brun clair.
	70-110		806 : 70- 90 807 : 90-110 808 : 110-140	
K 88	0- 10	K 881 : 0- 10 882 : 10- 25 883 : 25- 40 884 : 40- 60 885 : 60- 80	5 YR 3/3	Brun rouge foncé, très humifère. Brun rouge, humifère. Rouge foncé. Rouge plus jaune. Jaune rouge.  Roche altérée.
	10- 25		5 YR 4/3	
	25- 40		2,5 YR 3,5/6	
	40- 60		2,5 YR 3,5/6	
	60- 80			
80-100 100-135	886 : 100-135	7,5 YR 6/6		
B 137	0- 15	B 1371 : 0- 15 1372 : 15- 55 1373 : 55- 75 1374 : 75-140 1375 : 140-180		Brun. Rouge. Brun-rouge. Roche altérée avec argile brun-rouge. Roche moins altérée avec traces d'argile.
	15- 55			
	55- 75			
	75-140			
	140-180			

environ. Ces sols sont représentés par les profils VS 60 et V 72 en provenance de Haute-Volta. Les sols à profil peu développé mais calcaires sont représentés par un seul profil le VB 23 de Haute-Volta.

### **1.2.2. Les sols du type brun à profil bien différencié**

Horizon A peu épais et bien différencié par la couleur sur le reste du profil.

Dans ces profils, seuls les horizons superficiels (les 20 ou 25 premiers cm) sont d'une couleur brun foncé ou brun rouge foncé ; ils sont nettement tranchés sur le ou les horizons suivants de couleur brun vif ne paraissant plus contenir de matière organique. La répartition de la matière organique est donc morphologiquement discontinue dans ces sols. Ils sont représentés par les profils V 47 et VMK 23 en provenance de la Haute-Volta.

### **1.2.3. Les sols à profil bien différencié et à horizon B de couleur rouge**

Horizon A peu épais et bien différencié par la couleur sur le reste du profil.

Ces sols ont le même type de différenciation que les précédents, ils ne s'en distinguent que par leur couleur. Les horizons A sont de couleur brun rouge foncé, paraissant très riches en matière organique ; ils ont environ 25 cm d'épaisseur, sont différenciés ou non en deux horizons, et tranchent nettement sur les horizons (B) de couleur rouge, ne paraissant pas humifères. Cette couleur rouge traduit une individualisation du fer dans un milieu bien drainé. La répartition de la matière organique est donc morphologiquement discontinue. Ces sols sont représentés par les profils K 80, K 88 et B 137 du Sénégal oriental.

### **1.2.4. Sols de type rouge sur l'ensemble du profil peu différencié**

Horizon A peu épais (10 cm) de couleur déjà rouge (2,5 YR 3,5/6) et peu différencié en conséquence par rapport à l'horizon (B) rouge (2,5 YR 4/6 et 2,5 YR 4/8 à 5 YR 4/8).

La répartition de la matière organique est donc morphologiquement moins discontinue que précédemment parce que l'horizon A lui-même paraît déjà peu humifère. Ces sols sont représentés par un seul profil : VRZ 31 de Haute-Volta.

Ces caractéristiques ont été résumées dans le tableau 2 (tableau récapitulatif de la couleur des sols et de ses variations à travers le profil).

## **2. LA MATIÈRE ORGANIQUE TOTALE**

### **2.1. RÉPARTITION DANS LES PROFILS**

#### **2.1.1. Sols de type brun à faible différenciation du profil sur une grande profondeur (fig. 1a)**

Les teneurs en matière organique des horizons de surface sont variables, mais dans l'ensemble moyennes (1 à 2 %). Elles ne décroissent que progressivement en profondeur — grossomodo, les courbes de variations des teneurs en matière organique en fonction de la profondeur ont la même allure dans les

profils VS 26, V 78, VL 24, V 46, avec cependant une pente d'ensemble un peu plus forte dans le profil V 78.

Le V 64 se distingue par une décroissance très faible des teneurs en matière organique jusqu'à 45 cm, puis à partir de cette profondeur par une décroissance assez identique à celle des autres profils pour une même profondeur.

La matière organique est donc bien répartie sur une grande profondeur et le plus souvent sur l'ensemble du profil, même quand celui-ci est bien profond.

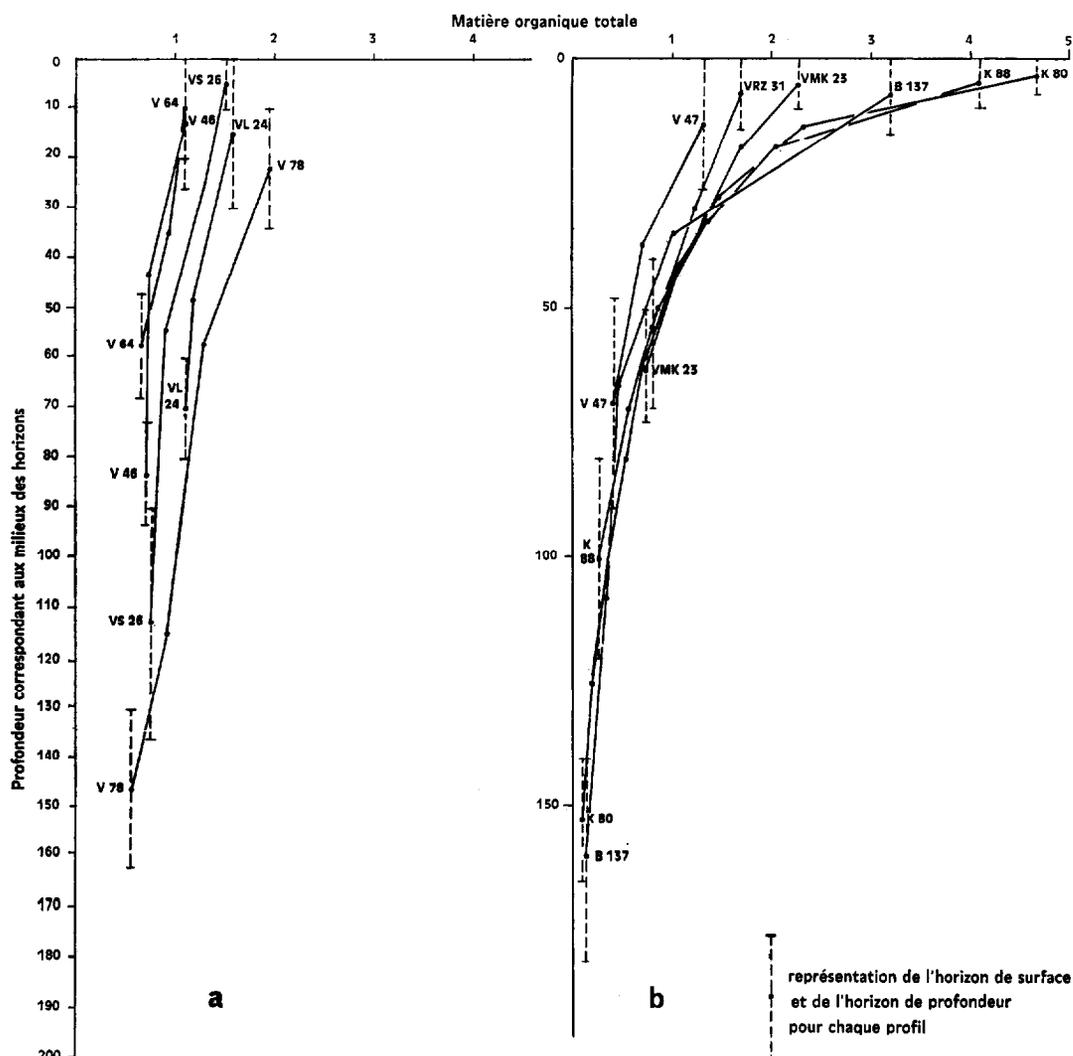


FIG. 1. — Matière organique totale.

Chaque horizon est représenté par un point figurant son milieu et auquel sont rapportées les teneurs en matière organique.

a) sols bruns à différenciation progressive du profil.

b) sols bruns à profil bien différencié (V 47 - VMK 23).

sols rouges : la lettre V permet l'identification des profils de Haute-Volta.

### 2.1.2. Sols du type brun à profil bien différencié (fig. 1b)

Dans les deux profils étudiés, les teneurs en matière organique sont inégales en surface bien que du même ordre que dans les profils précédents : 1,3 % pour le V 47 et 2,2 % pour le VMK 23. Dans les deux cas, elles décroissent un peu plus rapidement que dans l'ensemble des sols précédents.

Mais l'allure des courbes reste assez voisine de celle du profil V 78. La distribution de la matière organique en fonction de la profondeur n'est donc pas significativement différente de celle des sols précédents.

### 2.1.3. Les sols du type rouge (fig. 1b)

Dans les sols à profils bien différenciés du Sénégal oriental, les teneurs en matière organique des horizons de surface (0-10 cm environ) sont beaucoup plus élevées que dans les sols de Haute-Volta et de l'ordre de 4 %. Mais elles décroissent très rapidement et rejoignent celles de certains profils de Haute-Volta vers 25 cm de profondeur. Elles continuent à décroître rapidement jusque vers 50 cm, si bien qu'à cette profondeur elles deviennent inférieures à celles de la majorité des sols précédents. C'est seulement à partir de là que les courbes de décroissance de la matière organique en fonction de la profondeur prennent la même allure que dans les sols des deux catégories précédentes.

Dans le profil VRZ 31, sol à profil peu différencié, de Haute-Volta, la courbe matière organique en fonction de la profondeur a la même allure que dans les sols de la deuxième catégorie, et les teneurs en matière organique sont du même ordre.

La décroissance rapide des teneurs en matière organique en profondeur est donc propre aux sols du Sénégal oriental et non au type rouge d'une façon générale. On retrouve ce processus dans des vertisols et autres catégories de sols de la même région.

### 2.1.4. Conclusion

Les différents types de sols étudiés ne se différencient pas d'une manière spécifique par la distribution de la matière organique en fonction de la profondeur.

## 2.2. DÉCOMPOSITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE : RAPPORT C/N

### 2.2.1. Sols de type brun à faible différenciation du profil (fig. 2a)

Les rapports C/N sont moyens à assez élevés en surface (12,5 à 14,2). Ils tendent souvent à augmenter et à première vue paradoxalement dans le deuxième horizon humifère (horizon A<sub>12</sub>), pour s'abaisser ensuite très progressivement en profondeur. Vers 50 à 60 cm de profondeur on a encore des C/N de l'ordre de 12,4 à 14, c'est-à-dire peu différents des C/N des horizons de surface. Dans les deux profils très bien développés le VS 26 et le V 78, on a encore à plus de 1 m de profondeur des C/N de 13 et 13,3.

## 2.2.2. Sols du type brun à profil bien différencié et sols du type rouge (fig. 2b)

Dans les horizons superficiels A<sub>11</sub>, les rapports C/N sont à peu près du même ordre que dans les profils précédents, mais ils s'abaissent souvent rapidement avec la profondeur pour devenir inférieurs aux valeurs trouvées dans les sols précédents.

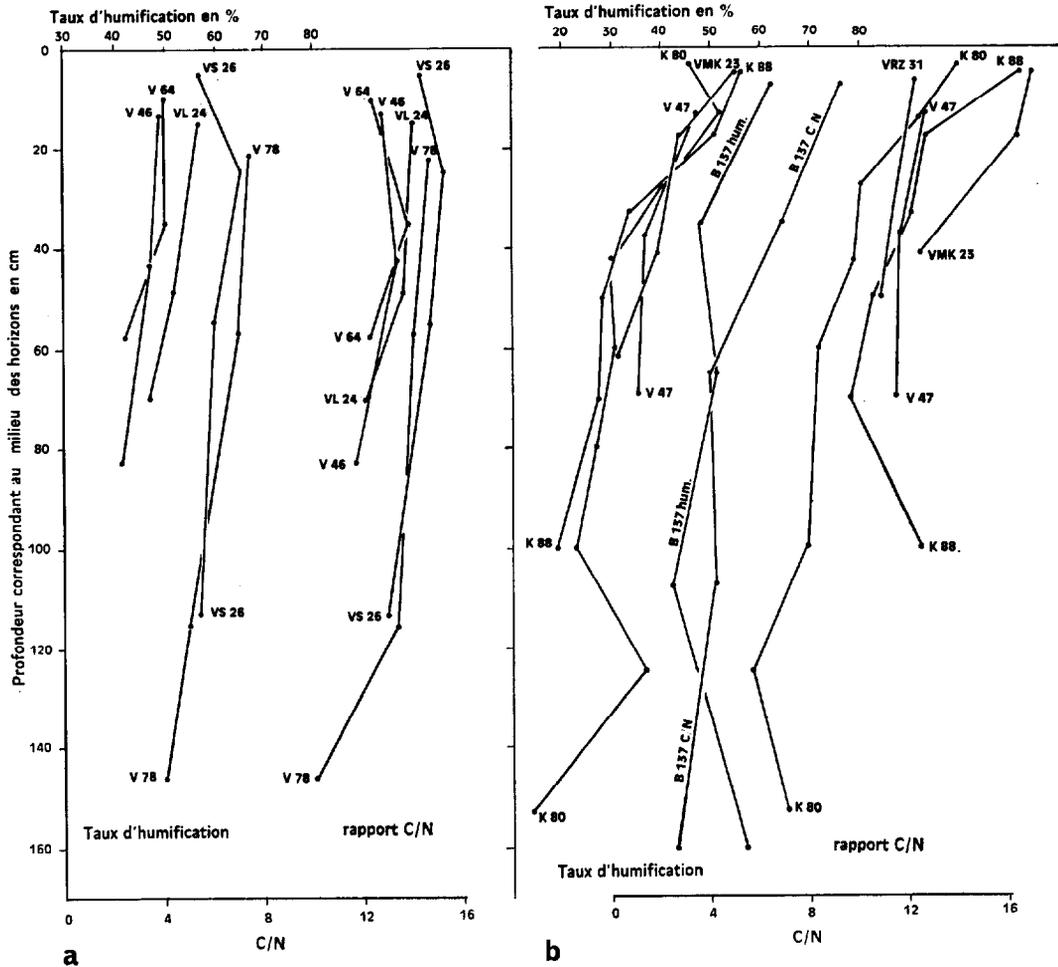


FIG. 2. — Rapport C/N et taux d'humification.

a) sols bruns à faible différenciation du profil.

b) sols bruns à profil bien différencié et sols rouges.

Le rapport C/N est censé communément exprimer le degré de décomposition de la matière organique. On pourrait donc penser à première vue que les sols du deuxième type ont une matière organique plus évoluée que ceux du premier type. Nous reviendrons sur ce problème lors de l'étude des différentes fractions humiques.

### 3. LES DIFFÉRENTES FRACTIONS HUMIQUES

#### 3.1. SOLS DE TYPE BRUN A FAIBLE DIFFÉRENCIATION DU PROFIL

##### 3.1.1. Taux d'humification (fig. 2a et 3a)

Le taux d'humification est élevé : environ 50 à 67 % en surface, et toujours supérieur à 40 % en profondeur.

Les profils VS 26 et V 78 qui peuvent être considérés comme types accusent un taux d'humification élevé qui se maintient sur une grande profondeur (près de 60 % à plus de 1 m de profondeur).

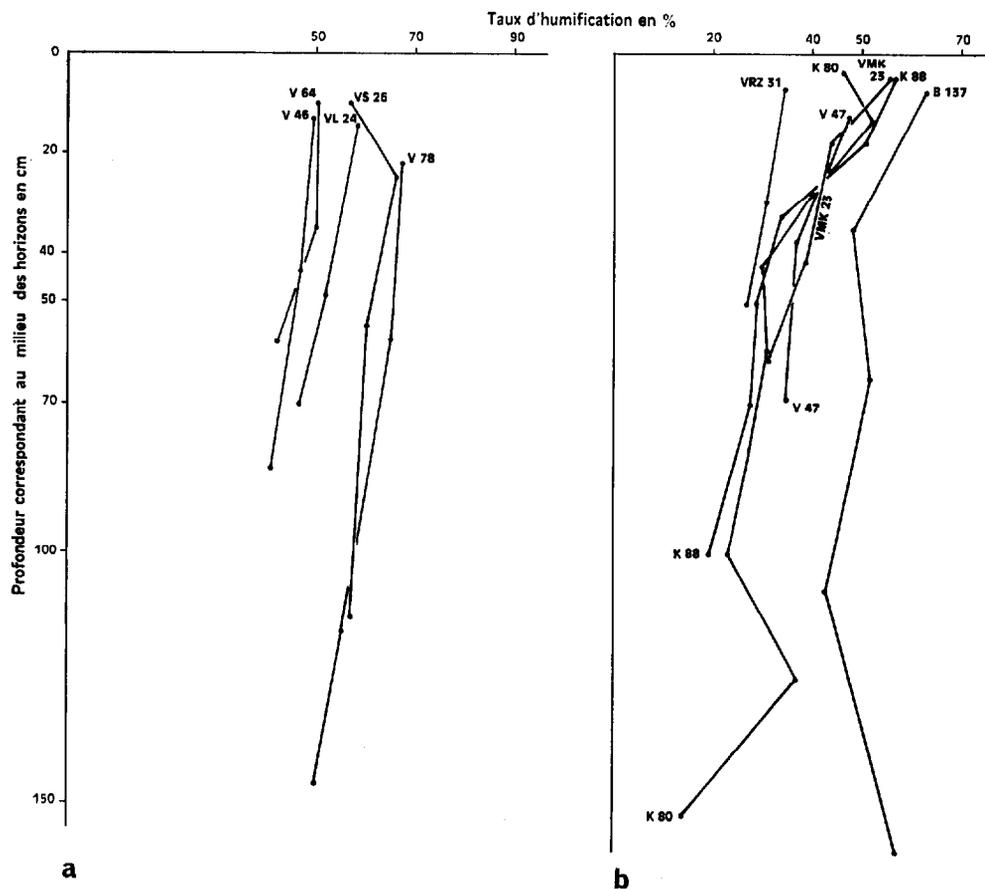


FIG. 3. — Taux d'humification.

a) sols bruns à faible différenciation du profil.

b) sols bruns à profil bien différencié et sols rouges.

Le profil VS 26 qui est un sol de transition vers les vertisols accuse une augmentation du taux d'humification dans l'horizon A<sub>12</sub> et la variation la plus faible entre la surface et la profondeur.

Dans tous les autres profils le taux d'humification diminue progressivement en profondeur avec des variations généralement faibles ou très faibles entre les horizons A<sub>11</sub> et A<sub>12</sub>, c'est-à-dire sur une profondeur de l'ordre de 50 cm.

Dans tous les profils bien développés on constate que le rapport C/N varie généralement dans le même sens que le taux d'humification. L'augmentation des valeurs du C/N n'indique donc pas un degré de décomposition décroissant de la matière organique.

Le profil calcaire VB 23 se distingue par un taux d'humification significativement plus faible (32 à 35 %).

### 3.1.2. Les proportions d'acides humiques et d'acides fulviques (fig. 4)

L'ensemble des *profils* est caractérisé par un rapport acides humiques/acides fulviques toujours supérieur à 1 sur l'ensemble du sol.

Les *profils* bien typés (VS 26, V 78 et V 46) montrent des courbes AH/AF assez semblables caractérisées par une décroissance progressive du rapport AH/AF en fonction de la profondeur, avec des valeurs élevées à très élevées sur une grande profondeur (supérieures à 2 pour V 46, de l'ordre de 4 pour V 78 et de 5 pour VS 26).

Le profil V 64 accuse un rapport AH/AF relativement élevé (de l'ordre de 2) sur une grande profondeur et jusqu'au niveau de discontinuité morphologique de couleur à partir duquel le rapport AH/AF accuse une nette décroissance.

Seul le profil VL 24 accuse une décroissance assez rapide du rapport AH/AF en fonction de la profondeur.

Le V 72, profil peu développé sur cuirasse et le VB 23 profil peu développé calcaire, se distinguent par les proportions les plus élevées d'acides fulviques (30 à 35 % en A<sub>11</sub>, 43 à 47 % en A<sub>12</sub>).

En conclusion, ces sols sont caractérisés par une forte dominance des acides humiques sur les acides fulviques, dominance particulièrement accentuée dans le sol de transition vers les vertisols (le profil VS 26).

### 3.1.3. Répartition des différentes fractions d'acides fulviques

L'ensemble des profils étudiés sont caractérisés par une très forte dominance des acides fulviques liés aux acides humiques (F<sub>2</sub>) sur les acides fulviques libres (F<sub>1</sub>) : le rapport F<sub>2</sub>/AF est presque toujours de l'ordre de 75 à 90 % sur l'ensemble du profil.

### 3.1.4. Répartition des différentes fractions d'acides humiques

#### a) Acides humiques libres H1 (fig. 7a)

Les proportions des acides humiques libres, assez faibles en surface (de l'ordre de 25 %), deviennent généralement presque négligeables à partir du deuxième horizon (de l'ordre de 10 %) et décroissent en profondeur.

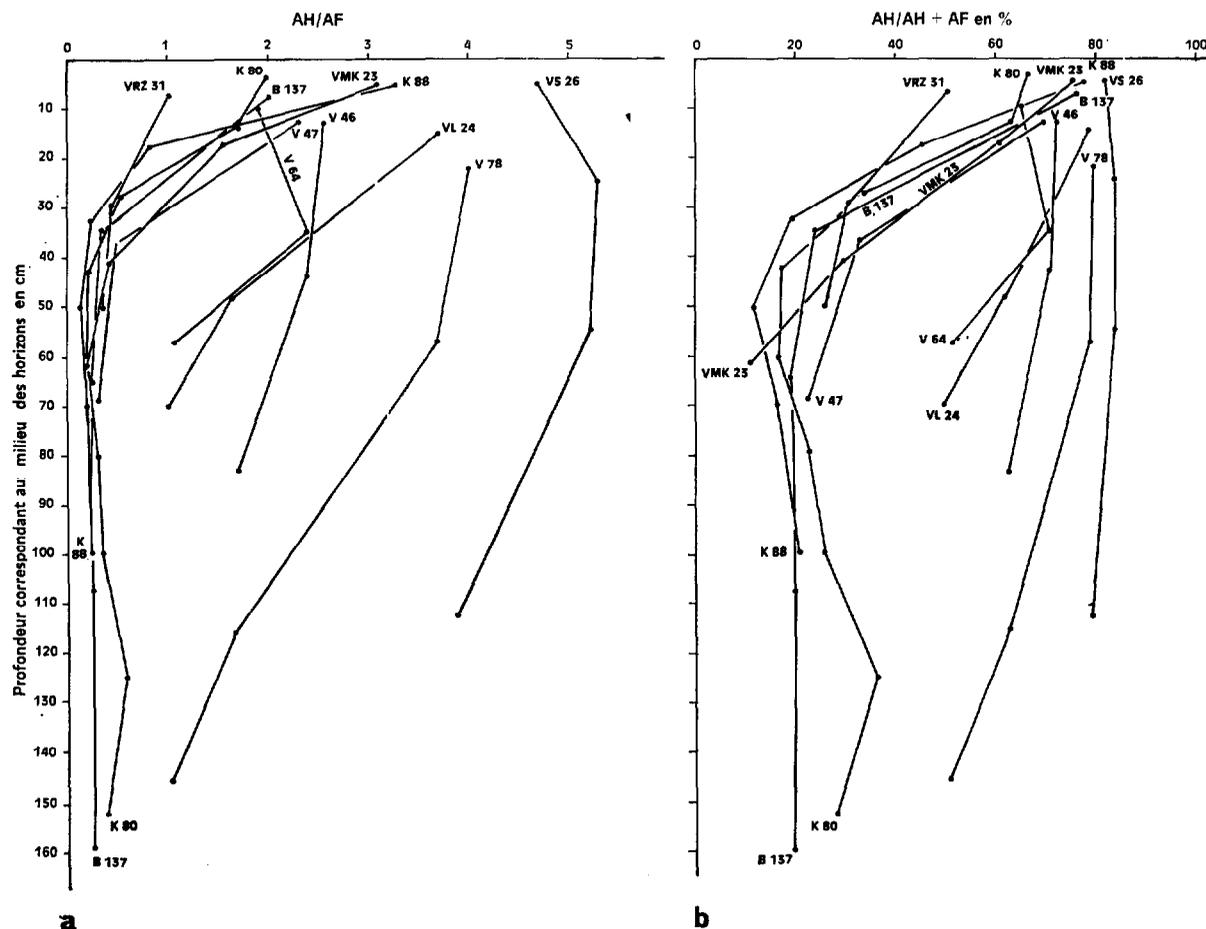


FIG. 4. — Proportions des acides humiques totaux : ensemble des sols étudiés.

a) rapport AH/AF.

b) rapport AH/AH + AF en %.

Le profil de transition vers les vertisols est caractérisé par des proportions plus faibles en surface (14 %) et négligeables en profondeur (3,5 à 0,5 %).

Le profil calcaire est celui qui accuse cependant les plus faibles proportions d'acides humiques libres (1 % en A<sub>11</sub>, 0 % en A<sub>12</sub>).

Seul le profil V 72 (profil peu développé sur cuirasse) accuse des proportions importantes d'acides humiques libres (49 % en A<sub>11</sub>, 26 % en A<sub>12</sub>).

La figure 7a résume pour les profils bien développés les variations du rapport H<sub>1</sub>/AH en fonction de la profondeur : décroissance assez brusque de A<sub>11</sub> à A<sub>12</sub>, puis très progressive jusqu'à la base du profil.

#### b) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaire de Al et Fe = H<sub>3</sub> (fig. 7b)

Ils sont peu représentés dans l'ensemble des sols et sur l'ensemble du profil. Leurs proportions augmentent régulièrement de 10 à 15 % en surface à environ 20-23 % en profondeur.

Le profil V 64 se distingue par une forte proportion d'acides humiques liés au fer et à l'aluminium dans l'horizon B, c'est-à-dire à partir du niveau de la discontinuité de couleur.

**c) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaire du Ca : H<sub>2</sub>**

Ces sols sont typiquement caractérisés par de très fortes proportions d'acides humiques liés au calcium sur l'ensemble du profil avec une décroissance progressive et faible de la surface en profondeur : rapport H<sub>2</sub>/AH de l'ordre de 65 à 80 % (fig. 5).

Le profil VS 26 (transition vers les vertisols) se distingue par les proportions de H<sub>2</sub> les plus élevées (plus de 75 % sur l'ensemble du profil) avec un maximum en A<sub>12</sub>.

Le profil VL 64 se distingue par un maximum très élevé de la proportion de H<sub>2</sub> en A<sub>12</sub>.

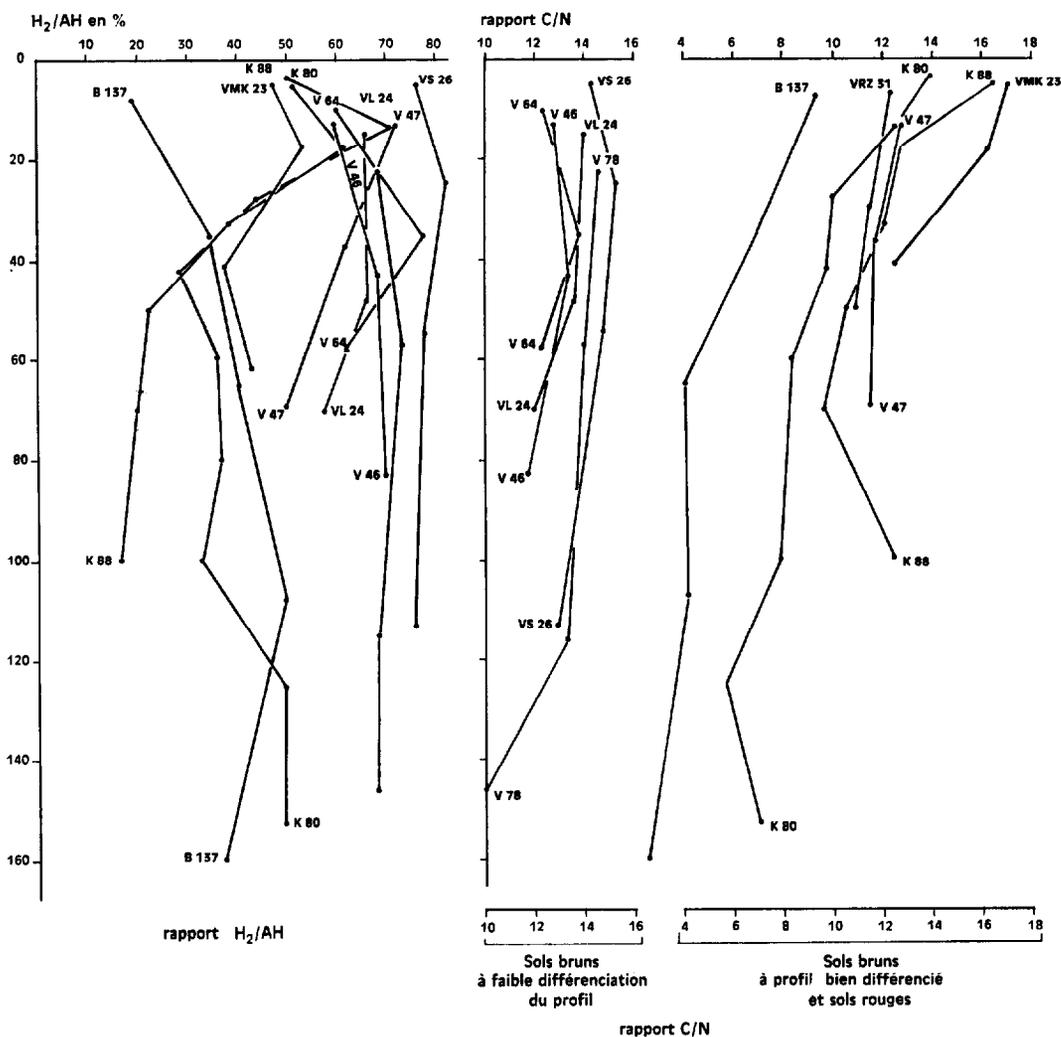


FIG. 5. — Rapport H<sub>2</sub>/AH ; ensemble des sols étudiés.

sols bruns à faible différenciation du profil : VS 26, V 78, V 46, V 64, VL 24.

sols bruns à profil bien différencié : VMK 23, V 47.

sols rouges : VRZ 31, K 88, K 80, B 137.

Le profil calcaire VB 23 est caractérisé par les proportions de  $H_2$  les plus élevées (87 % en  $A_{11}$  et 85 % en  $A_{12}$ ), tandis que le profil V 72 peu développé sur cuirasse accuse les plus faibles proportions en  $H_2$  (42 % en  $A_{11}$ , 61 % en  $A_{12}$ ).

La figure 6 représente les variations du rapport  $H_2$ /humus total (AH+AF) : les courbes sont d'une manière générale parallèles à celles du rapport  $H_2$ /AH. Ce fait souligne l'importance de la fraction  $H_2$  dans les acides humiques et dans l'humus total.

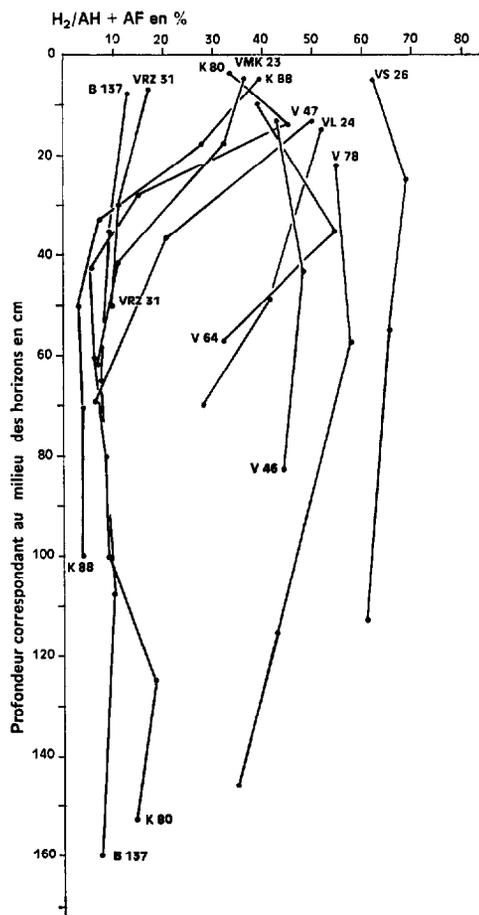


FIG. 6. — Rapports  $H_2$ /AH + AF en fonction de la profondeur.  
 sol bruns à faible différenciation du profil VS 26, V 78, V 64, V 46, VL 24.  
 sols bruns à profil bien différencié : VMK 23 et V 47.  
 sols rouges : VRZ 31, K 88, K 80, B 137.

Le rapport  $H_2$ /AH+AF varie de 40 à 70 % dans ces sols avec des proportions particulièrement élevées pour le V 78 et surtout pour le VS 26.

La figure 5 représente les variations du rapport C/N en même temps que celles du rapport  $H_2$ /AH. On constate d'une manière générale que les variations du rapport C/N suivent exactement et dans le même sens celles du rapport  $H_2$ /AH, comme celles du taux d'humification. On peut donc dire que la

teneur en carbone augmente avec celle des acides humiques liés au calcium qui augmente elle même avec le taux d'humification.

### 3.1.5. Conclusion

Les sols de type brun à faible différenciation du profil sont typiquement caractérisés par :

- un taux d'humification élevé (50 à 67 % en surface), décroissant progressivement en profondeur, avec parfois une augmentation dans l'horizon  $A_{12}$ .
- une forte prépondérance des acides humiques sur une grande profondeur (rapport AH/AH+AF de l'ordre de 84 à 60 %).
- une forte dominance dans les acides humiques, de la fraction liée au calcium :  $H_2/AH$  de l'ordre de 60 à 82 %. Ces proportions sont de façon, très fréquente et caractéristique de ces sols, maximum dans les horizons  $A_{12}$ . Ces derniers paraissent donc correspondre aux conditions optimum de la polymérisation.

Ces sols répondent bien au concept de sols à mull.

## 3.2. LES SOLS DE TYPE BRUN A PROFIL BIEN DIFFÉRENCIÉ PAR LA COULEUR :

horizons A peu épais et bien différenciés sur le reste du profil.

### 3.2.1. Taux d'humification : fig. 3b et 2b

Le taux d'humification est assez bon en surface (46 à 55 %) et diminue progressivement en profondeur avec cependant une baisse plus rapide dans le profil VMK 23. En profondeur il se maintient à des valeurs assez bonnes et de l'ordre de 35 %.

Les variations du taux d'humification suivent le même sens que celles du rapport C/N dans le profil V 47, mais ce phénomène ne s'observe plus dans le profil VMK 23.

### 3.2.2. Les proportions d'acides humiques et d'acides fulviques (fig. 4)

Les deux profils étudiés sont caractérisés par de très fortes proportions d'acides humiques dans l'horizon A (70 à 76 %), mais qui s'abaissent brusquement à des valeurs faibles (de l'ordre de 30 %) à partir d'une profondeur d'environ 25 cm, pour ne diminuer que progressivement par la suite en profondeur.

Ces sols sont donc caractérisés par une très large dominance des acides fulviques sur la plus grande partie du profil.

### 3.2.3. Répartition des différentes fractions d'acides fulviques

Les acides fulviques libres ont comme dans les sols précédents une représentativité très faible en surface (3 à 8 %), mais leurs proportions augmentent notablement en dessous de 25 cm environ pour atteindre des valeurs de l'ordre 22 à 30 %, avec alors de faibles variations en fonction de la profondeur.

Ces sols sont donc caractérisés par une large dominance, dans les acides fulviques de la fraction liée aux acides humiques.

### 3.2.4. Répartition des différentes fractions d'acides humiques

#### a) Acides humiques libres $H_1$ (fig. 7a)

Les deux profils étudiés présentent des proportions d'acides humiques libres par rapport aux acides humiques totaux nettement différentes, de l'ordre de 20 % pour V 47 et 35 % pour VMK 23. Mais ces proportions ne varient que faiblement en fonction de la profondeur avec une allure irrégulière dans le VMK 23.

#### b) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaire du fer et de l'alumine $H_3$

Les proportions d'acides humiques liés au fer et à l'aluminium (rapport  $H_3/AH$ ) augmentent progressivement de la surface en profondeur pour le profil VMK 23, avec une allure plus rapide pour le profil V 47 (fig. 7b).

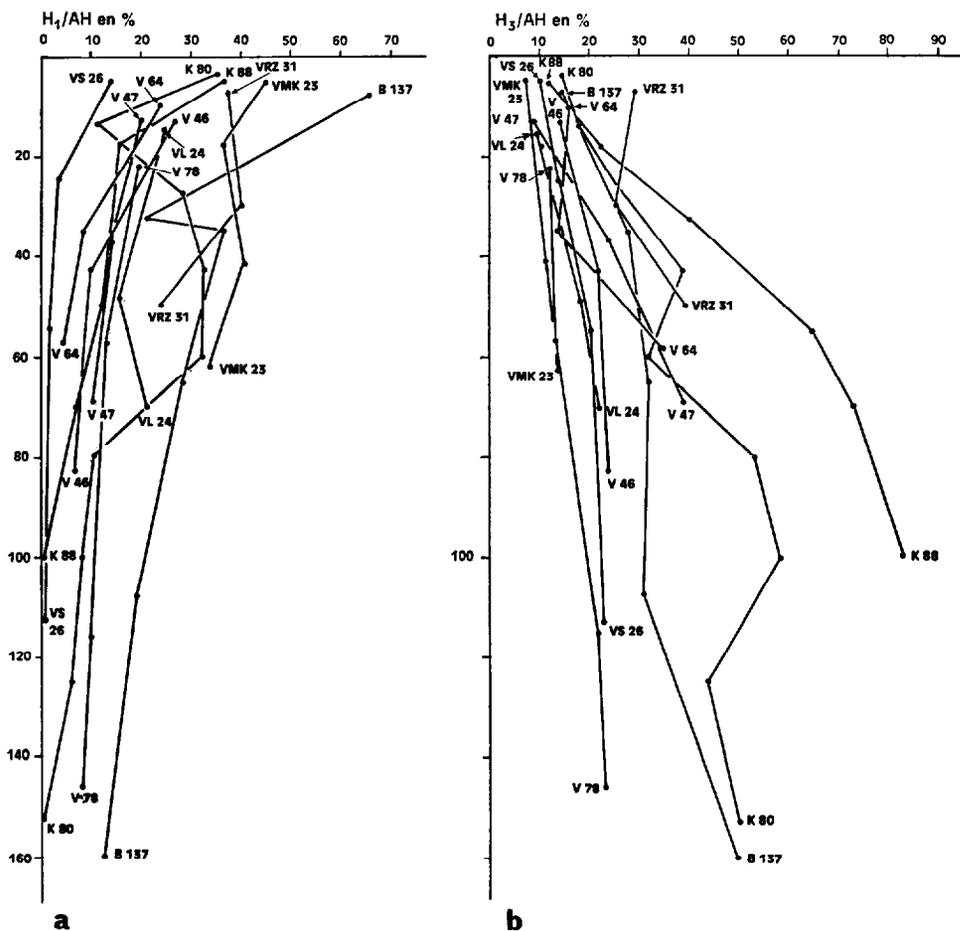


FIG. 7. — Rapports  $H_1/AH$  et  $H_3/AH$  en fonction de la profondeur - ensemble des sols étudiés.

sols bruns à faible différenciation du profil : VS 26, V 78, V 64, V 46, VL 24.

sols bruns à profil bien différencié : VMK 23 et V 47.

sols rouges : VRZ 31, K 88, K 80, B 137.

a) rapport  $H_1/AH$ ,

b) rapport  $H_3/AH$ .

Elles sont à peu près du même ordre que dans les sols précédents : environ 8 % en surface et 20 à 25 % en profondeur. Le dernier horizon du profil V 47 se distingue par un rapport  $H_3/AH$  élevé (39 %).

**c) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaire du calcium :  $H_2$  (fig. 5 et 6)**

Les proportions d'acides humiques liés au calcium sont différentes dans les deux profils : nettement plus élevées dans le profil V 47 ( $H_2/AH = 50$  à  $72$  %) que dans le profil VMK 23 ( $H_2/AH = 38$  à  $54$  %). Mais ces deux sols sont caractérisés par un brusque abaissement de la proportion des acides liés au calcium à partir de 25 cm c'est-à-dire en dessous de l'horizon A (fig. 5).

Dans le profil VMK 23, on observe, comme dans certains sols de la catégorie précédente, une augmentation de la proportion de  $H_2$  dans l'horizon  $A_{12}$ .

Par rapport à l'humus total, la proportion de  $H_2$ , moyenne à assez bonne en surface (35 à 50 %), s'abaisse aussi brutalement en dessous de l'horizon A à des valeurs faibles à très faible (12 à 20 %) pour ne diminuer ensuite que très progressivement (fig. 6).

### 3.2.5. Conclusion

Ces sols sont caractérisés, dès une faible profondeur (25 cm environ) par une forte prépondérance des acides fulviques sur les acides humiques, entraînant une très faible représentativité des acides humiques liés au calcium par rapport à l'humus total. Ce phénomène est accentué par une diminution propre des acides humiques liés au calcium par rapport aux acides humiques totaux.

Ces sols ne répondent pas au concept de sols à mull.

## 3.3. LES SOLS DE TYPE ROUGE

### 3.3.1. Sols à profil bien différencié (horizon A peu épais sur un horizon B de couleur rouge)

#### 3.3.1.1. LE TAUX D'HUMIFICATION (fig. 3b et 2b)

Les deux profils typiques de ces sols sont caractérisés par des taux d'humification moyens à assez bons dans les horizons A (45 à 56 %) s'abaissant rapidement à mesure que l'on descend en profondeur jusqu'à environ 50 à 60 cm, niveau à partir duquel la décroissance devient progressive.

Dans le profil B 137 on observe le même type de variation du taux d'humification, mais celui-ci garde des valeurs plus élevées sur l'ensemble du profil.

Dans les deux profils pour lesquels nous disposons du rapport C/N, les variations de ce dernier ont grossièrement le même sens que celle du taux d'humification jusqu'à 50 cm de profondeur environ.

#### 3.3.1.2. LES PROPORTIONS D'ACIDES HUMIQUES ET D'ACIDES FULVIQUES

L'ensemble des sols étudiés se comportent comme les sols de type brun à profil bien différencié : très fortes proportions d'acides humiques dans l'horizon A (rapport  $AH/AH+AF = 63$  à  $77$  %), s'abaissant très brutalement en dessous de celui-ci à des valeurs de l'ordre de 25 à 33 %, pour diminuer ensuite très progressivement en profondeur (fig. 4).

Ces sols sont donc caractérisés par une très large dominance des acides fulviques sur les acides humiques dans la plus grande partie du profil.

### 3.3.1.3. RÉPARTITION DES FRACTIONS D'ACIDES FULVIQUES

Les acides fulviques libres ont une très faible représentativité en surface (3 à 6 %). Leurs proportions augmentent ensuite assez brusquement à des valeurs de l'ordre de 17 % pour diminuer vers la base du profil. Le profil K 88 se distingue par des proportions d'acides fulviques libres plus élevées en profondeur (17 à 34 %).

Nous observons donc toujours la très forte prédominance des acides fulviques liés aux acides humiques sur les acides fulviques libres.

### 3.3.1.4. RÉPARTITION DES FRACTIONS D'ACIDES HUMIQUES

#### a) Acides humiques libres $H_1$

Leurs proportions varient de façons diverses selon les profils. Elles sont en surface (horizons  $A_{11}$ ) du même ordre que dans les sols de type brun à profil bien différencié (rapport  $H_1/AH$  de 35 % environ), diminuent ensuite brusquement dans l'horizon  $A_{12}$  ( $H_1/AH = 11$  à 16 %) pour augmenter dans la partie moyenne du profil avant de diminuer en profondeur (fig. 7a).

Dans le profil B 137, la courbe de variation du rapport  $H_1/AH$  est plus régulière, forte diminution en dessous de l'horizon A puis décroissance très progressive, avec des valeurs très élevées en A (65 %) et relativement élevées sur le reste du profil (fig. 7a)).

#### b) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaire du fer et de l'aluminium $H_3$

Leurs proportions par rapport aux acides humiques totaux augmentent d'environ 10 à 15 % en surface à 60-73 % en profondeur (fig. 7b). Le profil K 88 se distingue par les plus fortes proportions de  $H_3$  en profondeur (73 % dans le dernier horizon), et le profil B 137 par les proportions les plus faibles (31 à 32 % à la base du profil).

Les profils K 80 et K 88 sont caractérisés en profondeur, par de très fortes proportions d'acides humiques liés au fer et à l'aluminium.

#### c) Acides humiques liés à la matière minérale par l'intermédiaires du calcium $H_2$

##### — Rapport $H_2/AH$ (fig. 5)

Les deux profils types de ces sols K 80 et K 88 accusent des proportions assez bonnes de  $H_2$  en  $A_{11}$  (50 % environ), forte en  $A_{12}$  (61 à 71 %) s'abaissant ensuite brutalement en profondeur à des valeurs de l'ordre de 30 à 40 % dans la partie moyenne du profil, et qui tantôt continuent à diminuer, tantôt augmentent assez sensiblement en profondeur.

A l'inverse de ces profils, on constate dans le B 137, une augmentation constante de la proportion des  $H_2$  de 20 % en surface à 50 % à la base du profil.

##### — Rapport $H_2/AH+AF$ (fig. 6)

Dans les profils K 88 et K 80, les variations du rapport  $H_2/AH+AF$  sont en gros les mêmes que celles du rapport  $AH/AF+AH$ . On constate seulement dans le K 80 une forte diminution de la proportion des  $H_2$  en  $A_{11}$  par rapport à  $A_{12}$ .



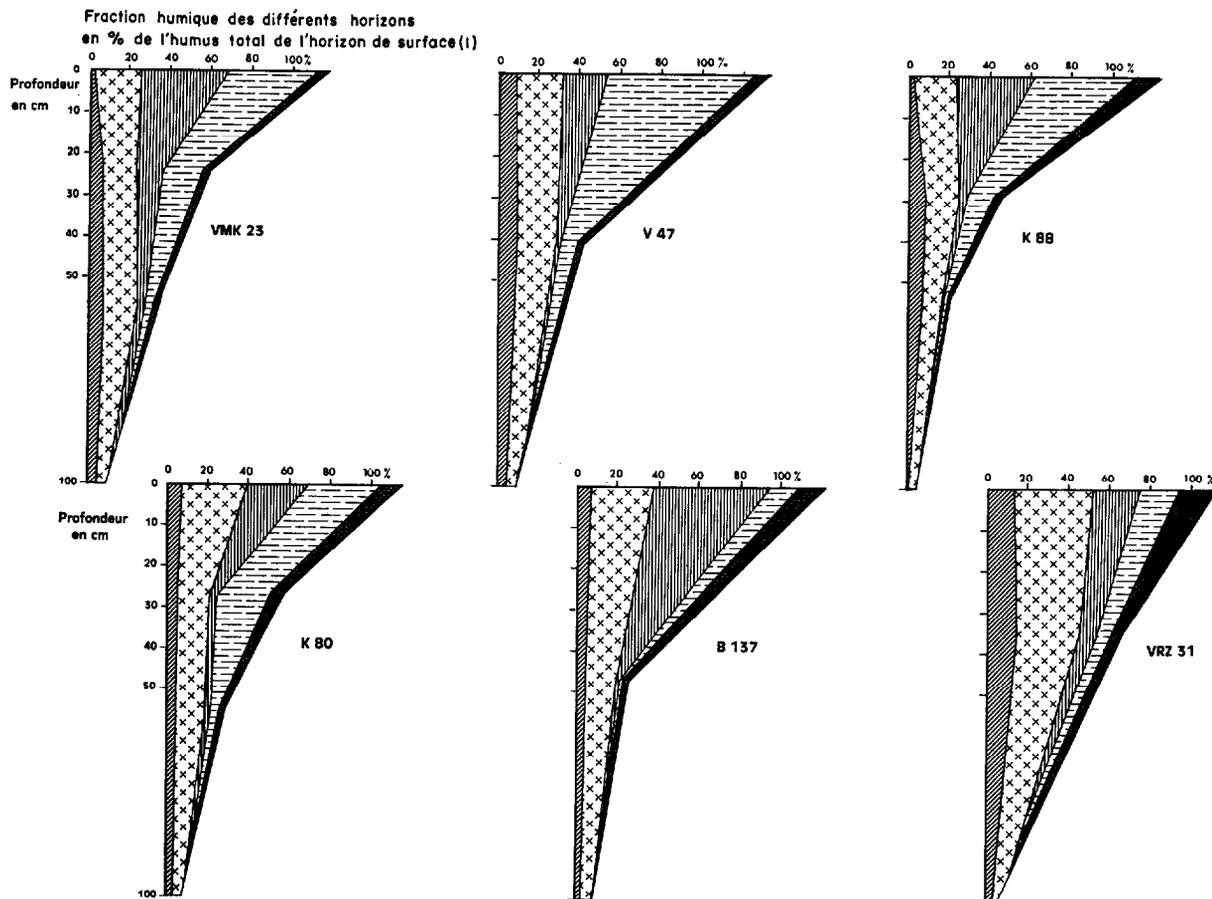


FIG. 9. — Sols bruns à profil bien différencié et sols rouges (chaque profil est ramené à 100 cm).  
(1) les teneurs en acides humiques de chaque horizon sont attribuées à un point représentant le milieu.

Ces sols ont un profil humique comparable à celui des sols à sesquioxydes sur matériau kaolinitique des mêmes régions (sols ferrugineux tropicaux). Par la forte dominance des fractions humiques non liées à la matière minérale, ils ne correspondent pas à la définition des sols à mull.

### 3.3.2. Sols de type rouge à faible différenciation du profil, mais rouges dès la surface : profil VRZ 31

Il se distingue des profils K 80 et K 88 par :

- une proportion d'acides humiques totaux plus faible en surface (50 %), mais le rapport  $\text{AH}/\text{AF} + \text{AH}$  varie de la même façon en fonction de la profondeur (fig. 4).
- des proportions d'acides humiques libres ( $\text{H}_1$ ) se maintenant élevées jusqu'à 40 cm de profondeur puis s'abaissant brusquement tout en restant plus élevées que dans les profils K 80 et K 88 (fig. 7a).
- et surtout une proportion d'acides humiques liés au calcium ( $\text{H}_2$ ) très faible dès la surface (17 %) et ne s'abaissant que très progressivement en profondeur comme dans le profil B 137 (fig. 6).

## 4. DISCUSSION DES RÉSULTATS

### 4.1. RAPPORT C/N ET DEGRÉ DE POLYMÉRISATION DE L'HUMUS

Les acides humiques étant plus polymérisés que les acides fulviques, et les acides humiques liés à la matière minérale plus polymérisés que les acides humiques libres, on peut en principe exprimer le degré de polymérisation croissant de la matière humique par les rapports AH/AF,  $H_2/AH + AF$  et  $H_2 + H_3/AH + AF$  tandis que le degré de polymérisation croissant de la matière organique totale peut s'exprimer par les rapports AH/C,  $H_2/C$ , et  $H_2 + H_3/C$  (C étant le carbone total).

Les rapports  $H_1/AH + AF$  et  $H_1/C$  indiqueraient alors respectivement le degré de faible polymérisation de la matière humique et de la matière organique totale.

Les figures 10, 12, 15 représentent le rapport C/N respectivement en fonction des rapports AH/AF,  $H_2/AH + AF$  et  $H_1/AH + AF$ .

Les figures 11, 13, 16 et 14 représentent le rapport C/N respectivement en fonction des rapports AH/C,  $H_2/C$ ,  $H_1/C$  et  $H_3/C$ .

#### 4.1.1. Rapport C/N et acides humiques totaux

Dans les sols bruns à faible différenciation du profil (sols du premier groupe), on constate que les rapports AH/AF et AH/C sont proportionnels au rapport C/N et augmentent assez rapidement avec lui.

Dans les sols bruns à profil bien différencié et dans les sols rouges (sols du deuxième groupe), la proportionnalité entre les rapports AH/AF, AH/C et le rapport C/N n'est plus aussi nette (fig. 10 et 11) : au dessus des valeurs du C/N supérieures à 10, elle existe encore, mais bien moins nette que dans le cas précédent ; en dessous des valeurs du C/N inférieures à 10, celui-ci n'a pas de relation avec le rapport AH/AF, et semble inversement proportionnel au rapport AH/C.

La proportionnalité entre les rapports AH/AF et AH/C est donc mieux marquée dans les sols du premier groupe. Cela veut dire que dans l'ensemble, les acides humiques sont plus polymérisés dans ces derniers que dans les sols du deuxième groupe.

#### 4.1.2. Rapport C/N et rapports $H_2/AH + AF$ , $H_2/C$

Dans les sols du premier groupe, les rapports  $H_2/AH + AF$  et  $H_2/C$  apparaissent bien proportionnels au rapport C/N et augmentent assez rapidement avec lui (fig. 12 et 13).

Dans les sols du deuxième groupe, cette relation n'est plus aussi nette et on devine mal dans quelle mesure ces rapports sont liés.

Il apparaît donc que les acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium sont plus polymérisés dans les sols du premier groupe que dans ceux du deuxième groupe.

On peut concevoir en effet, que le degré de polymérisation soit en quelque sorte proportionnel à la facilité avec laquelle se produit le phénomène de polymérisation.

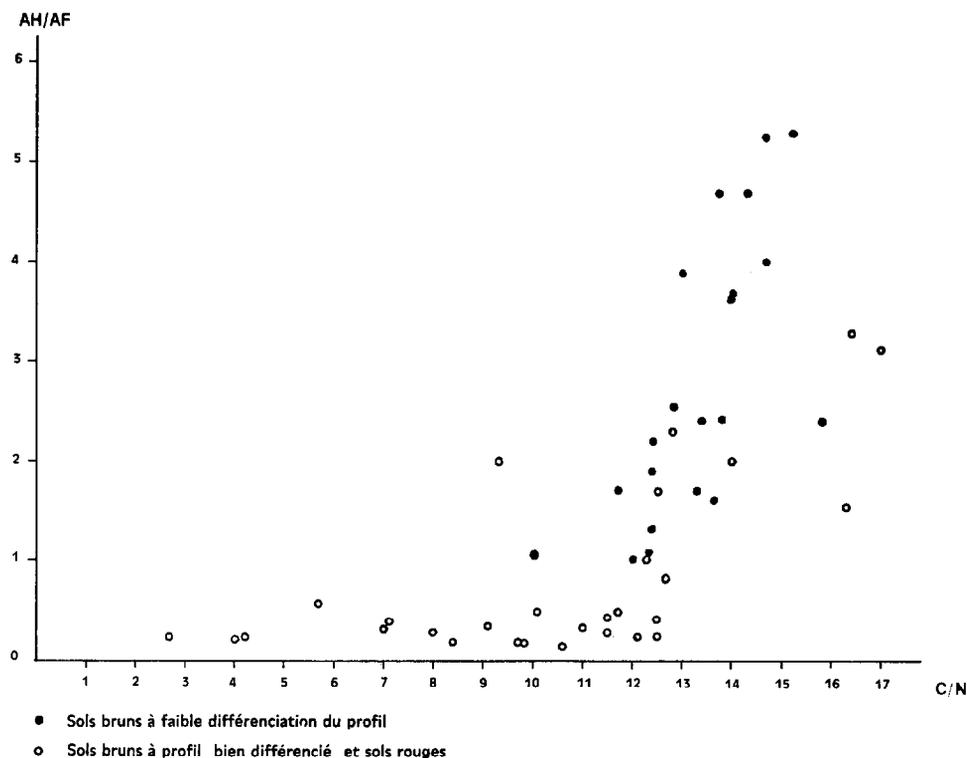


FIG. 10. — Rapport AH/AF et rapport C/N.

Ce résultat est à rapprocher des conclusions de SINGH (1954 *a* et 1954 *b*). Cet auteur, en étudiant le principe de la formation de la couleur noire dans les sols noirs (vertisols) typiques de l'Inde, a montré que celle-ci est due à l'action des composés humiques du complexe argilo-humique les plus riches en carbone. Aussi le traitement des complexes colorés par des acides minéraux forts provoque une perte préférentielle d'azote, mais peu ou pas de destruction de la couleur noire.

#### 4.1.3. Rapport C/N et rapport H<sub>3</sub>/C

Dans aucun des deux groupes de sols on ne constate une quelconque relation entre le rapport H<sub>3</sub>/C et le rapport C/N (fig. 14).

Cela pourrait s'expliquer en partie dans les sols du premier groupe par la faible représentativité des acides humiques dits liés par l'intermédiaire du fer et de l'aluminium (H<sub>3</sub>) par rapport aux acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium.

Cette explication n'est plus valable dans le cas des sols du deuxième groupe où on ne décèle même pas une tendance de relation entre les rapports H<sub>3</sub>/C et C/N.

Cela pose le problème de la véritable signification de la fraction H<sub>3</sub> qui apparaît ici comme peu polymérisée à l'égard de la fraction H<sub>2</sub>.

#### 4.1.4. Rapport C/N et rapports $H_1/AF+AH$ , $H_1/C$ (fig. 15 et 16)

Dans les sols du premier groupe, on ne constate aucune relation entre le rapport C/N et les rapports  $H_1/AF+AH$  et  $H_1/C$ . Cela peut être attribuable à la faible représentativité des acides humiques libres ( $H_1$ ) à l'égard des acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium.

Par contre dans les sols du deuxième groupe on constate, pour les valeurs du rapport C/N supérieur à 7, une certaine proportionnalité entre le rapport C/N et les rapports  $H_1/AF+AH$  et  $H_1/C$ . Cela signifie que dans ces sols, les acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium ( $H_2$ ) ne sont pas plus polymérisés que les acides humiques libres. Cette conclusion, qui souligne la polymérisation relativement faible des acides humiques  $H_2$  dans ces sols, s'accorde avec le fait que ceux-ci soient moins polymérisés que dans les sols du premier groupe.

On pourrait cependant attribuer ce dernier fait à la forte représentativité des acides humiques  $H_2$  dans ces sols du premier groupe. Or l'ensemble  $H_1 + H_2$  présente dans les sols du deuxième groupe (si on considère les valeurs correspondant à des rapports C/N supérieurs à 10), une représentativité assez comparable à celle des acides humiques  $H_2$  dans ceux du premier groupe.

Cependant, on peut remarquer sur la figure 13 (13a et 13c), que la proportionnalité du rapport C/N avec le rapport  $H_2/C$  dans les sols du premier est mieux marquée que celle du rapport C/N avec le rapport  $H_2 + H_1/C$  dans les sols du deuxième groupe.

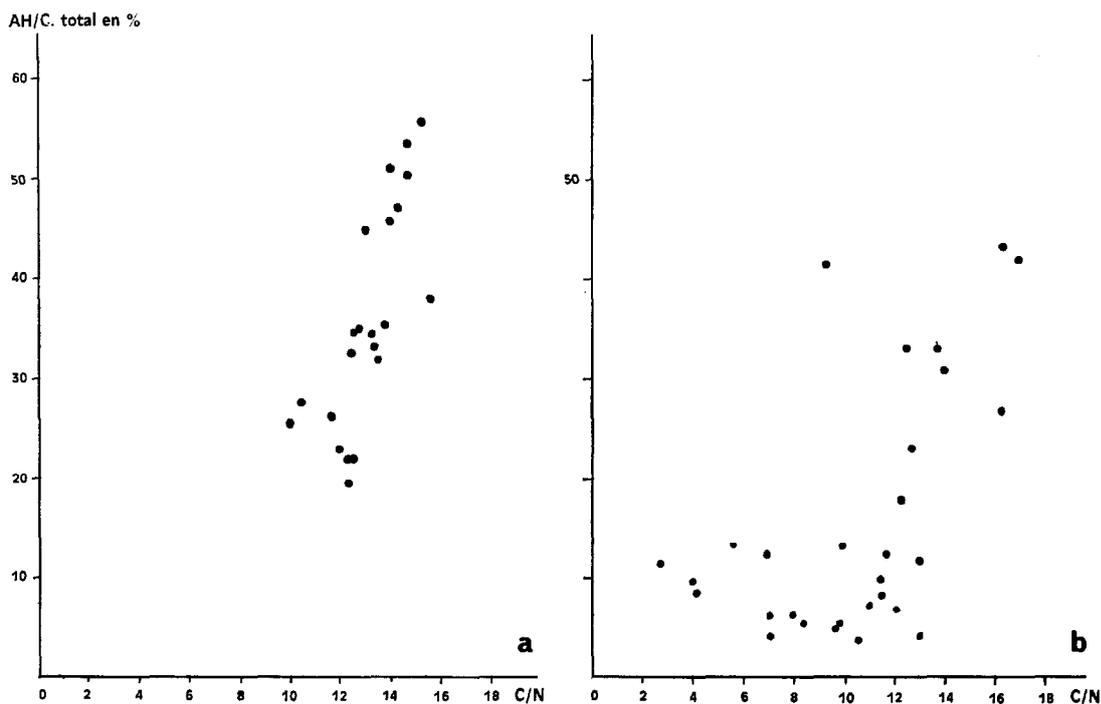


FIG. 11. — Acides humiques totaux/carbone total en fonction du rapport C/N.

a) sols du type brun à profils peu différenciés.

b) sols du type brun à profils bien différenciés et sols de type rouge.

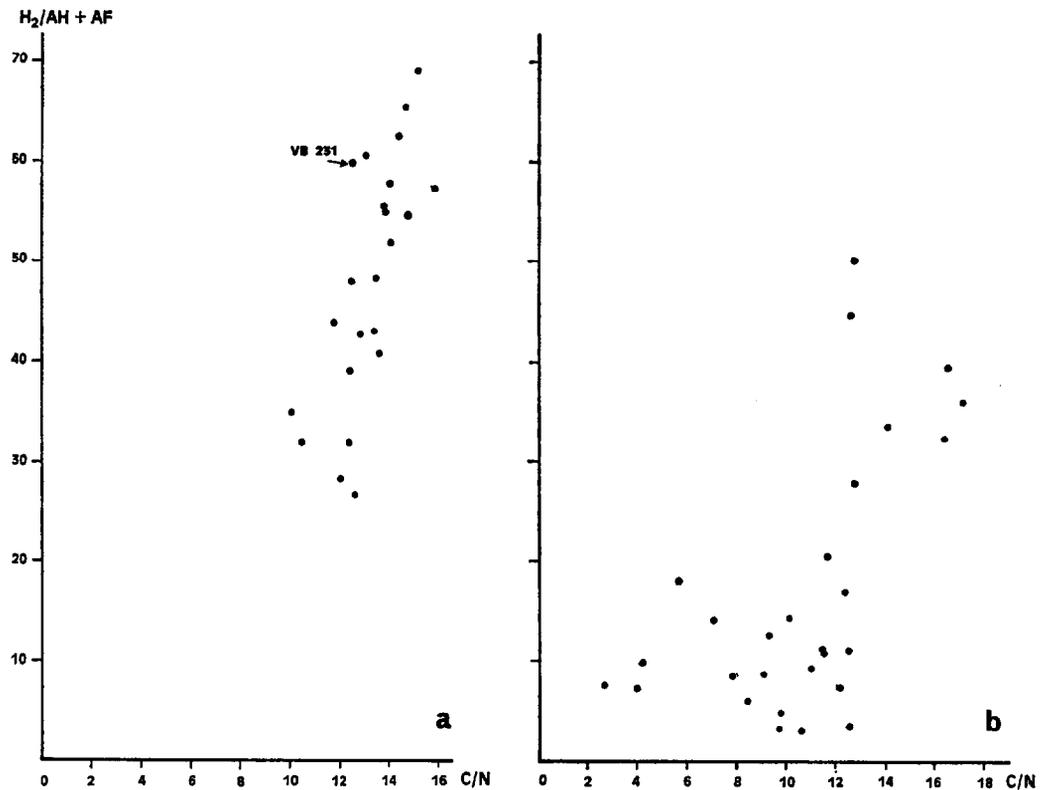


FIG. 12. — Rapport C/N et rapport  $H_2/AH + AF$ .

a) sols bruns à faible différenciation du profil.

b) sols bruns à profils bien différenciés et sols rouges.

Ce fait est donc bien dû à une polymérisation plus forte des acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium dans les sols du premier groupe.

#### 4.1.5. Rapport C/N et taux d'humification

La figure 17 montre que dans les deux groupes de sols étudiés, le rapport C/N est proportionnel au taux d'humification.

Ce phénomène paraît mieux marqué dans les sols du premier que dans ceux du deuxième groupe. Il est en rapport avec les relations qui lient le rapport C/N à la proportion des acides humiques totaux et à celle des différentes fractions d'acides humiques.

#### 4.1.6. Conclusion

Dans ces sols, le rapport C/N exprime bien un degré de décomposition de la matière organique mais ces deux valeurs sont proportionnelles au lieu d'être inversement proportionnelles comme on l'admet communément.

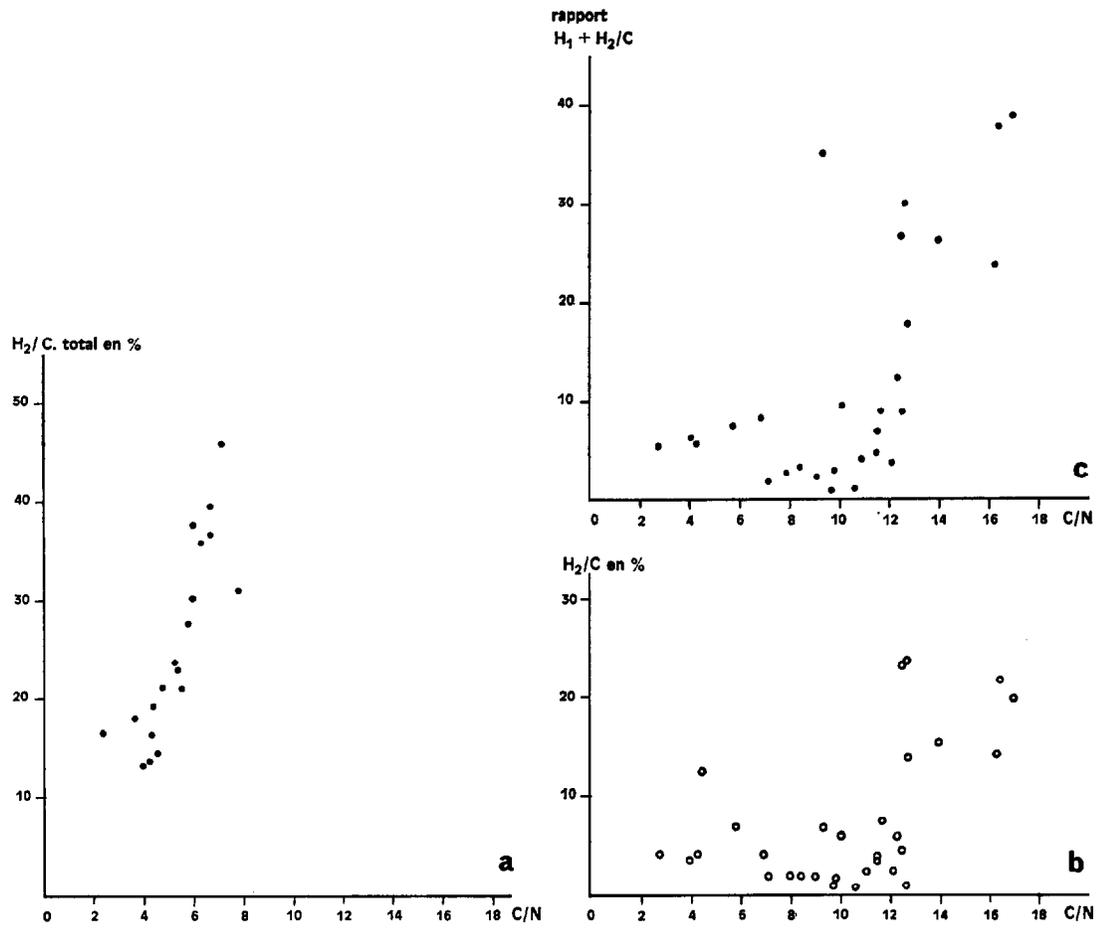


FIG. 13. — Rapport H 2/C et rapport C/N.

a) sols bruns à faible différenciation du profil.

b) et c) sols bruns à profils bien différenciés et sols rouges.

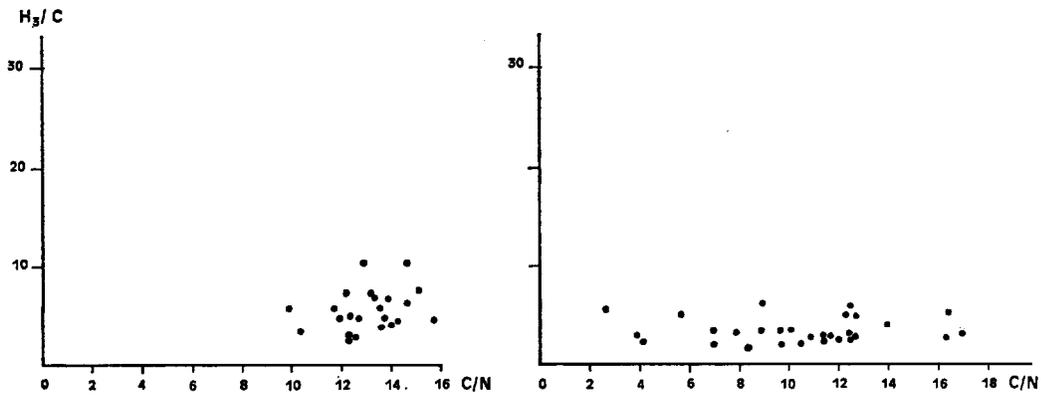


FIG. 14. — Rapport C/N et rapport H 3/C.

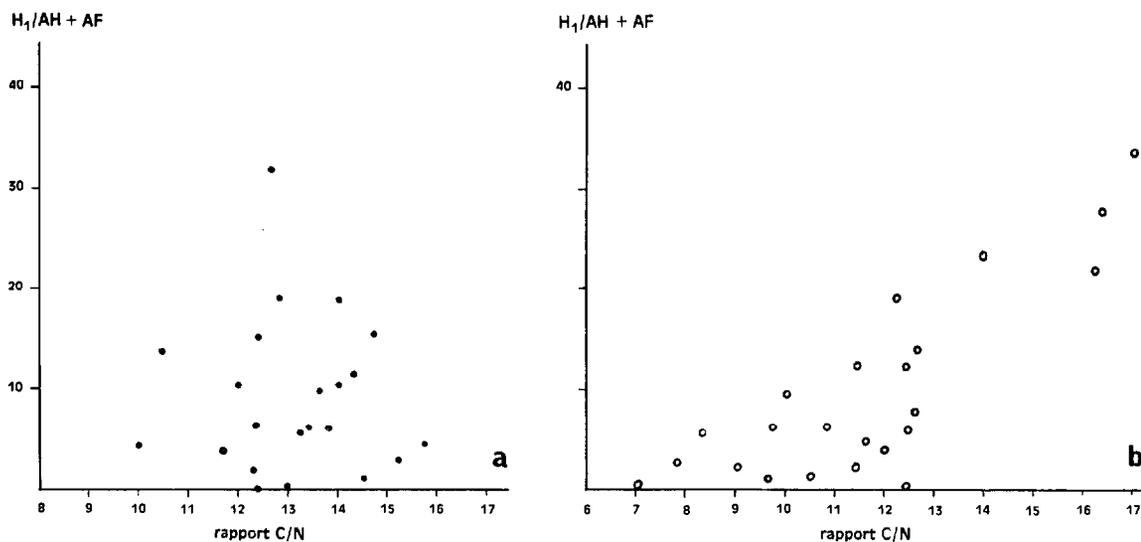


FIG. 15. — Rapport  $H_1/AH + AF$  et rapport C/N.

*a)* sols bruns à faible différenciation du profil.

*b)* sols bruns à profils bien différenciés et sols rouges.

Cependant, plus qu'un degré de décomposition de la matière organique, le rapport C/N indique, dans ces sols, le degré de polymérisation des différentes fractions d'acides humiques, avec lequel il est proportionnel.

Il faut donc être prudent dans l'interprétation du rapport C/N.

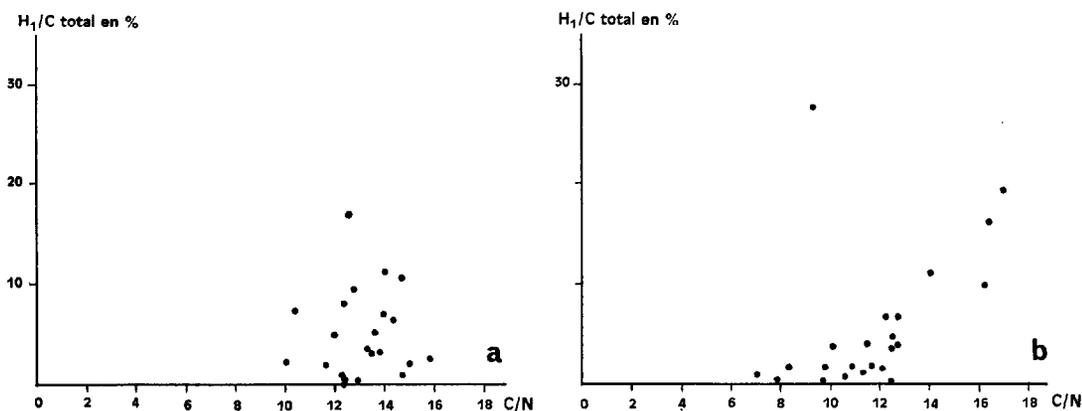


FIG. 16. — Rapport  $H_1/C$  et rapport C/N.

*a)* sols bruns à faible différenciation du profil.

*b)* sols bruns à profil bien différencié et sols rouges.

#### 4.2. RÉPARTITION DES DIFFÉRENTES FRACTIONS HUMIQUES DANS LES PROFILS : **Comparaison des différentes catégories de sols étudiés et caractéristiques morphologiques corrélatives.**

Les répartitions des différentes fractions humiques en fonction de la profondeur qui ont été exposées au chapitre IV sont résumées par les figures 4, 5, 6, 7, 8 et 9.

Toutes ces figures sont très parlantes parce qu'elles regroupent nettement d'un côté les sols du type brun à faible différenciation du profil et de l'autre les sols du type brun à profil bien différencié et les sols du type rouge.

Les sols du premier groupe sont caractérisés par :

- des taux d'humification élevés,
- de fortes proportions d'acides humiques par rapport à l'humus total,
- de fortes proportions d'acides humiques liés au calcium par rapport à l'humus total et aux acides humiques totaux.

Ces valeurs décroissent progressivement en profondeur et restent élevées sur une grande épaisseur de sol ou même jusqu'à la base du profil comme c'est le cas dans les profils typiques (VS 26, V 78, V 46).

La faible différenciation de couleur est donc corrélative d'un « profil humique » à faible différenciation.

A l'encontre des sols du premier groupe, ceux du deuxième groupe sont caractérisés par :

a) *des rapports AH/AH + AF* (acides humiques/humus total) élevés en surface où ils ne sont cependant pas significativement différents de ceux des profils du premier groupe, mais décroissent très rapidement en profondeur, le plus souvent dès l'horizon  $A_{11}$ , parfois seulement après le  $A_{12}$  (fig. 4).

La prédominance des acides humiques sur les acides fulviques, constante le long des profils du premier groupe, ne se maintient ici que dans l'horizon de surface, c'est-à-dire sur une profondeur de 10 à 20 cm environ.

A partir de 20 à 25 cm de profondeur, on observe une nette prédominance des acides fulviques qui se maintient ensuite dans le reste du profil sans grandes variations.

b) *des rapports  $H_2/AH + AF$*  (acides humiques liés au calcium/humus total)

— soit moyens dès la surface (30 à 50 %) et inférieurs à ceux de la grosse majorité des sols du premier groupe. Ils s'abaissent brusquement dès une profondeur de 25 cm environ, à des valeurs faibles (8 à 20 %) qui décroissent progressivement ou se maintiennent dans le reste du profil (fig. 6).

— soit faibles dès la surface (13 à 17 %) et décroissant très progressivement avec la profondeur. Ce dernier cas caractérise le sol du type rouge à profil peu différencié.

c) *des rapports acides humiques liés au calcium/acides humiques totaux* (fig. 5) présentant des valeurs élevées en surface (horizon  $A_{11}$ ) tout en restant inférieures à celui des sols du premier groupe.

Le rapport  $H_2/AH$ , de l'ordre de 50 % en  $A_{11}$  s'élève dans les horizons  $A_{12}$  où il est du même ordre que dans les sols du premier groupe. Mais, il s'abaisse brusquement à partir d'une profondeur de 20 à 25 cm à des valeurs moyennes et faibles (30 à 45 %) qui s'améliorent ou décroissent en profondeur selon les profils.

d) *des rapports acides humiques dits liés au fer et à l'alumine/acides humiques totaux*,  $H_3/AH$ , plus élevés dans l'ensemble que pour les sols du premier groupe (fig. 7b). Mais certains de ces derniers se comportent à cet égard comme ceux du deuxième groupe.

e) *des rapports  $H_1/AH$*  (acides humiques libres/acides humiques totaux ; fig. 7a) nettement plus élevés en surface que dans les sols du premier groupe.

Ces valeurs s'abaissent brusquement dans les horizons  $A_{1,2}$  où elles sont tantôt égales, tantôt supérieures à celles des sols du premier groupe.

A partir de l'horizon  $A_{1,2}$ , on observe ensuite, dans la plupart des profils une augmentation plus ou moins forte de ces valeurs, puis à nouveau une diminution à partir d'une certaine profondeur. Cependant, pour la plupart des profils, le rapport  $H_1/AH$  reste nettement plus élevé que dans les sols du premier groupe bien que certains profils typiques tels le K 88 se comportent comme ces derniers.

En ce qui concerne donc les proportions de  $H_3$  (acides humiques dits liés au fer et à l'aluminium) et de  $H_1$  (acides humiques libres), les deux groupes de sols ne se différencient pas aussi nettement que pour les autres caractéristiques énumérées ci-dessus.

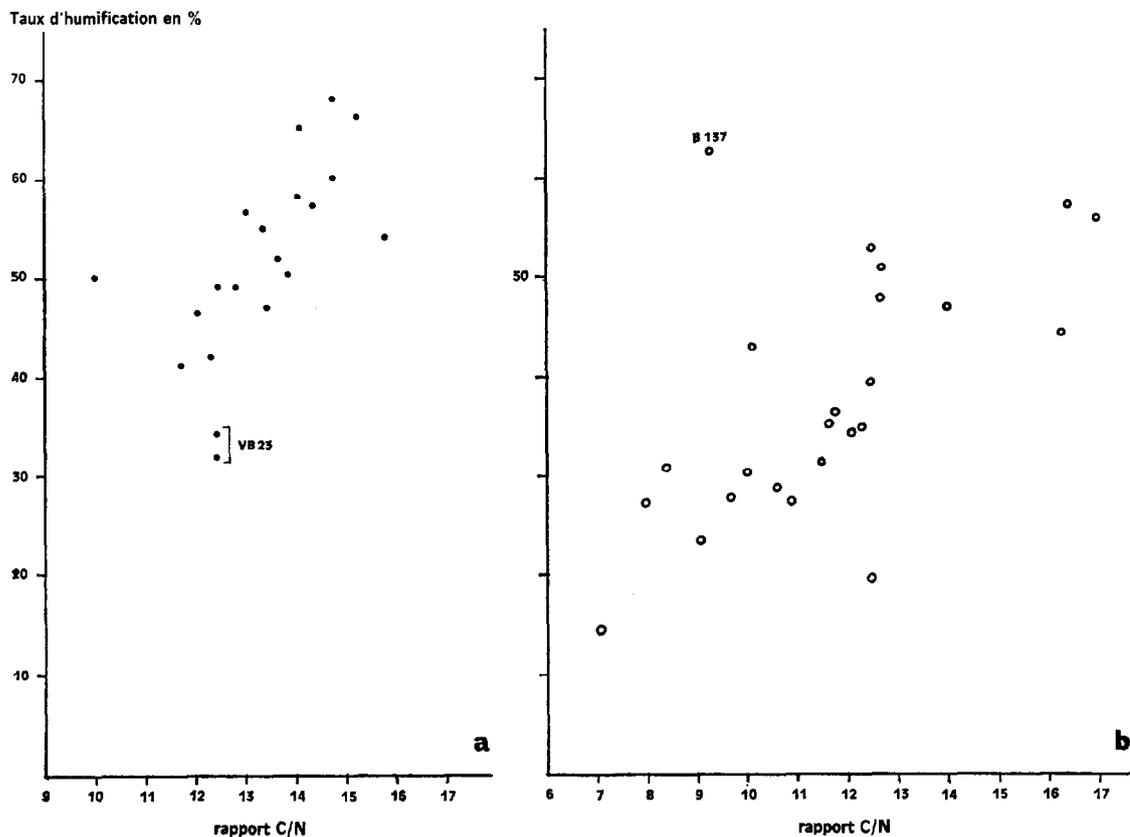


FIG. 17. — Taux d'humification et rapport C/N.

a) sols du type brun à faible différenciation du profil.

b) sols du type brun bien différenciés et sols du type rouge.

Les fortes proportions d'acides humiques liés au calcium sont corrélatives d'un fort pouvoir colorant (couleur brune ou brun-rouge foncé), les faibles proportions d'un faible pouvoir colorant qui masque mal la couleur propre du sol.

Les acides humiques liés au calcium se forment mal dans les sols de type brun à profil bien différencié et dans les sols de type rouge.

En conclusion, c'est la proportion des acides humiques liés au calcium et leur répartition le long du profil qui est liée à la différenciation de couleur de ces sols.

Si la notion de mull dans des sols dits eutrophes et bruns doit inclure une notion de « brunification », on voit que cette dernière caractéristique est proportionnelle aux teneurs en acides humiques  $H_2$  (liés par l'intermédiaire du calcium), et que les sols du premier groupe répondent bien au concept de sols brunifiés à mull, alors que les sols du deuxième groupe ne répondent pas à ce concept.

#### 4.3. PRINCIPAUX FACTEURS DE FORMATION DES ACIDES HUMIQUES LIÉS AU CALCIUM

Ce sont : l'abondance des ions  $Ca^{++}$  et la saturation du complexe absorbant, la nature minéralogique et la capacité d'échange des argiles, la richesse en fer effectivement libre c'est-à-dire individualisé.

##### 4.3.1. Abondance des ions $Ca^{++}$ et taux de saturation

Concernant la formation des acides humiques liés au calcium, le premier facteur qui vient à l'esprit est évidemment l'abondance des ions  $Ca^{++}$ .

SINGH (1956) rapporte que la couleur noire des sols a été attribuée par de nombreux auteurs à la saturation en bases de l'humus. Il cite VAN DER MERWE (1935), DESAI (1942), et HALLSWORTH (1952).

SINGH lui même, opérant par expérimentation sur des argiles extraites des sols noirs (vertisols) et des extraits aqueux de litière fermentée, a trouvé que la couleur noire du complexe argilo-humique obtenu a une intensité qui dépend de la nature du cation qui sature l'argile, et croît dans l'ordre  $H < Ca < Mg < Na$ .

Ce ne serait donc pas le calcium seul qui interviendrait dans ce mécanisme, mais plutôt la saturation en bases.

A cet égard, il n'existe pas de différences entre les sols des différents types morphologiques étudiés : le complexe absorbant est toujours saturé (ou très proche de la saturation), essentiellement à base de calcium et de magnésium, avec des rapports  $Ca/Mg$  non significativement différents.

L'abondance des ions  $Ca^{++}$  et la saturation du complexe absorbant ne sont donc pas les facteurs déterminants de la différenciation des divers types morphologiques de sols bruns eutrophes.

##### 4.3.2. La nature minéralogique des argiles, la capacité d'échange des argiles

La formation de complexes argilo-organiques est plus prononcée pour les argiles du groupe montmorillonite, et négligeable pour les kaolinites (GRIM, 1953, cité par d'HOORE, 1955).

SINGH (1956) aboutit à des conclusions identiques. Il trouve que la nature minéralogique de l'argile est un facteur important de la formation de la couleur foncée et que la coloration est d'autant plus foncée que la capacité d'échange est élevée.

TABLEAU 3

*Composition minéralogique de la fraction argileuse des sols bruns eutrophiés*  
(Laboratoire de Géologie et de Paléontologie de l'Université de Strasbourg)

Profils	Prélèvements	Montmorillonite	Illite	Kaolinite	Feuillets gonflants (G)	Talc	Chlorite
VS 26	VS 261	40	10	50			
	262	40	10	50			
	263	40	10	50			
	264	40	10	50			
V 78	V 782	20	20	60			
	783	20	20	60			
	784	20	20	60			
	785	20	10	70			
VL 24	VL 242			50	50		
V 64	V 641	40	10	50	traces		
	642	30		50	20		
	643	30		50	20		
VB 23	VB 232	100		traces			
VS 60	VS 602	40	10	50			
V 72	V 721	30	20	50			
	722	20		80			
V 46	V 461	20	10	50			20
	462	30	10	40			20
	463	30	10	40			20
V 47	V 471	40 (G)	10	50			
	472	40 (G)	10	50			
	473		30	70			
VMK 23	VMK 231	30	traces	60			10
	232	30	traces	60			10
	233	20	traces	70			10
VRZ 31	VRZ 311			80	20		
	312			80	20		
	313			80	20		
K 88	K 881	60		40	Kaolinite désordonnée		
	883	60		40			
	885	60		40			
K 80	K 801	50	traces	50	très mal cristallisée		
	804	40	traces	60			
	807	50		50			
	809	50	traces	50			
B 137	B 1371			100	Métahalloysite ou kaolinite mal cristallisée		
	1373			100			
	1375						

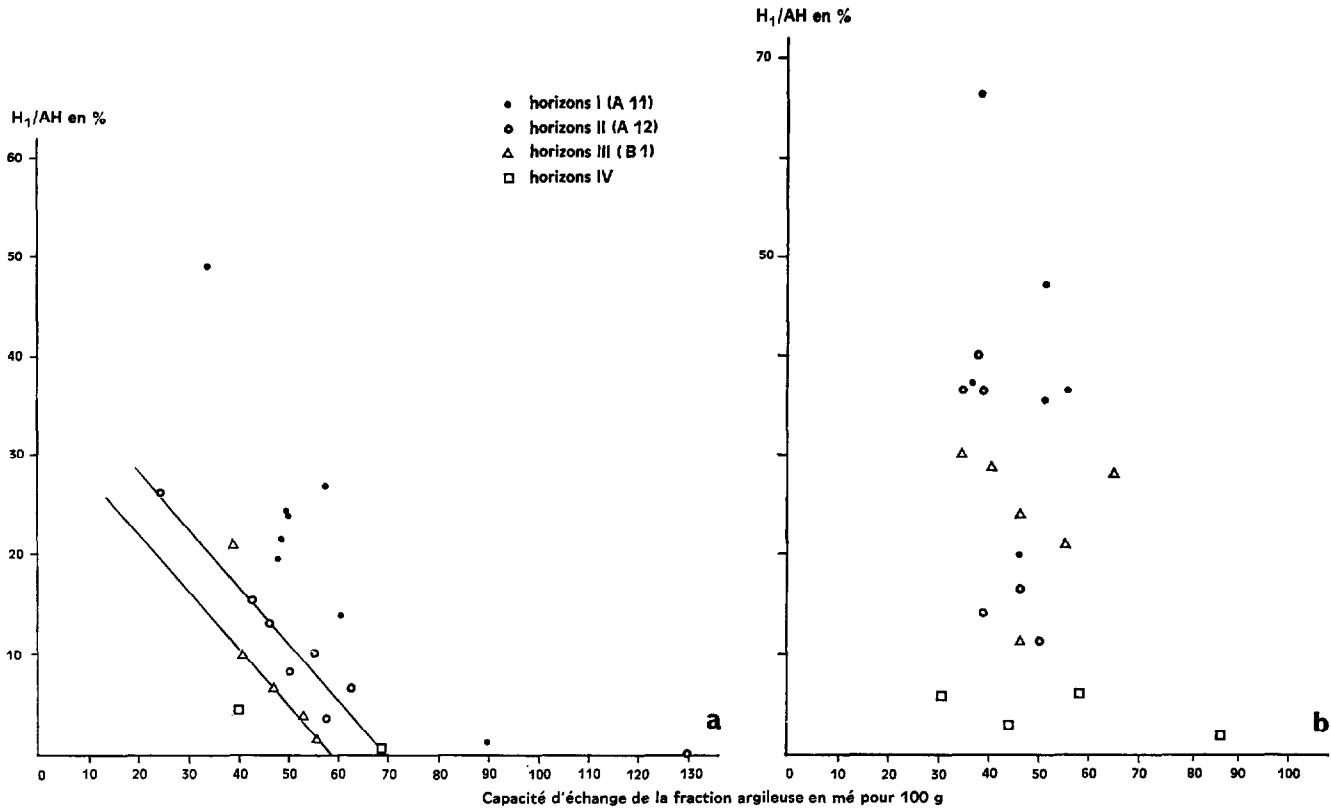


FIG. 18. — Acides humiques libres/Acides humiques totaux en fonction de la capacité d'échange des argiles.

a) sols du type brun à profil peu différencié.

b) sols du type brun à profil bien différencié et sols du type rouge.

Le tableau n° 3 donne la composition minéralogique de la fraction argileuse des différents échantillons de sols bruns eutrophes étudiés.

On y remarque que les profils K 80 et K 88 qui sont les plus typiques des sols de type rouge sont aussi les plus riches en montmorillonite parmi tous les sols bruns eutrophes étudiés, tandis que le profil V 78 qui est le type des sols à faible différenciation du profil est parmi les plus pauvres en montmorillonite si l'on excepte le profil B 137.

La composition minéralogique de la fraction argileuse n'est donc pas le facteur déterminant de la différenciation de ces sols en sols de type brun à faible différenciation du profil et en sols de type brun à profil bien différencié et sols de type rouge.

Mais à l'intérieur de chacun de ces deux groupes de sols, nous avons essayé de voir le rôle de la composition minéralogique des argiles sur la formation des acides humiques liés à la matière minérale ( $H_2$ ), par le biais de la capacité d'échange de la fraction argileuse.

Il s'agit de la capacité d'échange calculée en attribuant à la fraction argileuse la capacité d'échange de la terre fine diminuée de celle de la matière organique estimée forfaitairement à 200 mé pour 100 g. Il s'agit donc d'une grandeur approximative destinée uniquement à des comparaisons.

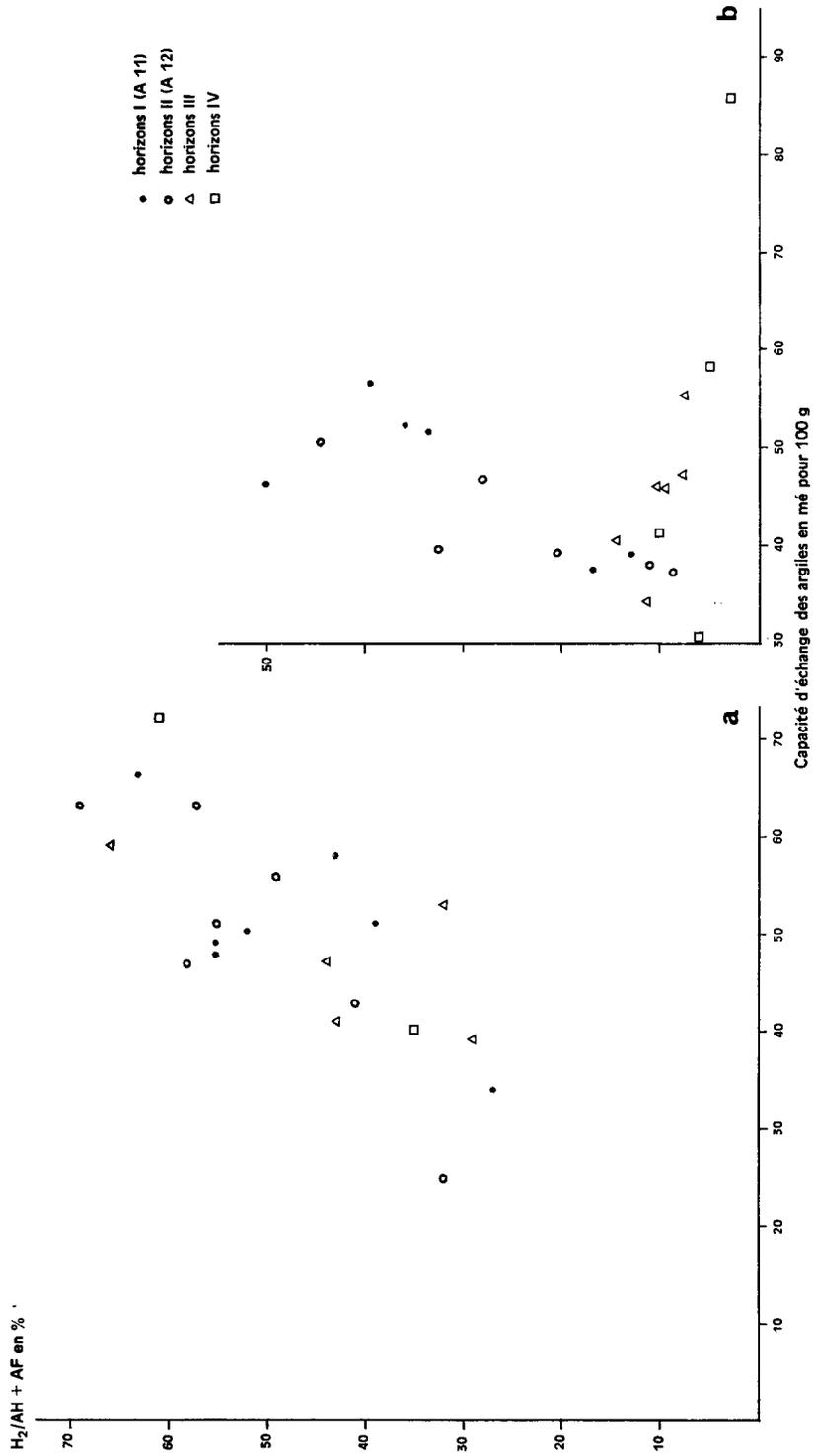


FIG. 19. — Rapport acides humiques liés au calcium/humus total en fonction de la capacité d'échange des argiles.

a) sols du type brun à profil peu différencié.

b) sols du type brun à profil bien différencié et sols du type rouge.

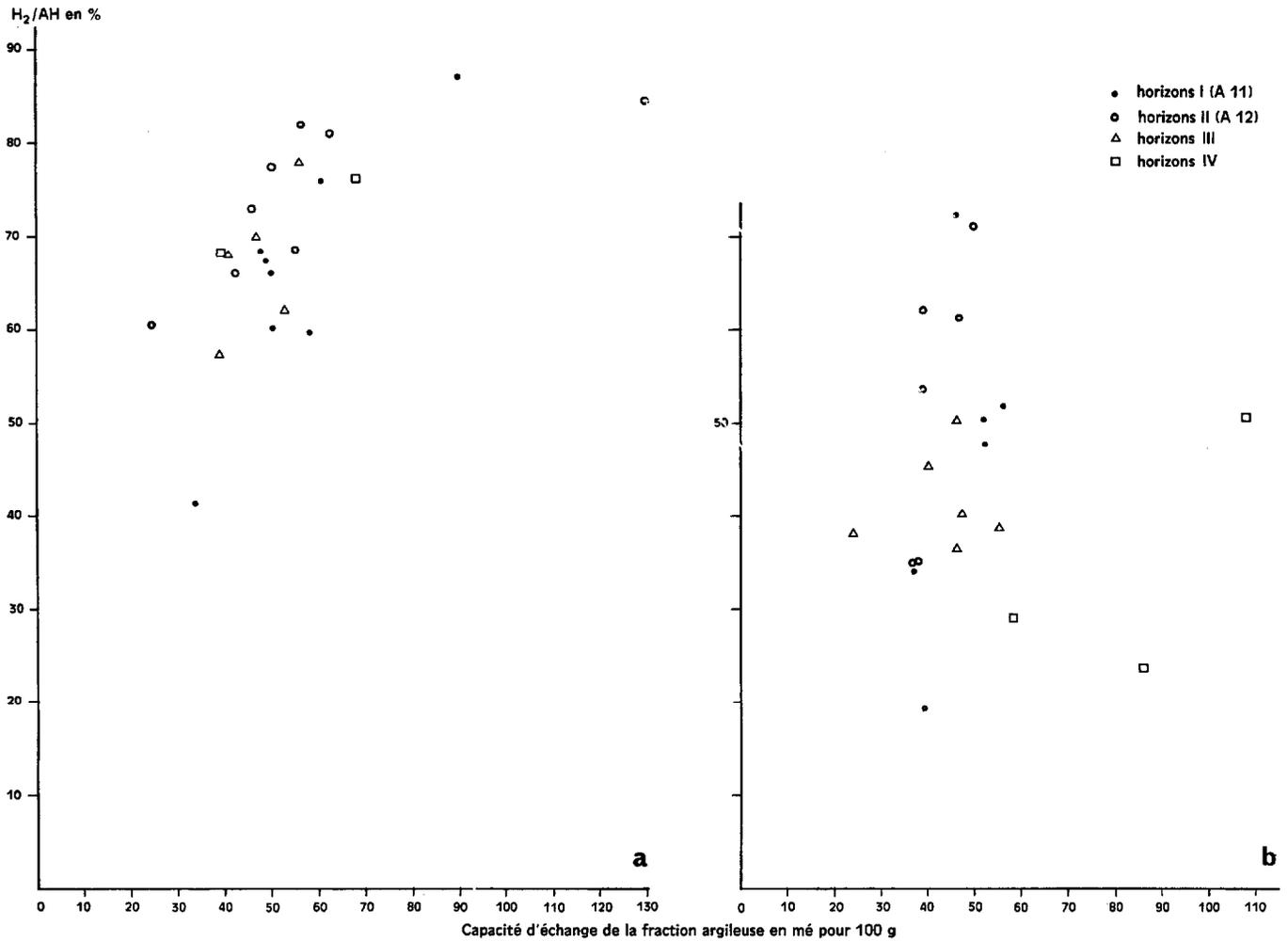


FIG. 20. — Acides humiques liés au calcium/acides humiques totaux en fonction de la capacité d'échange des argiles.

a) sols du type brun à profil peu différencié.

b) sols du type brun à profil bien différencié et sols du type rouge.

Pour cela nous avons représenté graphiquement les relations des rapports  $H_1/AH$  (proportion des acides humiques libres par rapport aux acides humiques totaux ; fig. 18),  $H_2/AH$  et  $H_2/AH + AF$  (fig. 19 et 20) avec la capacité d'échange de la fraction argileuse.

#### a) Acides humiques libres et capacité d'échange des argiles

Dans les sols bruns à faible différenciation du profil (sols du premier groupe), la figure 18a montre que la proportion d'acides humiques libres par rapport aux acides humiques totaux est inversement proportionnelle à la capacité d'échange des argiles et diminue rapidement avec elle.

Ce phénomène disparaît en surface où nous avons signalé que les conditions de la polymérisation des acides humiques semblent moins bonnes.

Dans les sols du deuxième groupe (fig. 18b) on ne constate aucune relation entre proportion d'acides humiques libres et capacité d'échange des argiles dans les différents horizons.

#### b) Acides humiques liés par l'intermédiaire du calcium ( $H_2$ ) et capacité d'échange des argiles

Dans les sols du premier groupe, on constate que les rapports  $H_2/AH$  et  $H_2/AH + AF$  sont proportionnels à la capacité d'échange des argiles (si on considère l'ensemble des échantillons représentant ces sols), et augmentent assez rapidement avec elle (fig. 19a et 20a).

Dans les sols du deuxième groupe, il n'y a aucune relation entre  $H_2/AH$  et capacité d'échange des argiles (fig. 20b). En ce qui concerne le rapport  $H_2/AH + AF$ , il ne marque de relation sensible avec la capacité d'échange des argiles que dans les troisième et quatrième horizons de ces sols où il semble inversement proportionnel à la capacité d'échange des argiles (fig. 19b).

En conclusion on retrouve, dans les sols du premier groupe (sols bruns à faible différenciation du profil), les conclusions de SINGH (1956). Les acides humiques sont d'autant plus polymérisés dans ces sols que la capacité d'échange est élevée.

Mais ce phénomène n'existe pas dans les sols du deuxième groupe où la polymérisation des acides humiques est faible.

Si la formation du complexe argilo-humique fait intervenir des phénomènes d'échange, il faut admettre que ceux-ci se font mal entre acides humiques et argiles dans les sols du deuxième groupe.

### 4.3.3. La richesse en fer individualisé (sous formes d'ions ou d'oxydes et hydroxydes libres)

#### *Données bibliographiques*

SÉGALEN (1964) a fait une revue des types de liaisons argile-humus dans le complexe argilo-humique. Selon les différents auteurs qui ont étudié ce problème, les liaisons argile-humus se feraient, pour les uns par l'intermédiaire de ponts métalliques, pour les autres par ponts hydrogène et forces de Van der Waals.

Parmi les auteurs partisans de la liaison par ponts métalliques, nombreux accordent un rôle important au fer : D'HOORE (1949), SEN (1961), WALLACE et LUNT (1957), LUNT, HÉMAIDAN et WALLACE (1954), DA SILVA (1961), BEUTELSPACHER (1955) cités par SÉGALEN (1964). BEUTELSPACHER estime même que l'humus ne peut se fixer sur l'argile sans le fer.

SINGH (1956), opérant sur des argiles d'origines diverses et des extraits aqueux de litière fermentée, trouve qu'une quantité appréciable de calcium se trouve étroitement associée au complexe argilo-humique, et que l'absorption de matière organique par l'argile s'accompagne aussi d'une absorption de fer, de manganèse, de potassium, de sodium et de magnésium. Il souligne cependant que cela ne suffit pas pour associer ces phénomènes d'absorption à la formation de couleur noire. Mais il note qu'en ce qui concerne le manganèse, et dans une moindre mesure le fer, les quantités absorbées sont assez étroitement liées à celles de la matière organique et à la formation de couleur noire.

Opérant la fixation de matière organique sur des argiles homoioniques, il trouve que l'intensité de la coloration et la quantité de matière organique absorbée croissent dans l'ordre  $H < Ca < Mg < Na$ .

De nombreux cations dont le fer (avec cependant une importance moindre de ce dernier), sont donc associés à la formation du complexe argilo-humique.

Mais le résultat fondamental des expériences de SINGH, et qui nous intéresse au premier plan, est que « la présence d'oxydes de fer finement divisés dans l'argile, ou de composés du fer dans les extraits aqueux de litière fermentée, inhibe la formation de couleur foncée, mais pas l'absorption de matière orga-

nique ». Il pense que cela est dû à une modification dans le mode de fixation de la matière organique par l'argile. Mais il ne précise pas, de façon explicite, si ce phénomène est dû à l'action spécifique des oxydes de fer ou à celle des complexes matière organique-fer.

A cet égard, les expériences de ALEXANDROVA et NAD (1958), rapportées par SÉGALEN (1964), peuvent apporter une précision.

Ces auteurs mettent en présence un humate de fer et une argile de Tchernozem homoïonique Ca ou Na. Ils trouvent que :

— la capacité d'échange de l'humus et celle de l'argile sont parfaitement additives, ce qui ne devrait pas être le cas s'il y avait réaction entre l'humus et l'argile ;

— l'isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau est abaissée, ce qui confirmerait qu'il y a réduction de la surface spécifique.

Ces auteurs, qui contestent l'existence de ponts métalliques et conçoivent des liaisons argile-humus par des forces de Van der Waals ou par des ponts hydrogènes démontrent ainsi qu'il n'y a pas eu combinaison au sens chimique, entre l'humate de fer et l'argile de Tchernozem, mais simple addition et mélange.

Or, dans le complexe argilo-humique de couleur très foncée qu'il obtient avec l'argile de sol noir, SINGH (1956) trouve que l'absorption de la matière organique bien qu'élévée, n'a pas contribué à augmenter la capacité d'échange. Des résultats identiques ont été trouvés par DEMOLON et BARBIER (1929), MATTSON (1921), MYERS (1937) cités par MARSHALL (1964).

Selon MARSHALL, cette diminution de capacité d'échange suggérerait une condensation ou une polymérisation des molécules organiques fortement adsorbées sur la surface des particules minérales qui servent en quelque sorte de catalyseurs des réactions de polymérisation. Ceci est à rapprocher du fait que le rapport C/N de la matière organique du sol augmente avec la proportion d'acides humiques liés au calcium.

Il semble donc que le processus de fixation de l'humate de fer sur l'argile de Tchernozem soit différent de celui de la fixation de la matière organique sur l'argile dans les complexes argilo-humiques de couleur foncée.

Cependant DUCHAUFOUR (1963) pense que le fer complexé par les acides humiques jouerait un rôle important dans la formation des agrégats argilo-humiques. Grâce à l'électrophorèse sur papier, il sépare acides humiques bruns pauvres en fer et montrant une forte migration vers l'anode, et acides humiques gris, riches en fer, montrant une très faible migration électrophorétique. Il attribue cette faible mobilité électrophorétique à l'augmentation du degré de polymérisation et la relie à une stabilité plus grande des complexes argilo-humiques formés.

Mais JUSTE et DELAS (1967), étudiant l'influence d'addition de divers métaux (Al, Fe, Ca, Mg et Cu) sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique donné, trouvent que ces caractères sont étroitement dépendants de la nature du cation associé à ce composé. Ainsi leurs expériences montrent les limites de l'électrophorèse en tant que technique de caractérisation des composés humiques qui ne ferait intervenir que la dimension des polymères.

Dans ces expériences, alors qu'à pH 1, la présence des métaux modifie peu la mobilité électrophorétique des acides humiques, à pH 7 il y a une diminution très importante de cette dernière, notamment pour l'aluminium, le fer et le cuivre qui s'avèrent comme les agents d'immobilisation les plus efficaces, alors que le calcium affecte peu cette mobilité électrophorétique.

Par ailleurs le potentiel électrocinétique des colloïdes, proportionnel à la mobilité électrophorétique, joue un rôle important dans les phénomènes d'échange.

Pour JENNY et REITEMEIR (1935 cité par BAVER 1959) l'échange ionique augmente environ comme la puissance 6 du potentiel zéta (potentiel électrocinétique). Ce dernier est inversement proportionnel à

la taille de l'ion adsorbé pour des ions de même valence, et plus faible pour les divalents que pour les monovalents.

Les rayons des ions hydratés des principaux métaux sont (Mlle SUTRA, 1946 cité par MILLOT 1964) dans l'ordre décroissant :

Al	= 4,57
Fe <sup>3+</sup>	= 4,02
Mg	= 3,45
Fe <sup>2+</sup>	= 3,42
Mn <sup>2+</sup>	= 3,42
Ca	= 3,07
Na	= 1,83
K	= 1,24 (ion antistoke ne s'hydratant pas).

D'autre part, le potentiel zéta est proportionnel à la charge par unité de surface, il augmente avec la capacité d'échange (BAVER 1959). Il est donc plus élevé pour une montmorillonite que pour une kaolinite.

Si la formation du complexe argilo-humique fait intervenir des phénomènes d'échange ionique, on comprend mieux dès lors le rôle de la capacité d'échange et des différents cations échangeables.

Il faut signaler cependant que MORTENSEN (1962), opérant la fixation d'un polyacrylonitrile hydrolysé sur la kaolinite trouve au contraire que l'adsorption de ce dernier par la kaolinite dépend du cation échangeable associé à celle-ci, et que l'ordre d'efficacité de ces cations sur l'adsorption du polyacrylonitrile est le même que pour leur effet sur l'abaissement du potentiel zéta de la kaolinite. Mais cette expérience a été réalisée avec du polyacrylate de sodium. L'auteur affirme que les ions Na du polyacrylate déplacent les cations échangeables de l'argile et l'adsorption de polyacrylate se traduirait par une augmentation du potentiel zéta de l'argile. Et l'auteur attribue la diminution des phénomènes d'échange à cette augmentation du potentiel zéta.

Mais le rôle du fer dans la formation du complexe argilo-humique peut être dû aussi à l'action des oxydes du fer sur les surfaces des argiles. Dans les expériences citées ci-dessus, MORTENSEN trouve une augmentation de l'adsorption de polyacrylonitrile hydrolysé par la kaolinite en présence de dithionite de sodium. Il attribue ce résultat à la dissolution par le dithionite de la couche amorphe de Beilby entourant les particules d'argiles.

En conclusion, le fer paraît jouer un rôle négatif dans la formation des complexes argilo-humiques de couleur foncée tant par l'action des oxydes et hydroxydes finement divisés que par celle des complexes matière organique-fer.

Ce rôle négatif du fer semble donc pouvoir rendre compte de la différence observée entre les sols de type brun à faible différenciation du profil et les sols de type rouge. Mais cette action est difficile à mettre en évidence à cause des difficultés de détermination du fer effectivement libre.

#### 4.4. ROLE DU FER DANS LA DIFFÉRENCIATION DES SOLS BRUNS EUTROPHES

Le tableau 4 donne les teneurs en fer libre méthode D'HOORE des sols étudiés. On peut y constater que les sols du type rouge sont dans l'ensemble plus riches en fer libre que les sols du type brun à faible différenciation du profil, mais ces derniers ne le sont pas moins que les sols de type brun à profil bien différencié (profils V 47 et VMK 23). Par ailleurs, certains profils du deuxième groupe de sols (les profils V 46 et VS 60) ont des teneurs en fer équivalentes à celles des sols du premier groupe (sols de type rouge).

TABLEAU 4  
Fer libre d'Hoore

Profils	Echantillons	Profondeur (cm)	Fer libre Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (‰)	Profils	Echantillons	Profondeur (cm)	Fer libre Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (‰)	
Sols du type brun à faible différenciation du profil				Sols du type rouge				
VS 26	VS	261	0- 10	VRZ 31	VRZ 311	0- 14	114	
		262	10- 39			312	19- 40	120
		263	39- 70			313	40- 70	104
		264	90-136					
V 78	V	782	10- 34	K 88	K	881	0- 10	83
		783	34- 80			882	10- 25	123
		784	101-130			883	25- 40	131
		785	130-162			884	40- 60	124
V 46	V	461	0- 26	K 80	K	885	60- 80	—
		462	28- 58			886	100-120	104
		463	73- 93			801	0- 7	84
V 64	V	641	0- 20	802	7- 20	99		
		642	25- 45	803	20- 35	119		
		643	47- 68	804	35- 50	119		
VL 24	VL	241	0- 30	805	50- 70	111		
		242	40- 57	806	70- 90	95		
		243	60- 80	807	90-110	67		
VS 60	VS	601	0- 14	808	110-140	64		
		602	14- 30	809	140-160	60		
V 72	V	721	0- 20					
		722	20- 58					
Sols du type brun à profil bien différencié								
VMK 23	VMK	231	0- 10	VMK 23	VMK	231	0- 10	49
		232	10- 25			232	10- 25	58
		233	32- 50			233	32- 50	76
		234	50- 73			234	50- 73	gravillonnaire
V 47	V	471	0- 26	V 47	V	471	0- 26	73
		472	26- 48			472	26- 48	64
		473	48- 90			473	48- 90	78

Mais, dans le profil V 46, l'examen de la fraction sableuse montre qu'elle contient environ 12 % de magnétite par rapport à la terre fine (pourcentage déterminé par tri à l'aimant). Les grains de magnétite sont triables dans la terre fine sans traitement. Il s'agit donc ici d'oxydes de fer hérités de la roche mère, sans liaisons avec les argiles et qui n'interviennent donc pas pour modifier les réactions physico-chimiques dans le complexe argilo-humique. Dans le profil VS 60 qui contient comme le V 46 beaucoup de magnétite, l'analyse aux RX des argiles (tableau 6) montre qu'elles ne contiennent pas de magnétite.

TABLEAU 5

*Capacité d'échange T avant et après extraction du fer libre d'Hoore*  
(Déterminations effectuées par P. RETY, Chimiste au Laboratoire des Sols du Centre ORSTOM de Dakar)

Echantillons	T avant extraction du fer libre	T après extraction du fer libre	$\Delta T$ (%)	$\Delta T - T_M$	$\frac{\Delta T - T_M}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ libre}}$
K 88-2 Sol du type rouge .....	38,2	26,3	31,0	23,8	1,9
VMK 233 Sol de type brun bien différencié ..	16,7	12,2	26,8	22,3	3,7
V 462 Sol de type brun à faible différen- ciation .....	15,8	8,4	46,6	44,5	4,7
V 783 Sol de type brun à faible différen- ciation .....	20,1	11,9	40,6	36,6	6,4
V 742 Vertisol .....	30,2	19,0	37,1	36,4	6,0

$T_M$  : capacité d'échange due à la matière organique estimée forfaitairement à 200 méq/100 g ; la matière organique est détruite lors de l'extraction du fer libre ;

$\Delta T$  : diminution totale de la capacité d'échange lors de l'extraction du fer libre (exprimé en pourcentage de T) ;

$\Delta T - T_M$  : diminution de capacité d'échange des argiles consécutive à l'extraction de fer libre.

Or, les méthodes d'extraction du fer libre par l'hydrogène naissant (méthodes Jeffries, d'Hoore...) solubilisent très bien la magnétite.

Dans un essai comparatif sur la solubilité des différentes formes de fer par la méthode Jeffries, WILLIAM (1950) opérant sur des échantillons passés au tamis 70, trouve que 91,9 % de la magnétite d'un échantillon qui en contient 93,4 % sont dissous, alors que seulement 66,7 % de l'hématite d'un échantillon qui en contient 84,2 %, et 18,3 % de la goethite d'un échantillon qu'en contient 86 %, sont dissous.

Le fer libre d'Hoore rend donc mal compte des différences entre les divers types morphologiques de sols bruns eutrophes.

L'individualisation apparente du fer dans les sols de type rouge (et dont témoigne la couleur), l'absence de ségrégation ferrugineuse dans les sols de type brun à faible différenciation du profil, malgré de mauvaises conditions de drainage interne et souvent externe, des rapports fer libre/fer total et des quantités de fer assez élevées, laisse supposer que le fer serait effectivement en grande partie sous forme libre dans les sols de type rouge, mais pas dans le deuxième type de sols où il serait principalement intégré dans le réseau des argiles (KALOGA 1967).

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons déterminé les baisses de capacité d'échange consécutives à l'extraction du fer libre d'Hoore sur un échantillon de chacun des types morphologiques de sols bruns eutrophes et sur un échantillon de vertisol.

Le degré d'intégration du fer dans le réseau étant censé être mesuré par le taux de diminution de la capacité d'échange, on constate (tableau 5) que ce dernier est nettement plus faible dans le sol de type rouge et brun à profil bien différencié que dans le sol de type brun à faible différenciation du profil et dans le vertisol.

Comme le sol de type rouge (60 % de montmorillonite) est beaucoup plus riche en montmorillonite que le sol brun à faible différenciation du profil (20 % de montmorillonite), on peut en déduire que l'extraction du fer libre ne détruit qu'un type de montmorillonite, en l'occurrence les montmorillonites ferrifères. D'autre part, parmi les deux sols de type brun à faible différenciation du profil, celui qui accuse la plus forte baisse de capacité d'échange est aussi le plus riche en montmorillonite (30 % contre 20 %), mais l'échantillon de sol brun à profil bien différencié contient autant de montmorillonite que le V 783.

MEHRA et JACKSON (1958) ont obtenu aussi, à la suite du traitement d'une montronite par la méthode Debb, une très nette diminution de la capacité d'échange.

Si on ramène le taux de diminution de la capacité d'échange à la quantité de fer libre d'Hoore (tableau 5), on constate que les valeurs obtenues augmentent dans l'ordre : sol rouge < sol brun à profil bien différencié < vertisol et sol brun à faible différenciation du profil. La valeur de 4,7 pour l'échantillon V 462 s'explique par sa richesse en minerai de fer (magnétite).

Il apparaît donc que la proportion de fer intégré dans le réseau des argiles est bien plus importante dans les sols de type brun à faible différenciation du profil. Lorsque ces derniers présentent de fortes proportions d'oxydes de fer libres, c'est sous forme de minerai hérité de la roche mère et inactive dans les réactions physico-chimiques du complexe argilo-humique.

L'analyse aux RX de la fraction argileuse des principaux types de sols bruns eutrophes étudiés signale dans tous les échantillons analysés, la présence de goethite et dans le VRZ 311 d'hématite et de goethite, tandis que l'échantillon de vertisol (VY 154) ne montre pas d'hydroxydes ou d'oxydes individualisés.

L'individualisation du fer est donc une caractéristique de l'ensemble des sols bruns eutrophes, mais elle décroît dans l'ordre : sols de type rouge > sols de type brun à profil bien différencié > sols de type brun à faible différenciation du profil.

En ce qui concerne les sols de type rouge, ce phénomène est facile à mettre en évidence, grâce à l'action des oxydes et hydroxydes de fer sur la stabilité structurale en milieu bien drainé.

Le tableau 6 montre que les sols de type rouge ont des indices d'instabilité structurale plus faibles et surtout des coefficients de percolation plus élevés et souvent beaucoup plus élevés que les deux autres types de sols. Certains sols rouges comme le VRZ 31 et K 88 ont des coefficients de percolation très élevés pour des sols argileux, et cela ne peut être attribué à l'action de la matière organique : le VRZ 31 est pauvre en matière organique.

Mais en ce qui concerne les sols bruns à profil bien différencié, ce phénomène ne peut être mis en évidence dans la mesure où le fer individualisé n'a pas d'effet structural dans ces sols.

Les différences dans l'individualisation du fer jointes au rôle négatif de ce dernier dans la formation des complexes argilo-humiques de couleur foncée, expliquerait la différenciation des principaux types morphologiques de sols bruns eutrophes.

#### *Comportement micromorphologique des sols*

Nous avons essayé de voir les répercussions du type de liaison matière organique - matière minérale sur la microstructure des sols.

Pour cela, nous avons comparé le profil type des sols bruns à faible différenciation du profil (V 78) au profil type des sols de type rouge (K 88).

TABLEAU 6

Test Hénin - Indice d'instabilité structurale  $I_s$  et coefficient de percolation  $K$ 

Sols du type brun à faible différenciation du profil					Sols du type rouge					Sols du type brun à profil bien différencié				
Profils	Echantillons	Profondeur (cm)	$I_s$	$K$ cm/h	Profils	Echantillons	Profondeur (cm)	$I_s$	$K$ cm/h	Profils	Echantillons	Profondeur (cm)	$I_s$	$K$ cm/h
VS 26	VS 261	0- 10	4,8	0,3	VRZ 31	VRZ 311	0- 14	0,9	5,4	VMK 23	VMK231	0-10	1,3	0,8
	262	10- 39	2,1	1,2		312	19- 40	1,4	6,2		232	10-25	1,6	1,4
	263	39- 70	2,5	0,5		313	40- 70	1,8	3,4		233	32-50	2,0	1,3
	264	90-136	4,1	0,6							234	—	—	—
V 78	V 782	10- 34	3,4	0,7	K 88	K 881	0- 10		1,6	V 47	V 471	0-26	2,5	1,3
	783	34- 80	3,9	0,6		882	10- 25		8,2		472	26-48	3,6	1,6
	784	101-130	3,1	0,4		883	25- 40		6,6		473	48-90	2,5	1,5
	785	130-162	4,7	0,4		884	40- 60		4,9					
V 46	V 461	0- 26	1,4	2,1	K 80	885	60- 80		3,3					
	462	28- 58	2,7	1,3		886	100-120		1,4					
	463	73- 93	3,1	0,6		K 801	0- 7	0,7	2,3					
V 64	V 641	0- 20	2,1	1,0		802	7- 20	0,9	2,5					
	642	25- 45	3,5	1,4		803	20- 35	2,0	3,9					
	643	47- 68	3,0	1,0		804	35- 50	1,9	3,9					
VL 24	VL 241	0- 30	2,7	1,6		805	50- 70	1,9	2,7					
	242	40- 57	2,0	1,8		806	70- 90	2,2	2,5					
	243	60- 80	—	—		807	90-110	1,5	2,0					
V 60	V 601	0- 14	1,6	1,8		808	110-140	0,4	3,3					
	602	14- 30	1,2	2,3		809	140-160	0,7	6,0					
VS 60	VS 601	0- 14	1,6	1,8										
	602	14- 30	1,2	2,3										
V 72	V 721	0- 20	1,9	0,7										
	722	20- 38	2,1	0,7										

## PROFIL V 78

Echantillon V 782 : 2 % de matière organique totale.

En lumière naturelle, plasma argilo-humifère de couleur brune, riche en matière organique.

En lumière réfléchi, la matière organique apparaît sous l'aspect de petits points et petites taches noires très bien réparties dans l'ensemble du plasma.

Il y a donc mélange intime de la matière organique et du plasma argileux (photo n° 3).

Echantillon V 784 : 0,76 % de matière organique totale.

En lumière naturelle : plasma argilo-humifère de couleur brun clair.

En lumière réfléchie, plasma à couleur dominante brunâtre (plasma argilo-humifère) en plages mal délimitées anastomosées sur des plages rouge clair paraissant ferrugineuses. La matière organique est assez bien répartie dans l'ensemble du plasma sous forme de petits points noirs, mais elle est bien plus abondante dans les plages brunes que dans les plages rouge-clair (photo n° 1).

On y observe quelques gros amas de plasma organique à contours tantôt nets, tantôt diffus sur le même amas (photo n° 2).

#### PROFIL K 88

Echantillon 881 : 4,1 % de matière organique totale.

En lumière naturelle : plasma de couleur brun noirâtre, riche en matière organique.

En lumière réfléchie, plasma argilo-humifère brun où la matière organique est bien répartie sous forme de très nombreux points et taches noires (photo n° 3).

Echantillon K 883 : 1,4 % de matière organique totale.

En lumière naturelle, plasma argilo-ferrique de couleur brun-rouge.

En lumière réfléchie, plasma argilo-ferrique rouge ; la matière organique est principalement constituée de débris végétaux plasmifiés sur place, parfois reconnaissables par leur forme extérieure.

Elle constitue des plages ou des nodules de plasma organique noirâtre nettement tranchés sur le plasma argilo-ferrique rouge (photo n° 4).

En lumière polarisée, les nodules de plasma organique sont parfois entourés par une bordure biréfringente de plasma argilo-ferrique (photos n° 5 et 6).

Il n'y a donc pas dans cet échantillon de mélange intime entre matière organique et matière minérale, alors que dans l'échantillon de surface (K 881) qui se comporte comme dans les sols de type brun à faible différenciation, on observe le même phénomène que dans le profil V 78.

Il s'agit donc bien dans l'échantillon K 884 d'une manque d'affinité entre le plasma organique et le plasma argilo-ferrique.

On retrouve là l'illusion du rôle négatif du fer dans la formation des complexes argilo-humiques de couleur foncée.

#### CONCLUSION

La différence fondamentale entre les sols de type rouge, les sols de type brun bien différencié et les sols de type brun à faible différenciation, consiste en une individualisation du fer plus élevée dans les deux premiers types de sols, provoquant une mauvaise formation de complexe argilo-humique foncé.

LAMOUREUX et SÉGALEN (1969) ont étudié le problème de la couleur des sols sur deux lots de sols bruns et rouges méditerranéens.

Ils attribuent :

— la couleur rouge avant tout à la présence de produits ferrugineux amorphes dont l'enlèvement fait apparaître la couleur du produit ferrugineux cristallisé éventuellement associé.

— la couleur brune avant tout à la présence de goethite, et les traitements qui modifient la couleur des sols rouges sont sans grand effet sur les sols bruns.

Ils trouvent que dans les deux cas une forte proportion du fer (50 à 75 %) est intégrée dans les réseaux.

On peut concevoir que les formes amorphes de fer étant plus actives dans les phénomènes de surface, ce soient elles qui empêchent le plus efficacement la formation du complexe argilo-humique.

Parmi les sols étudiés ici, seuls les sols de type brun ou brun rouge à faible différenciation du profil sur une grande profondeur répondent au concept de sols à mull.

Les autres catégories de sols se comportent comme les sols à sesquioxydes des mêmes régions.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La différenciation des sols bruns eutrophes est sous la dépendance du type d'altération et de la richesse en sesquioxydes de fer effectivement individualisés, deux caractéristiques qui conditionnent le type de matière organique.

La formation de mull c'est-à-dire d'un complexe argilo-humique de couleur foncée où matière minérale et matière organique sont intimement liées, nécessite :

— d'une part, une capacité d'échange des argiles élevée, qui ne peut être assurée par les argiles du type 1/1, mais par celles du type 2/1 et principalement la montmorillonite.

— un potentiel électrocinétique (potentiel zéta) des argiles élevé, qui favorise les phénomènes d'échange. A cet égard, le fer semble avoir un effet négatif dans la formation des complexes argilo-humiques de couleur foncée.

Mais ce rôle peut être dû aussi à la fixation des hydroxydes de fer sur la surface des argiles et dont l'effet apparaît dans la stabilité structurale beaucoup plus élevée des sols de type rouge.

Les sols riches en sesquioxydes individualisés, qu'ils aient un complexe absorbant minéral constitué de minéraux 2/1 ou de minéraux 1/1, ne peuvent donc être des sols à mull.

On aborde ici le problème du concept initial du sol brun eutrophe. MAIGNIEN (1963) le conçoit comme un sol développé, dans tous les cas en position de bon drainage externe et interne.

Or, les sols du complexe montmorillonitique développés en position de très bon drainage externe sur des roches riches en fer, semblent devoir être souvent des sols à sesquioxydes fortement individualisés grâce à l'oxygénation immédiate des composés ferrugineux libérés par l'altération des roches et due au très bon drainage et à la présence d'éléments grossiers. C'est par ce processus d'aération du milieu générateur que VAN DER MERWE (1940) explique la formation des sols rouges associés aux sols d'argiles noires subtropicaux (vertisols) en Afrique du Sud.

Mais le milieu générateur peut rester quand même suffisamment riche en bases grâce à la présence constante de la roche en voie d'altération, et permettre ainsi la synthèse montmorillonitique.

Les sols du complexe d'altération montmorillonitique situés en position de très bon drainage externe (tel le profil VRZ 31 de Haute-Volta et le profil K 88 du Sénégal oriental) ne correspondent donc pas par excellence aux conditions de formation des complexes argilo-humiques de couleur foncée (mull), parce qu'ils réunissent plutôt les conditions d'individualisation des sesquioxydes de fer, ce qui en fait souvent des sols fersiallitiques et non des sols à mull.

On voit que le concept central du sol brun eutrophe en tant que sol à mull correspondrait plutôt au sol brun eutrophe vertique.

Du reste nous avons signalé que parmi les sols bruns eutrophes étudiés, ceux qui sont le plus typiquement des sols à mull sont aussi ceux qui sont le plus typiquement des sols bruns eutrophe vertiques.

Un des résultats importants de cette étude est de montrer que ce caractère de sol à mull est directement lié à la différenciation de couleur du profil, les sols à mull étant caractérisés par un profil de type brun ou brun-rouge, paraissant humifère, à faible différenciation, et les autres sols par un profil de type brun vif ou rouge bien différencié, ne paraissant humifère que dans les horizons A peu épais.

Ces derniers sols, surtout en ce qui concerne les sols de type rouge se comportent comme des sols ferrugineux tropicaux ou des sols ferrallitiques tels que les a caractérisés C. THOMANN (1964).

Les sols bruns eutrophes de type rouge devraient donc appartenir comme l'ont signalé MARTIN, SIFFERMANN et VALLERIE (1966) à propos des sols rouges du nord Cameroun, à la classe des sols à hydroxydes. Nous pensons notamment à la sous-classe des sols fersiallitiques.

Un autre résultat important de cette étude concerne l'interprétation du rapport C/N. Dans ces sols, et plus particulièrement dans les types à mull, son élévation traduit un degré de polymérisation de la matière humique et un degré d'humification de la matière organique croissant.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDROVA (L.N.), NAD (M.), 1958. — The nature of organo-mineral colloids and method of their study. *Sov. Soil Sci.*, pp. 1100-1105 (cité par SEGALIN, 1964).
- AUBERT (G.), 1965. — La classification pédologique utilisée en France. Symp. intern. 3. Class. des Sols. *Pédologie*, Gand, pp. 25-56.
- BAVER (L.D.), 1959. — Soil Physics. 3rd ed. J. Wiley, New York ; Chapman, Hall, XVIII, 489 p.
- BEUTELSPACHER (H.), 1955. — The interaction of inorganic and organic colloids. *Z. Pflanzenernähr Düngung Bodenkd.*, Bd 69, 1-3, pp. 108-115. Cité par SEGALIN, 1964.
- BEUTELSPACHER (H.). — Wechselwirkung zwischen anorganischen und Organischen Kolloiden des Bodens. *Z. Pflanzenernähr Düngung Bodenkd.*, Bd 69, Heft 1-3, pp. 108-115.
- CHAUVEL (A.), 1967. — Carte Pédologique du Sénégal oriental à l'échelle 1/200 000. Notice explicative des feuilles de Kédougou et Kéniéba - Kossanto. Centre ORSTOM de Dakar, 155 p. *multigr.*
- DEMOLON (A.), BARBIER (G.), 1929. — Conditions de formation et constitution des complexes argilo-humiques des sols. *C.R. Acad. Sci. Fr.* 188, p. 654. Cité par MARSHALL, 1964.
- DESAI (A.D.), 1942. — The nature and the relationship of the black cotton soils and red earths of Hyderabad (Deccan) States. *Dep. Agric. H.E.H. Nizam Govt. Bull.*, 10, 75 p. (cité par SINGH, 1956).
- D'HOORE (J.), 1949. — Les composés du fer dans le sol. *Bull. agric. Congo-Belge*, XL, pp. 66-86. Cité par SEGALIN, 1964.
- DUCHAUFOUR (P.), 1960. — Précis de Pédologie. Masson et Cie, Paris, 438 p.
- DUCHAUFOUR (P.), 1963. — Note sur le rôle du fer dans les complexes argilo-humiques. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, 256, 12, pp. 2657-61.
- GRIM (R.E.), 1953. — Clay Mineralogy. Mc Graw-Hill, New York, XII, 384 p. Cité par d'HOORE, 1955.
- HALLSWORTH (E.G.), COSTIN (A.B.), GIBBONS (F.R.), ROBERTSON (G.K.), 1952. — Studies in pedogenesis in New South Wales. *J. Soil Sc.*, 3, pp. 103-124.
- JENNY (H.), REITEMEIR (R.F.), 1935. — Ionic exchange in relations to the stability of colloidal systems. *J. phys. Chem.*, 39, pp. 593-604. (cité par BAVER, 1959).
- JUSTE (C.), DELAS (J.), 1967. — Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésium, ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique. *Ann. agron.*, 18, 4, pp. 403-427.
- KALOGA (B.), 1965. — Sols et pédogenèse dans les bassins versants des Voltas Blanche et Rouge (Cours moyens). Centre ORSTOM de Dakar, 362 p. *multigr.*
- KALOGA (B.), 1970. — Etude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge 3<sup>e</sup> partie. Sols associés aux vertisols : sols bruns eutrophes et sols halomorphes. Chapitre 1. Sols bruns eutrophes, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 1, pp. 3-31.
- LUNT (O.R.), HEMAIDAN (N.), WALLACE (A.), 1954. — Reactions of some polyamine polyacetate iron chelates in various soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1956, 20, 2, pp. 172-175. Cité par SEGALIN, 1964.

- LAMOUREUX (M.), SEGALIN (P.), 1969. — Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. *Science du sol*, 1, pp. 63-75.
- MAIGNIEN (R.), 1963. — Les sols bruns eutrophes tropicaux. *Sols afr.*, vol. VIII, 3, pp. 485-490.
- MARSHALL (C.E.), 1964. — The Physical chemistry and Mineralogy of Soils, volume I : Soil materials. J. Wiley and Sons, New York, London, Sydney, X, 388 p.
- MARTIN (D.), SIFFERMANN (G.), VALLERIE (M.), 1966. — Les Sols Rouges du Nord-Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, 3, pp. 3-28.
- MATTSON (S.), 1931. — The laws of soil colloidal behavior. V. Ion adsorption and exchange, *Soil Sci.*, 31, p. 311. Cité par MARSHALL, 1964.
- MEHRA (C.P.), JACKSON (M.L.), 1958. — Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate System buffered with sodium bicarbonate. *Nat. Conf. on Clays and clay minerals*, 7, 1958, Washington, pp. 317-327.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des Argiles. Masson et Cie, Paris, 500 p.
- MORTENSEN (J.L.), 1960. — Adsorption of hydrolized polyacrylonitrile on kaolinite. *Nat. Conf. on Clays and clay minerals*, 9, 1960, Lafayette, Indiana, pp. 530-543.
- MYERS (H.E.), 1937. — Physicochemical reactions between organic and inorganic soil colloids as related to aggregate formation. *Soil Sc.*, 44, p. 331. Cité par MARSHALL, 1964.
- SEGALIN (P.), 1964. — Le fer dans les sols. *Init. Doc. tech. ORSTOM*, 4, Paris, IV, 151 p.
- SEN (B.C.), 1961. — Adsorption of humic acids on H clays and the roles of metal cations in humus adsorption. *J. Indian chem. Soc.*, 37, pp. 793-797. Cité par SEGALIN, 1964.
- SINGH (S.), 1954 a. — Study of the black cotton soils with reference to their coloration. Ph. D. Thesis, Univ. of London, chap. iii and iv. Cité par SINGH, 1956.
- SINGH (S.), 1954 b. — A study of the black cotton soils with special reference to their coloration. *J. Soil Sci.*, 5, pp. 289-299. Cité par SINGH, 1956.
- SINGH (S.), 1956. — The formation of dark - coloured clay. organic complexes in Black Soils. *J. Soil Sci.*, 7, pp. 43-58.
- SILVA (da J.A.F.), 1961. — Physico-chemical behaviour and properties of clay-Organic complexes. 1 p. (résumé d'un document communiqué par l'auteur). Cité par SEGALIN, 1964.
- SUTRA (G.), 1946. — Sur la dimension des ions électrolytiques. *Journ. Chem. Phys.*, pp. 190-326. Cité par MILLOT, 1964.
- THOMANN (C.), 1964. — Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest africain. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. II, 3, pp. 43-79.
- VAN DER MERWE (C.R.), 1935. — Morphology of the south African Black clays. *Int. Congr. Soil. Sci.*, 3, 1935, Oxford, vol. I, p. 301, cité par SINGH, 1956.
- VAN DER MERWE (C.R.), 1940. — Soils groups and sub-groups of south Africa. Union of South Africa, Dep. of Agric. and Forestry. Chemistry series 165, Prétoria, 316 p.
- VISSER (S.A.), 1964. — A physico-chemical of the properties of humic acids and their changes during humification. *J. Soil Sci.*, 15, 2, pp. 202-219.
- WALLACE (A.), LUNT (O.R.), 1957. — Reaction of some iron, zinc and manganese chelates in various soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 20, 4, pp. 479-482. Cité par SEGALIN, 1964.
- WILLIAM (C.H.), 1950. — An examination of the Jeffries Mg ribbon potassium-oxalate method for the removal of free iron oxide in soils. *Austral. J. agric. Res.*, 1, pp. 156-164.

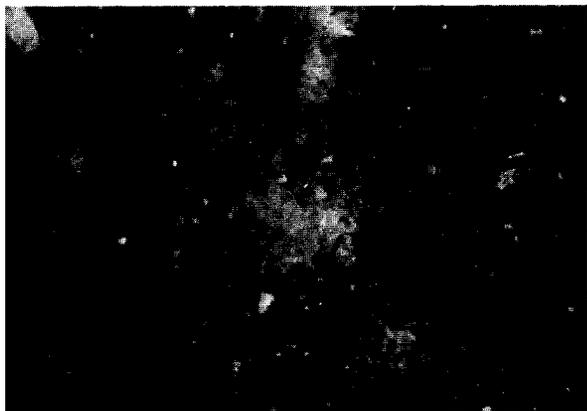


PHOTO n° 1 : échantillon V784, lumière réfléchie.

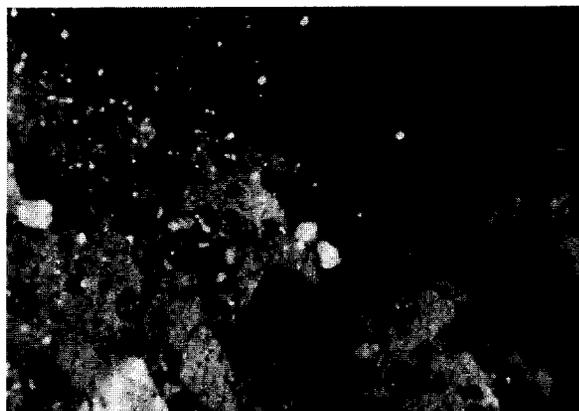


PHOTO n° 4 : échantillon K883, lumière réfléchie.

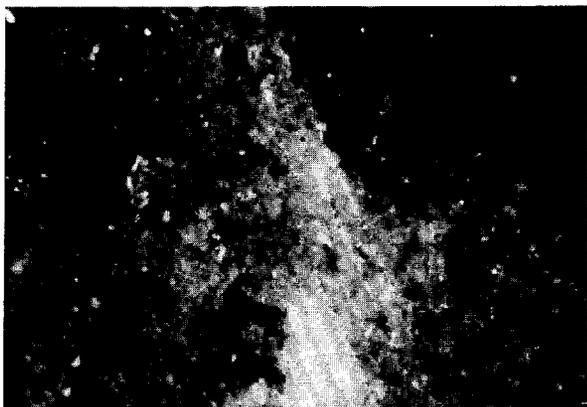


PHOTO n° 2 : échantillon V784, lumière réfléchie : gros amas de plasma organique.

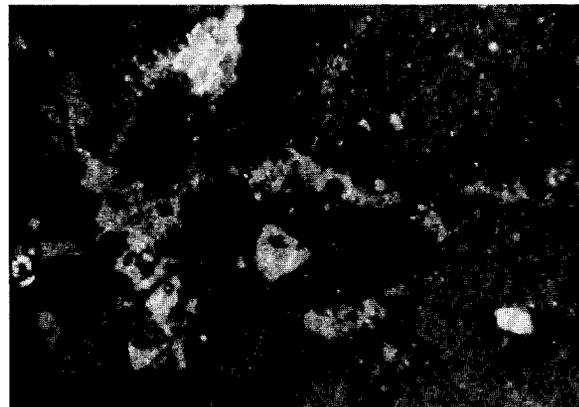


PHOTO n° 5 : échantillon K883, lumière réfléchie.

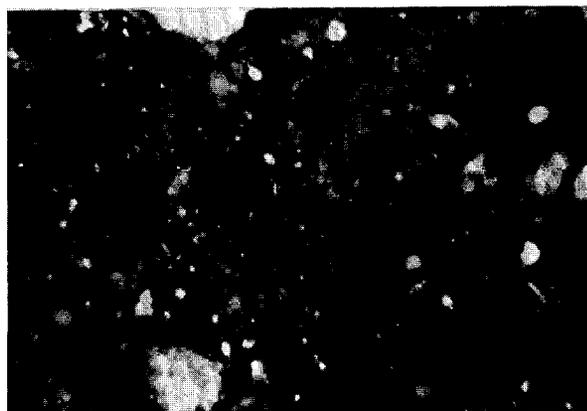


PHOTO n° 3 : échantillon V782, lumière réfléchie.



PHOTO n° 6 : échantillon K883, lumière polarisée : nodule de matière organique bien individualisé.