

ÉTUDE DU COMPLEXE ABSORBANT DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS DE CÔTE D'IVOIRE

Paul de BOISSEZON*

RÉSUMÉ

Les capacités d'échange cationique des matières organiques et de l'argile des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire ont été évaluées par deux méthodes différentes :

— *Régression linéaire multiple de la capacité d'échange des sols en fonction des taux d'argile et de matière organique ;*

— *Comparaison des capacités d'échange du sol avant et après destruction du complexe absorbant d'origine organique par calcination à température modérée.*

Les résultats obtenus par ces deux techniques montrent l'importance du complexe absorbant d'origine organique dans les horizons humifères de ces sols.

Il existe cependant de ce point de vue, une différence marquée entre l'humus des sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente et sous forêt dense semi-décidue. Parallèlement, le taux de saturation en base et le pH des horizons humifères des sols appartenant à ces deux zones écologiques diffèrent nettement.

Par contre, la distribution de ces sols ferrallitiques forestiers ivoiriens en fonction de leur désaturation en (B) n'apparaît pas comme strictement zonale.

ABSTRACT

The cationic exchange capacities of organic matter and clay in ferrallitic forest soils of Ivory Coast was estimated with two different methods :

— *Multiple linear regression relating the soil exchange capacity with clay and organic matter contents,*

— *Comparisons of soil exchange capacities before and after organic exchange complex destroying by ignition at moderate temperature.*

Results achieved by both methods indicate the importance of organic exchange complexes in organic horizons of these soils. However a great difference exists between ferrallitic soil humus under moist evergreen

* Maître de Recherches à l'ORSTOM - Centre d'Adiopodoumé, B.P. 20 - Côte d'Ivoire.

forest and under moist semideciduous forest. Moreover, the degree of base saturation and pH of soil humic horizons differ distinctly in these two ecological belts. On the other hand, the repartition of base saturation in B horizons of ferrallitic forest soils in Ivory Coast does not seem strictly zonal.

PLAN

1. LES SOLS ÉTUDIÉS

- 1.1. Bases échangeables, taux de saturation, pH
- 1.2. Les matières organiques

2. ÉVALUATION STATISTIQUE DU RÔLE JOUÉ PAR LES MATIÈRES ORGANIQUES ET L'ARGILE DANS LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES SOLS

- 2.1. Principe
- 2.2. Méthodes analytiques
- 2.3. Partition des échantillons
- 2.4. Résultats
- 2.5. Importance relative du complexe absorbant d'origine organique et minérale
- 2.6. Influence du pH sur la capacité d'échange

3. DÉTERMINATION ANALYTIQUE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES FRACTIONS ORGANIQUES ET MINÉRALES DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS DE CÔTE D'IVOIRE

- 3.1. Principe
- 3.2. La méthode, ses limites
- 3.3. Importance relative du complexe, absorbant d'origine organique et d'origine minérale.
- 3.4. Capacité d'échange des matières organiques.
- 3.5. Relation entre la capacité d'échange des matières organiques et les teneurs en matières organiques
- 3.6. Capacité d'échange de la fraction minérale des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens

4. REMARQUES SUR L'ADDITIVITÉ DES CAPACITÉS D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES ET MINÉRALES DES SOLS

5. CONCLUSIONS

Le rôle joué par les matières organiques des sols du point de vue de la capacité d'échange cationique est bien connu pour les sols très organiques, ou pour les sols sableux. Il est souvent mésestimé pour les autres types de sols. Dans le cas des sols ferrallitiques, qui possèdent un complexe absorbant d'origine minérale à faible capacité d'échange, et dont les horizons humifères sont souvent appauvris en argile, il est logique de penser que le complexe absorbant d'origine organique joue un rôle relativement important.

Nous avons essayé d'évaluer la capacité d'échange des matières organiques dans le cas des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire par deux méthodes différentes :

— La première méthode est basée sur l'analyse statistique de la régression linéaire multiple de la capacité d'échange du sol en fonction des taux de matières organiques et d'argile ;

— La deuxième méthode est basée sur la comparaison de la capacité d'échange du sol avant et après destruction du complexe absorbant d'origine organique par calcination à température modérée.

1. LES SOLS ÉTUDIÉS

Grâce aux prospections réalisées dans le cadre d'une étude pour le reboisement et la protection des sols en Côte d'Ivoire, [de BOISSEZON, LATHAM, PERRAUD et *al.*, (1968)], il a été possible de prélever et d'analyser un grand nombre d'échantillons représentatifs des sols ferrallitiques forestiers sous forêt dense humide sempervirente et sous forêt dense semi-décidue, tant sur schistes ou micaschistes que sur granite et migmatites.

1.1. BASES ÉCHANGEABLES, TAUX DE SATURATION, pH

Les figures 1, 2 et 3 précisent les caractéristiques ainsi que le domaine de variation de la somme des bases échangeables, du pH et du taux de saturation en bases des horizons humifères de surface A₁, de l'horizon de pénétration humifère A₃ et de l'horizon B de ces sols.

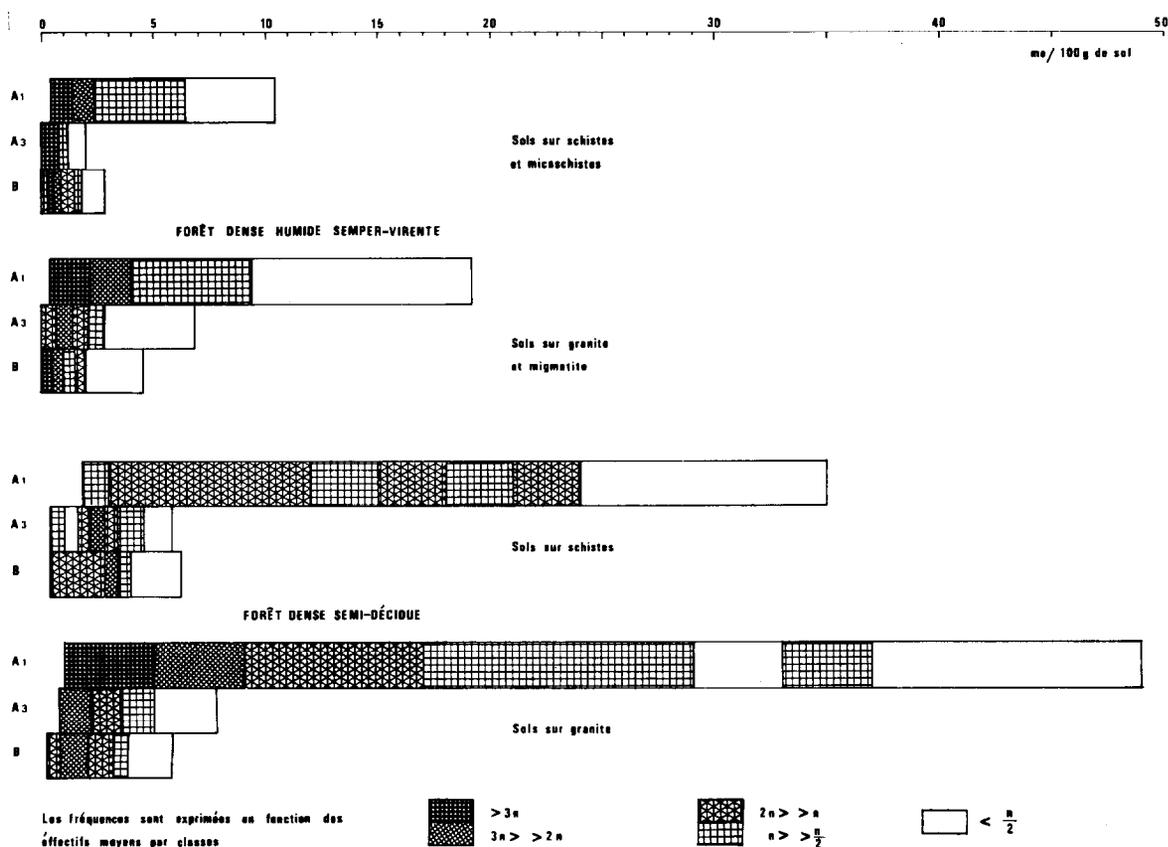


FIG. 1. — Somme des bases échangeables des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens.

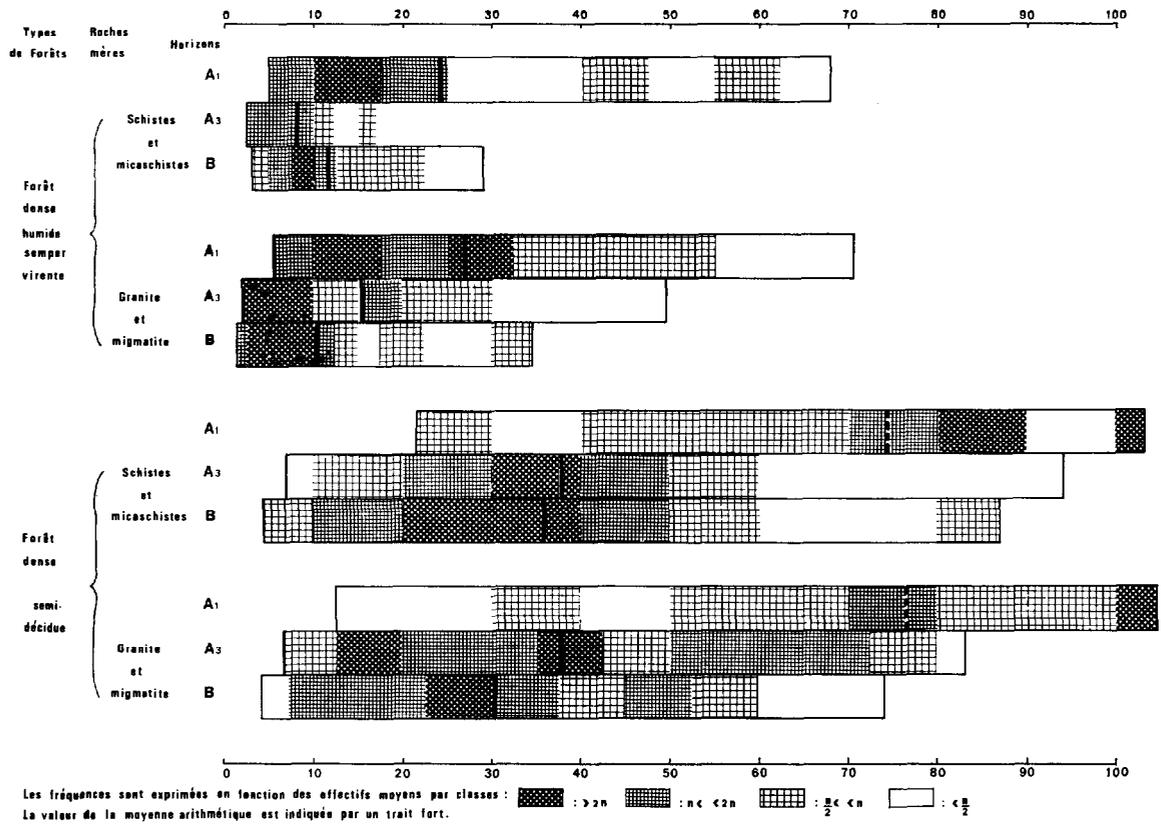


FIG. 2. — Taux de saturation des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens.

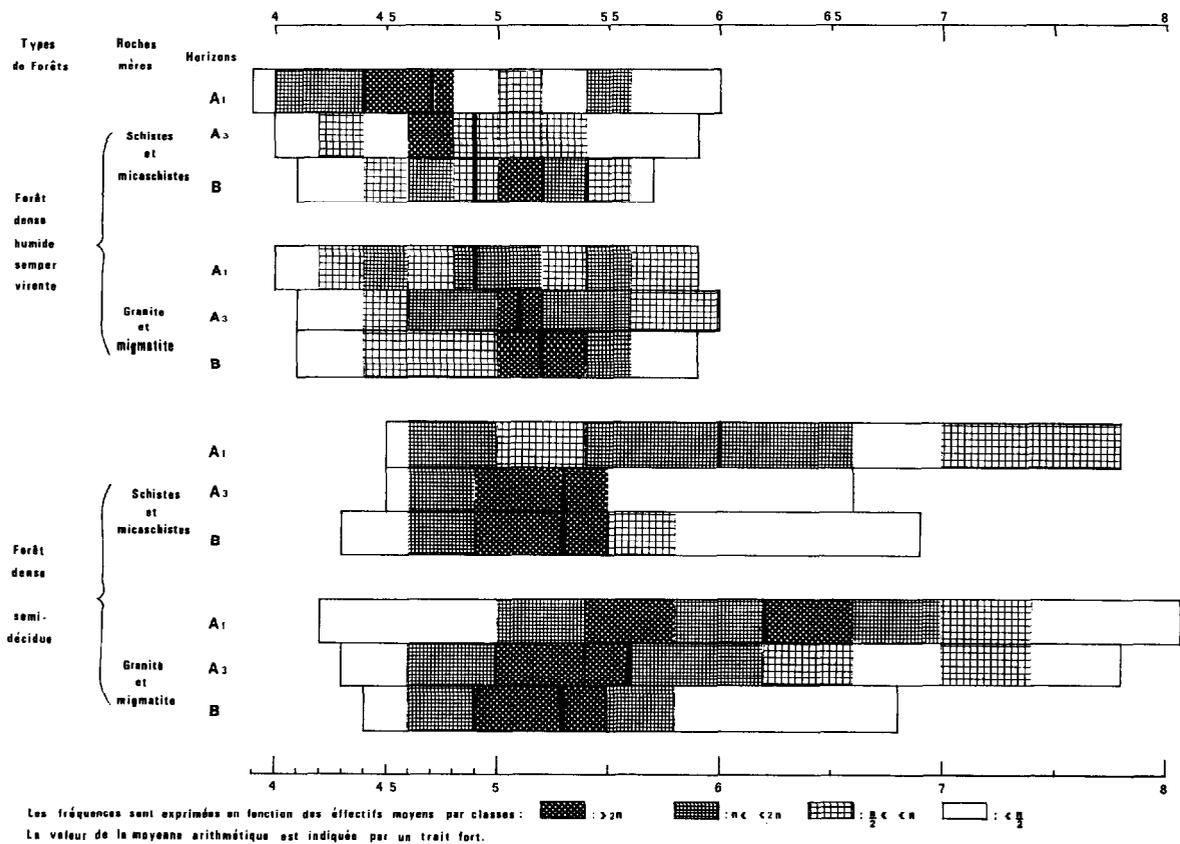


FIG. 3. — pH des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens.

Les sols sous forêt dense humide sempervirente sont des sols ferrallitiques fortement désaturés en (B), présentant une réaction généralement encore plus acide en surface qu'en profondeur. Au contraire les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue ont en Côte d'Ivoire des horizons humifères faiblement acides ou presque neutres, bien que l'horizon B présente un taux de saturation très variable.

Cette différence de saturation en bases et de réaction des horizons humifères entre les sols correspondant à ces deux zones écologiques sont le résultat d'un équilibre différent des processus antagonistes de lixiviation des bases par drainage et de remontée biologique par la végétation et la faune.

En effet, dans la basse Côte d'Ivoire, domaine de la forêt dense humide sempervirente, le climat de type sub-équatorial est caractérisé par une pluviométrie élevée (supérieure à 1 600 mm) avec une saison sèche de faible durée. Le pédoclimat presque constamment humide sous forêt favorise la minéralisation totale des débris organiques et le drainage lixive les bases qui ne sont pas adsorbées par la végétation.

Au contraire, en moyenne Côte d'Ivoire, la grande saison sèche est déjà plus marquée et l'apport de débris organiques plus nettement saisonnier (forêt semi-décidue). Le pédoclimat dans les horizons supérieurs des sols passe par des alternances répétées de sécheresse et d'humidité, qui favorisent plus la transformation des débris organiques en « humus » (s.l.) que leur minéralisation totale immédiate. Le drainage est plus faible du fait de la pluviométrie moins élevée (1 400 à 1 600 mm) et de l'évapotranspiration plus importante. Ces faits expliquent donc que la remontée biologique l'emporte sur la lixiviation des bases dans cette zone de forêt mésophile.

1.2. LES MATIÈRES ORGANIQUES

Dans ces deux zones écologiques, on observe une matière organique rapidement évoluée, avec une litière peu épaisse qui disparaît presque totalement en saison des pluies. Cet « humus » est lié d'une manière intime aux matières minérales de ces sols. Cependant, les caractéristiques chimiques des matières organiques de ces sols diffèrent sensiblement du point de vue qualitatif et quantitatif.

TABLEAU 1

RAPPORT C/N DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS (DOMAINE DE VARIATIONS) MOYENNES

	Forêts	Roches mères	Horizons	
			A ₁	A ₃
Basse Côte d'Ivoire	Forêt dense humide sempervirente	Schistes et micaschistes	14,5 (10,0-22,0)	10,4 (8,0-15,9)
	Pluviométrie > 1 600 mm Saison sèche : 2 ≤ S < 4 mois	Granite et migmatite	13,4 (8,2-21,4)	9,7 (8,0-14,4)
Moyenne Côte d'Ivoire	Forêt dense semi-décidue	Schistes et micaschistes	12,2 (8,2-20,4)	9,9 (7,2-12,9)
	1 300 < Pluviométrie < 1 600 mm Saison sèche : 4 ≤ S < 5 mois	Granite et migmatite	12,4 (10,1-21,2)	11,1 (8,0-14,6)

Les résultats moyens donnés dans les tableaux 3 et 4 montrent que les sols de basse Côte d'Ivoire sous forêt dense humide sempervirente sont plus pauvres en matières organiques et le rapport C/N est plus élevé (tableau 1) que pour les matières organiques des sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue.

De même, les proportions relatives d'acides humiques (AH) et d'acides fulviques (AF) d'une part, et d'acides humiques bruns et gris (tableau 2) d'autre part, permettent de définir deux types d'humus, que PERRAUD (1970) a appelé « mulls forestier tropicaux oligotrophes et eutrophes ».

TABLEAU 2

VALEURS CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES HUMIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS

Type de Forêts	Profondeur (cm)	Pourcentage de fraction lourde	Pourcentage de MHT de la fraction lourde	AF/AH	Pourcentage d'AH gris /HA
Forêt dense humide — sempervirente	0-3/5	67	15	1,6	31
	3/5-15	82	21	2,8	37
Forêt dense — semi-décidue	0- 5	69 à 77	12 à 17	1,3 à 0,8	34 à 50
	5-15	87 à 88	20 à 28	1,7 à 0,7	44 à 51

d'après PERRAUD (1970).

2. ÉVALUATION STATISTIQUE DU RÔLE JOUÉ PAR LES MATIÈRES ORGANIQUES ET L'ARGILE DANS LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES SOLS

2.1. PRINCIPE

La méthode statistique de régression linéaire multiple de la capacité d'échange (T mé/100 g de sol) en fonction du taux de matières organiques ou plus simplement de carbone organique (C ‰) et d'argile (A ‰) permet d'estimer l'influence sur la capacité d'échange des constituants organiques et minéraux des sols.

Si t_c et t_a sont les coefficients de l'équation de régression linéaire multiple correspondant respectivement à la capacité d'échange cationique des matières organiques et de l'argile pour une population d'échantillons de sols donnée, il est possible d'apprécier la valeur de l'estimation faite en utilisant l'équation de régression linéaire multiple de la forme :

$$T = t_0 + t_c C + t_a A$$

Cette méthode qui paraît n'avoir été utilisée que par un nombre limité d'auteurs [HALLSWORTH et WILKINSON (1958), OLLAT et COMBEAU (1960), HELLINGS, CHESTERS et COREY (1964), LOUE (1964), RENGER

(1965), WILDING et RUTLEDGE (1966), STEPHENS (1969)], ne peut cependant être appliquée qu'à des populations d'échantillons de sols, correspondant à des horizons identiques de sols de mêmes types, et telles que les variables contrôlées *C* et *A* puissent être considérées comme appartenant à une population normale.

2.2. MÉTHODES ANALYTIQUES

La capacité d'échange cationique des sols (*T*) a été déterminée par la méthode Ollat (PELLOUX, 1963) avec saturation du sol par Cl_2Ca , tamponné à pH 7 par la triéthanolamine, et déplacement du Ca fixé par NO_3K .

Le carbone organique a été dosé par la méthode Walkley et Black. Les teneurs en matières organiques sont obtenues en multipliant le résultat par 1,724.

Les teneurs en argile granulométrique (inférieure à 2μ) ont été obtenues grâce à la pipette Robinson, après dispersion par le pyrophosphate de sodium, sans traitement préalable, si ce n'est une destruction des matières organiques par l'eau oxygénée.

2.3. PARTITION DES ÉCHANTILLONS

Les calculs statistiques ont été faits sur les horizons homologues (A_1 , A_3 et B) des quatre catégories de sols suivantes :

— Sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente soit sur schistes et micaschistes, soit sur granite et migmatite.

— Sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue soit sur chistes ou micaschistes, soit sur granite ou migmatite. Toutefois, les sols ferrallitiques rajeunis ont été éliminés ainsi que les sols ferrallitiques hydromorphes, car les premiers ont une richesse en bases nettement supérieure à la moyenne et les seconds ont un horizon B particulier. Les sols sur lesquels portent ces investigations sont donc des sols ferrallitiques fortement, moyennement ou faiblement désaturés en (B), soit remaniés modaux, ou appauvris, soit des sols typiques modaux ou appauvris [AUBERT et SÉGALEN (1966)].

2.4. LES RÉSULTATS

Les tableaux 3 et 4 résument les résultats obtenus pour les horizons humifères de surface (A_1) et de pénétration humifère (A_3) des sols ferrallitiques forestiers de basse et moyenne Côte d'Ivoire.

Il existe une corrélation directe hautement significative entre la capacité d'échange de ces échantillons de sols et les teneurs en matière organique et en argile. Par contre, dans tous les cas, les variables contrôlées *C* et *A* paraissent faiblement liées entre elles (tableaux 5 et 6).

L'analyse de la variance montre que pour les échantillons humifères de surface A_1 , les variations de capacité d'échange de ces sols sont essentiellement liées aux taux de matières organiques ; alors que, pour les horizons de pénétration humifère A_3 , c'est le taux d'argile qui intervient d'une manière prédo-

TABLEAU 3

RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LES TAUX DE MATIÈRES ORGANIQUES ET D'ARGILE
POUR LES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS

REGRESSION MULTIPLE — RÉSULTATS MOYENS — DOMAINES DE VARIATION

Horizons humifères de surface (A₁)

Type de végétation	Roches mères	T mé/100 g moyennes	C ‰ (domaine de variation)	A % (domaine de variation)	Equations de régression (domaine de variation des coefficients)	Nombre d'échant.
Forêt dense humide sempervirente	Schistes et micaschistes	8,9 (4,1-16,5)	22,0 (8,5-43,9)	16,0 (5,4-24,4)	$T = 1,04 + 0,23 C + 0,17 A$ (±0,07) (±0,11)	53
	Granite et migmatite	9,5 (3,5-21,5)	22,0 (3,0-71,4)	18,5 (3,1-45,4)	$T = 3,76 + 0,18 C + 0,10 A$ (±0,04) (±0,05)	88
Forêt dense semi-décidue	Schistes et micaschistes	18,5 (6,9-27,7)	34,6 (9,9-73,7)	20,9 (8,8-36,7)	$T = 2,81 + 0,30 C + 0,25 A$ (±0,08) (±0,19)	33
	Granite et migmatite	14,9 (4,4-42,3)	33,9 (6,4-101)	18,1 (5,1-44,4)	$T = 2,48 + 0,30 C + 0,12 A$ (±0,08) (±0,18)	97

TABLEAU 4

RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LES TAUX DE MATIÈRES ORGANIQUES
ET D'ARGILE POUR LES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS

RÉGRESSION MULTIPLE - RÉSULTATS MOYENS - DOMAINES DE VARIATION

Horizons de pénétration humifère (A₂)

Type de végétation	Roches mères	T mé/100 g moyennes	C ‰ (domaine de variation)	A % (domaine de variation)	Equations de régression (domaine de variation des coefficients)	Nombre d'éch.
Forêt dense humide sempervirente	Schistes	5,5 (2,2- 8,8)	5,6 (2,9- 9,8)	28,7 (5,3-56,2)	$T = 1,57 + 0,34 C + 0,07 A$ (±0,25) (±0,03)	30
	Granite et migmatite	6,3 (1,7-10,6)	6,0 (1,3-11,8)	29,2 (5,5-62,0)	$T = 3,01 + 0,21 C + 0,07 A$ (±0,16) (±0,03)	67
Forêt dense semi-décidue	Schistes	7,0 (2,0-11,1)	6,9 (1,9-13,7)	32,9 (9,7-57,3)	$T = 1,87 + 0,37 C + 0,08 A$ (±0,26) (±0,06)	25
	Granite	6,9 (3,2-11,3)	5,9 (2,1- 9,5)	28,8 (8,0-65,9)	$T = 3,25 + 0,36 C + 0,05 A$ (±0,25) (±0,04)	52

minante. Toutefois dans les deux cas, l'équation de régression multiple en fonction des facteurs contrôlés *C* et *A* fournit une meilleure estimation de *T*, que la régression partielle par rapport à l'un ou l'autre de ces facteurs. Il résulte cependant de ce fait, que l'estimation du coefficient de régression t_c est relativement bonne pour les horizons humifères de surface, mais très médiocre pour les horizons de pénétration humifère ; et c'est l'inverse pour les coefficients t_a .

En conclusion, la capacité d'échange cationique des matières organiques des horizons humifères est environ dix à vingt fois plus importante que celle de l'argile. Sa valeur moyenne s'établit aux alentours de 110 à 145 mé/100 g de matières organiques pour les horizons A_1 des sols sous forêt dense humide sempervirente et à 175 mé/100 g M.O. sous forêt dense semi-décidue. La capacité d'échange des matières organiques pour les horizons de pénétration humifère (A_3) serait un peu supérieure. Ce dernier résultat corrobore la constatation faite par BROADBENT (1954). D'après lui, les matières organiques des sols en profondeur seraient moins riches en carbone et plus riches en oxygène, avec en particulier un nombre de groupements carboxyle relativement plus élevé ; ce qui expliquerait que leur capacité d'échange soit relativement plus importante.

Les estimations de la capacité d'échange de la fraction argileuse montrent que celle-ci est inférieure à 10 mé/100 g d'argile pour l'horizon de pénétration humifère ainsi que pour l'horizon B (tableau 7).

TABLEAU 5
RELATIONS ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LES TAUX DE MATIÈRES ORGANIQUES
ET D'ARGILE POUR LES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIENS
RÉGRESSIONS PARTIELLES ET MULTIPLE - ANALYSE DE LA VARIANCE

Horizons humifères de surface (A_1)

Types de sols ferrallitiques		Régressions partielles							Régression multiple			
Forêt	Roche mère	r_{TC}	Coef. dét. TC	F_{TC}	r_{TA}	Coef. dét. TA	F_{TA}	r_{CA}	Coef. dét. TCA	$F_{T(CA)}$	$F_{TA.C}$	$F_{TC.A}$
dense humide sempervirente	Schistes	0,71 ***	0,49	50,93 ***	0,45 ***	0,19	13,00 ***	0,25 1/10	0,56	34,71 ***	9,34 **	44,51 ***
	Granite	0,76 ***	0,58	119,4 ***	0,44 ***	0,18	20,55 ***	0,28 **	0,63	74,6 ***	13,04 ***	104,0 ***
dense semi-décidue	Schistes	0,85 ***	0,72	83,84 ***	0,55 ***	0,28	13,55 ***	0,40 *	0,77	53,81 ***	7,14 *	65,67 ***
	Granite	0,86 ***	0,74	274 ***	0,55 ***	0,30	40,6 ***	0,49 ***	0,76	150 ***	7,37 **	182,0 ***

Degré de signification. — Le coefficient de détermination est la quantité $Cd = \frac{\hat{\sigma}_T^2 - \hat{\sigma}_{TCA}^2}{\hat{\sigma}_T^2}$ dans laquelle $\hat{\sigma}_T^2$ est

1/10 : 0,1 l'estimation sans biais de la variance de $T = \frac{SCE_T}{n-1}$ et $\hat{\sigma}_{TCA}^2$ l'estimation de la variance résiduelle. Le coeffi-

- * : 0,05
 - ** : 0,01
 - *** : 0,001
- cient de détermination correspond en fait au carré du coefficient de corrélation multiple entre *T* et les variables *C* et *A*. Il est parfois écrit R^2 . Plus il est voisin de 1, plus la variance résiduelle est faible et mieux *T* est déterminé par la connaissance du couple (*C*, *A*).

— *F* est la variable de Fischer-Snedecor correspondant au rapport des variances.

TABLEAU 6

RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LES TAUX DE MATIÈRES ORGANIQUES
ET D'ARGILE POUR LES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS
RÉGRESSIONS PARTIELLES ET MULTIPLE - ANALYSE DE LA VARIANCE

Horizons de pénétration humifère (A₃)

Types de sols ferrallitiques		Régressions partielles							Régression multiple			
Forêt	Roches mères	r_{TC}	Coef. dét. TC	F_{TC}	r_{TA}	Coef. dét. TA	F_{TA}	r_{CA}	Coef. dét. T(CA)	$F_{T(CA)}$	$F_{TA.C}$	$F_{TC.A}$
dense humide sempervirente	Schistes et micaschistes	0,63 ***	0,38	18,79 ***	0,75 ***	0,55	35,91 ***	0,49 **	0,63	25,85 ***	20,16 ***	7,49 *
	Granite et migmatite	0,46 ***	0,20	17,51 ***	0,60 ***	0,35	36,86 ***	0,38 **	0,41	23,90 ***	24,00 ***	7,31 **
dense semi-décidue	Schistes et micaschistes	0,61 ***	0,34	13,31 **	0,58 ***	0,30	11,58 **	0,33 **	0,44	10,36 ***	5,06 *	6,59 **
	Granite et migmatite	0,49 ***	0,22	15,72 ***	0,48 ***	0,21	14,60 ***	0,35 **	0,31	12,81 ***	7,78 **	8,76 **

Coef. dét. : coefficient de détermination (voir tableau 5).

TABLEAU 7

RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET LE TAUX D'ARGILE
POUR LES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS
RÉGRESSION SIMPLE - DOMAINE DE VARIATION

Horizons B

Type de végétation	Roches mères	T mé/100 g moyennes	A % (domaine de variation)	Equation de régression (domaine de variation du coefficient)	Nbre d'éch.	r	Cd	F_{TA}
Forêt dense humide sempervirente	Schistes et micaschiste	6,1 (2,9- 8,2)	43,3 (22,8-54,8)	$T = 2,31 + 0,089 A$ ($\pm 0,038$)	45	0,59 ***	0,42	39,38 ***
	Granite et migmatite	6,6 (3,7-10,3)	44,2 (21,0-64,8)	$T = 2,50 + 0,093 A$ ($\pm 0,041$)	57	0,52 ***	0,25	20,42 ***
Forêt dense semi-décidue	Schistes et micaschiste	8,6 (4,1-14,3)	43,6 (17,6-64,5)	$T = 4,76 + 0,088 A$ ($\pm 0,053$)	39	0,49 ***	0,22	11,75 **
	Granite et migmatite	6,8 (3,6-12,4)	39,5 (12,3-64,1)	$T = 4,34 + 0,063 A$ ($\pm 0,032$)	70	0,42 ***	0,17	15,31 ***

Toutefois elle serait en moyenne supérieure à ce chiffre pour l'horizon A₁ des sols ferrallitiques en particulier sur schistes, mais l'estimation de ce coefficient t_a est alors très médiocre.

Ces résultats sur la capacité d'échange de l'argile concordent avec la composition minéralogique de la fraction argileuse de ces sols ferrallitiques, essentiellement de nature kaolinitique.

2.5. IMPORTANCE RELATIVE DU COMPLEXE ABSORBANT D'ORIGINE ORGANIQUE ET MINÉRALE

Pour schématiser ces résultats, nous avons représenté sur la figure 4 les fractions du complexe absorbant de ces sols qui sont liés linéairement aux taux de matières organiques (T_c), et aux taux d'argile granulométrique (T_a) pour des valeurs moyennes des variables contrôlées. On remarquera que la capacité d'échange cationique liée linéairement aux teneurs en matières organiques pour les horizons A₁, est environ deux fois plus importante pour les sols sous forêt dense semi-décidue que sous forêt dense humide sempervivante. Les premiers sont non seulement plus riches en matières organiques, mais la capacité d'échange de ces matières organiques est également plus élevée.

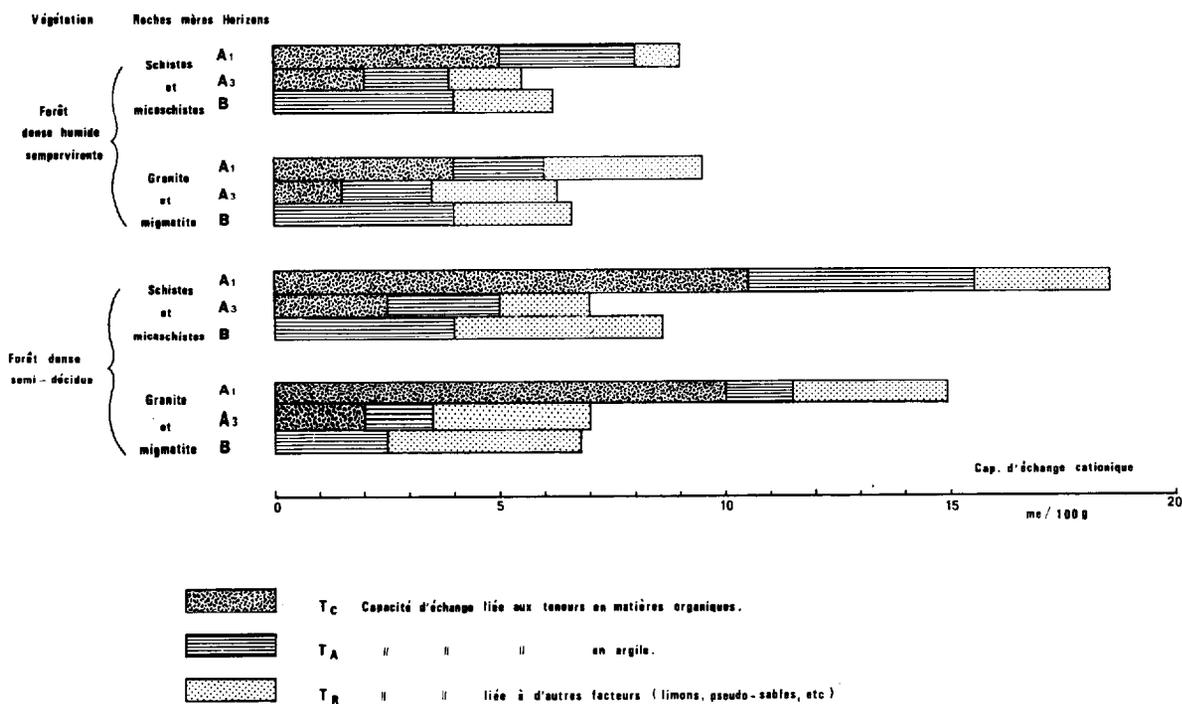
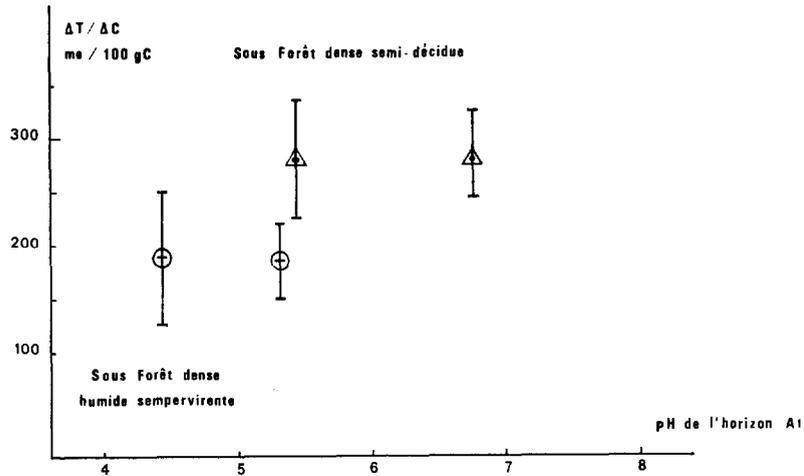
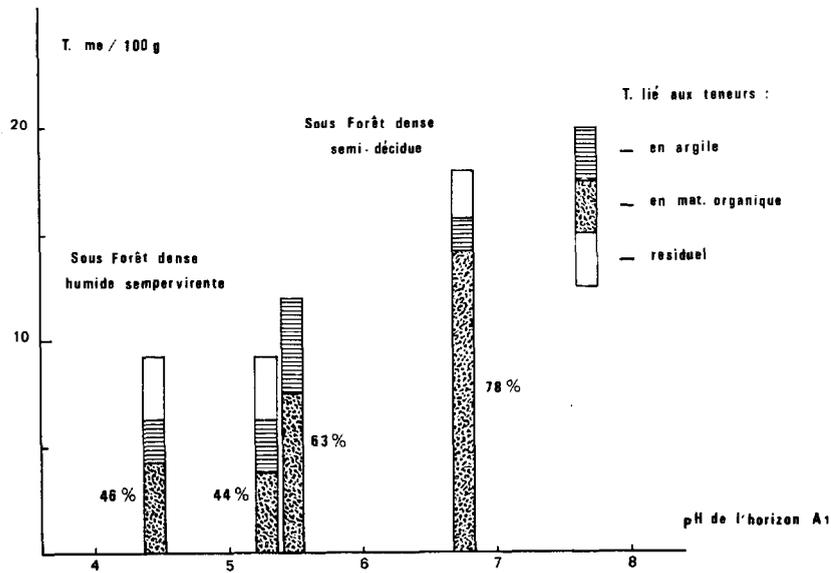


FIG. 4. — Complexes absorbants moyens des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens.



Capacité d'échange des matières organiques de l'horizon A₁ des Sols ferrallitiques forestiers Ivoiriens (Valeurs moyennes, domaine de variation)



Capacité d'échange moyenne de l'horizon A₁ des Sols ferrallitiques forestiers Ivoiriens.

FIG. 5. — Influence du pH sur la capacité d'échange des matières organiques.

Le terme résiduel (T_r), qui n'est apparemment pas lié linéairement aux taux de matières organiques et d'argile granulométrique, correspond essentiellement à la capacité d'échange des limons, des sables et pseudosables ainsi qu'aux interactions entre les différents facteurs. Ce terme est en général plus important pour les sols issus de granite que pour ceux issus de schistes. Il est surtout nettement plus élevé pour les sols sous forêt semi-décidue que pour les sols sous forêt dense humide sempervirente, spécialement dans l'horizon B. Cette dernière propriété est probablement à mettre en relation avec l'existence de pseudosables, à capacité d'échange non négligeable, dans les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue.

2.6. INFLUENCE DU pH SUR LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE

Les sols ferrallitiques forestiers de basse et moyenne Côte d'Ivoire diffèrent en général par la réaction et le taux de saturation de l'horizon humifère de surface (A_1). Afin d'apprécier l'influence du pH du sol sur la capacité d'échange des matières organiques, nous avons divisé les échantillons provenant des horizons humifères de surface A_1 en deux sous-ensembles pour chacune des catégories de sols¹. Pour les sols sous forêt dense humide sempervirente la limite de partition a été prise à pH 4,9 et pour les sols sous forêt dense semi-décidue à pH 6,0.

Les résultats obtenus (tableau 8) montrent que la capacité d'échange des matières organiques de l'horizon A_1 serait constante pour chacune de ces catégories de sols, quels que soient leurs pH. Mais la capacité d'échange des matières organiques des sols sous-forêt dense semi-décidue est nettement plus élevée que celle sous forêt dense humide sempervirente. En particulier, pour les deux sous ensembles présentant un pH moyen pourtant analogue (pH 5,4), la capacité d'échange des matières organiques est significativement différente avec une probabilité supérieure à 96 % (figure 5). Cette constatation est en accord avec les résultats obtenus par HALLSWORTH et WILKINSON (1958) pour d'autres types de sols.

Le rôle joué par les matières organiques dans le complexe d'échange de ces sols varie cependant en fonction du pH pour chacune de ces catégories de sols, du fait que l'horizon A_1 des sols sous forêt dense semi-décidue est d'autant plus riche en matières organiques que le pH est plus élevé. Sous forêt dense sempervirente, quel que soit le pH, la capacité d'échange liée linéairement aux teneurs en matières organiques représente en moyenne environ 45 % du complexe absorbant de cet horizon A_1 (figure 5). Par contre, sous forêt dense semi-décidue, la capacité d'échange liée aux teneurs en matières organiques représente en moyenne 63 % de la capacité d'échange totale pour les horizons A_1 les plus acides, et 78 % pour ceux dont le pH est supérieur à 6,0.

En résumé, ces évaluations statistiques de la capacité d'échange des matières organiques et minérales des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens fournissent avec plus ou moins de précision suivant les horizons des valeurs moyennes qui sont du même ordre de grandeur que celles trouvées dans les publications sur les sols tropicaux [ABRUNA-RODRIGUEZ et VICENTE CHANDLER (1955), BARSHAD et ROJAS-CRUZ (1950), ENDREY et QUAGRAINE (1960), HALLSWORTH et WILKINSON (1958), JACQUES-FÉLIX et BETREMIEUX (1949), LAUDELOUT et d'HOORE (1949), OLLAT et COMBEAU (1960), RICARDO (1961), RUSSEL (1961), SCHULZ-SCHOMBURGK (1954)]. Elles montrent d'autre part l'importance du complexe absorbant d'origine organique dans les horizons humifères supérieurs de ces sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire.

¹ Les limites choisies correspondent approximativement à la moyenne arithmétique.

TABLEAU 8

RÉACTION ET CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE DES SOLS FERRALLITIQUES
FORESTIERS IVOIRIENS

Horizons A₁

Sols sous Forêt	Réaction horizon A ₁	pH moyen	Valeurs moyennes			Nbre d'éch.	Equation de régression linéaire (domaine de variation des coefficients)	Cof. de détermination
			T mé/100 g	C ‰	A %			
dense humide sempervirente	pH < 4,9	4,43	9,31	22,75	18,81	59	$T = 3,033 + 0,189 C + 0,105 A$ (±0,062) (±0,041)	0,55
	pH ≥ 4,9	5,34	9,33	22,45	16,82	54	$T = 3,122 + 0,184 C + 0,124 A$ (±0,034) (±0,074)	0,66
dense semi-décidue	pH ≤ 6,0	5,44	12,32	27,51	20,49	65	$T = 0,03 + 0,281 C + 0,225 A$ (±0,056) (±0,092)	0,77
	pH > 6,0	6,78	18,29	50,00	17,50	69	$T = 1,708 + 0,285 C + 0,133 A$ (±0,041) (±0,108)	0,95

Cependant, l'analyse des régressions linéaires multiples ne permet pas de préciser si les relations, qui existent entre la capacité d'échange des sols et les taux de matière organique ou d'argile, sont directes ou indirectes. En effet, ces relations peuvent être :

- soit la manifestation d'un phénomène physico-chimique réel,
- soit le reflet d'une interdépendance complexe par l'intermédiaire d'autres variables non contrôlées.

La première hypothèse s'appuie sur les nombreuses études du complexe absorbant d'origine organique ou minérale réalisées sur de nombreux sols. Il paraissait néanmoins nécessaire de la contrôler, par une étude analytique sur ces sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire.

3. DÉTERMINATION ANALYTIQUE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES FRACTIONS ORGANIQUES ET MINÉRALES DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS DE CÔTE D'IVOIRE

3.1. PRINCIPE

La méthode analytique utilisée pour déterminer la capacité d'échange cationique des matières organiques des sols est basée sur la comparaison de la capacité d'échange des sols avant et après destruction du complexe absorbant d'origine organique.

3.2. LA MÉTHODE, SES LIMITES

La technique classique de destruction des matières organiques par l'eau oxygénée a été maintes fois utilisée [ABRUNA-RODRIGUEZ et VICENTE CHANDLER (1955), BARSHAD et ROJAS-CRUZ (1950), DAVIES et DAVIES (1966), ENDREY et QUAGRAINE (1960), JACQUES-FÉLIX et BETREMIEUX (1949), LAUDELOUT et d'HOORE (1949), de LEENHEER, de BOODT et WELVAERT (1950), MCGEORGE (1930), PRATT (1957), SCHULZ-SCHOMBURGK (1954)], mais aussi fortement critiquée, en particulier parce que les taux de destruction des matières organiques sont très variables suivant les sols, et souvent assez faibles. [BARTLETT, RUBLE et THOMAS (1937), BROADBENT (1953), KELLEY et THOMAS (1942), OLSON et BRAY (1938)]. La capacité d'échange des matières organiques résiduelles, ainsi que celle des matières minérales peut être notablement modifiée par ce prétraitement à l'eau oxygénée.

Nous avons préféré la technique par calcination de longue durée à température modérée, utilisée successivement par MITCHELL (1932), puis TEDROW et GUILLAM (1941). Cette méthode analytique se prête beaucoup mieux à l'analyse en série.

Pour les échantillons de sols ferrallitiques traités, la calcination pendant 6 h à 350 °C au four à moufle, permet de détruire en moyenne 95 % des matières organiques des sols. Les taux de destruction sont même supérieurs à 97 % pour les horizons humifères de surface (A₁) de ces sols. Par ailleurs, les études réalisées par SCHNITZER et HOFFMAN (1964), sur la pyrolyse des matières organiques des sols, ont montré que les groupements fonctionnels carboxyles et hydroxyles, qui jouent un rôle majeur dans la capacité d'échange des matières organiques sont détruits à cette température. On peut donc raisonnablement penser que le complexe absorbant d'origine organique est complètement détruit par cette longue calcination à température modérée.

Inversement, la capacité d'échange de la fraction minérale de sols ferrallitiques n'est-elle pas modifiée par ce traitement ? L'expérience montre que, pour des échantillons de sols non humifères, à argile kaolinitique, la capacité d'échange n'est pas significativement changée. De plus, l'analyse thermique différentielle réalisée sur des échantillons préalablement calcinés à 350 °C, indique que si la goethite est détruite, par contre le pic endothermique de la kaolinite (570 °C) n'est pas modifié.

Nous remarquerons que pour d'autres types de sols contenant en particulier des argiles 2 : 1, cette méthode n'est pas valable. En effet, la capacité d'échange de ces minéraux argileux paraît modifiée par une calcination à 350 °C. Par exemple, pour une vermiculite présentant une capacité d'échange de 70 mé/100 g, la calcination à 350 °C entraîne une diminution de capacité d'échange de 12,5 mé/100 g, soit 18 %.

On doit cependant noter que cette calcination à température modérée entraîne toujours une certaine perte de poids, due à la destruction des matières organiques, au départ d'eau d'absorption et de l'eau retenue entre les feuillets des argiles. On en tiendra compte dans les calculs.

Enfin, cette méthode analytique est basée sur le principe d'additivité des capacités d'échange d'origine organique et d'origine minérale. Nous aurons l'occasion au chapitre 4 d'examiner plus en détail la valeur de cette hypothèse fortement controversée.

3.3. IMPORTANCE RELATIVE DU COMPLEXE ABSORBANT D'ORIGINE ORGANIQUE ET D'ORIGINE MINÉRALE

La diminution de capacité d'échange consécutive à la destruction de la matière organique ($T-T'$) des échantillons de sols est très élevée pour les horizons humifères de surface (A_1), spécialement pour les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue (tableau 9). En valeur relative, elle représente environ 60 % à 80 % du complexe absorbant de ces horizons de surface. Ces résultats rapportés dans le tableau 9 confirment par ailleurs les estimations réalisées au paragraphe 2.5 à partir des équations de régression linéaire multiple.

Pour les échantillons correspondant aux horizons A_3 , la diminution de capacité d'échange est de l'ordre de 25 à 50 % en valeur relative. Le complexe absorbant d'origine organique est donc moins important, mais il joue encore un rôle non négligeable.

Enfin, dans l'horizon B, la diminution de capacité d'échange devient très faible sinon négative (tableau 10). Nous aurons l'occasion de revenir sur ces derniers résultats ; mais on peut dire d'ores et déjà, que le complexe absorbant d'origine organique joue dans ces horizons B un rôle très limité.

3.4. CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES

Horizons A_1

Les capacités d'échange moyennes des matières organiques dans l'horizon A_1 des sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente sont respectivement de 135 mé/100 g de matière organique pour les sols sur schistes et 115 mé/100 g M.O. pour les sols sur granite. Pour les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue, la capacité d'échange des matières organiques est un peu plus importante, de l'ordre de : 150 mé/100 g de M.O. pour les sols sur schistes et 140 pour ceux sur granite.

Horizons A_3

Les valeurs moyennes obtenues pour la capacité d'échange des matières organiques sont respectivement de l'ordre de 210 et 160 mé/100 g M.O. pour les sols sous forêt dense humide sempervirente sur schistes et sur granite et de 240 et 165 mé/100 g M.O. sous forêt dense semi-décidue sur schistes et sur granite. Nous remarquerons cependant que le domaine de variation devient relativement étendu et l'on peut mettre en doute la représentativité de ces valeurs moyennes.

Précision de la méthode

Cette dispersion des résultats, spécialement pour les horizons A_3 , correspond-elle à une grande hétérogénéité de ces matières organiques du point de vue de leur capacité d'échange ? C'est peu probable, car par ailleurs les caractéristiques des matières organiques varient assez peu. Par contre, un calcul des erreurs probables de dosage, montre que ces variations peuvent être attribuées aux erreurs expérimentales aléatoires.

TABLEAU 9

MESURES DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES PAR DIFFÉRENCE
AVANT ET APRÈS CALCINATION À 350° PENDANT SIX HEURES

Horizons A₁

Sols ferrallitiques	Roche mère	Valeurs moyennes (domaine de variations)				Nombre d'échantillons analysés
		$T - T'$ mé	$\frac{T - T'}{T} \times 100$ %	$C - C'$ ‰	T. des Mat. organiques mé/100 g C	
Sous forêt dense humide sempervirente	Schistes	4,6 (2,1-6,3)	79 (65-88)	20,3 (10-35)	230 (170-290)	12
	Granite	4,3 (1,7-9,6)	59 (40-82)	21,5 (7,0-52)	200 (125-300)	33
Sous forêt dense semi-décidue	Schistes	9,5 (3,0-25)	62 (45-85)	37 (12-110)	260 (192-380)	17
	Granite	6,4 (1,9-12)	62 (39-76)	26 (9,5-100)	245 (110-310)	27
Horizons A₃						
Sous forêt dense humide sempervirente	Schistes	1,9 (1,0-3,3)	52 (24-80)	5,0 (3,1-6,4)	380 (190-560)	8
	Granite	1,4 (0,2-2,5)	31 (13-65)	5,2 (1,4-9,7)	270 (120-560)	33
Sous forêt dense semi-décidue	Schistes	3,0 (0,2-10)	38 (5-64)	7,0 (2,1-25)	410 (170-770)	15
	Granite	1,3 (0,5-3,2)	25 (6-55)	4,7 (2,0-10)	280 (80-470)	30

T et T' , C et C' correspondent à la capacité d'échange et à la teneur en Carbone des échantillons de sols avant et après calcination à température modérée.

En effet, l'erreur standard sur chaque mesure de capacité d'échange est de l'ordre de : 0,3 mé pour des échantillons présentant une capacité d'échange de l'ordre de 6 mé/100 g. L'erreur standard sur chaque mesure de la teneur en carbone est de l'ordre de 0,3 ‰ pour des teneurs moyennes observées dans l'horizon A₃. Donc l'erreur standard sur la capacité d'échange des matières organiques dans l'horizon A₃ est de : $\sigma = 90$ mé/100 g de C. Par conséquent, pour ces horizons A₃, des variations inférieures à $\pm 2\sigma = \pm 180$ mé/100 g C peuvent être le fait des erreurs aléatoires de mesure. Pour les horizons A₁, l'intervalle de confiance est nettement plus réduit : $\pm 2\sigma = \pm 60$ mé/100 g C.

En d'autres termes, la mesure par différence, de la capacité d'échange des matières organiques de ces sols, nous donne une estimation relativement moyenne pour les horizons humifères de surface A_1 , et une estimation très médiocre pour les horizons A_3 .

3.5. RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES ET LES TENEURS EN MATIÈRES ORGANIQUES

Horizon A_1

Les différences de capacité d'échange ($T-T'$), avant et après calcination à 350 °C, sont liées étroitement aux teneurs en matières organiques détruites ($C-C'$). Les coefficients de corrélation sont élevés et très significatifs (tableau 10).

TABLEAU 10

RELATION ENTRE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES ET LES TENEURS EN MATIÈRES ORGANIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS DE COTE D'IVOIRE

Horizon humifère de surface (A_1)

Forêt	Roche mère	($T-T'$) moy. mé	($C-C'$) moy.	Equations de régressions	r	Nombre d'éch.
dense humide sempervirente	Schistes et granite	4,51	21,61	$(T-T') = 0,547 + 0,184(C-C')$ ($\pm 0,094$)	0,804 ***	45
dense semi-décidue	Schistes et granite	7,44	29,55	$(T-T') = 0,500 + 0,235(C-C')$ ($\pm 0,075$)	0,973 ***	44
Horizon de pénétration humifère (A_3)						
dense humide sempervirente	Schistes et granite	1,38	5,30		0,30 NS	39
dense semi-décidue	Schistes et granite	1,64	5,21	$T-T' = 0,032 + 0,309(C-C')$ ($\pm 0,226$)	0,54 ***	42
Horizon B						
dense humide sempervirente	Schistes et granite	0,20	3,53	$T-T' = 0,276 C - 0,774$ ($\pm 0,263$)	0,40 **	41
dense semi-décidue	Schistes et granite	0,32	2,63	$T-T' = 0,466 C - 1,544$ ($\pm 0,388$)	0,59 ***	30

N.B. — T et T' correspondent respectivement à la capacité d'échange (en mé/100 g de sol) avant et après calcination à 350 °C, pendant 6 h. C et C' sont les teneurs en carbone (‰) également avant et après calcination.

Le coefficient angulaire de la droite de régression de $(T-T')$ en fonction de $(C-C')$ est identique au coefficient obtenu précédemment pour les équations de régression multiple (tableau 8) en ce qui concerne les sols sous forêt dense humide sempervirente. Il paraît un peu plus faible que précédemment (tableau 8) pour les sols sous forêt dense semi-décidue. Mais la capacité d'échange des matières organiques des sols sous forêt dense semi-décidue reste cependant nettement supérieure à celle des sols sous forêt dense humide sempervirente.

Horizons A₃ et B

Les relations entre la capacité d'échange due aux matières organiques et les teneurs en matières organiques sont très lâches, sinon inexistantes. En effet, les coefficients de corrélation qui s'échelonnent entre 0,3 et 0,6 ne sont pas toujours significatifs. Les coefficients angulaires des droites de régression sont nettement plus élevés que pour les horizons A₁, mais les estimations de ces coefficients sont très médiocres (tableau 10).

Cette imprécision peut être attribuée à l'imperfection des méthodes analytiques qui ne permettent pas d'apprécier correctement (paragraphe 3.4) les variations minimales de la capacité d'échange de ces échantillons faiblement ou très faiblement humifères. Nous noterons cependant que la capacité d'échange après calcination à 350 °C est parfois légèrement supérieure à celle des échantillons originaux, en particulier pour les échantillons d'horizon B, et $(T-T')$ devient alors négatif. Ce fait ne peut pas toujours s'expliquer par l'accumulation des erreurs, car, d'une part, cette différence négative demeure lorsque l'on répète les dosages, d'autre part, cette différence peut être nettement supérieure à quatre fois l'erreur standard sur le dosage des capacités d'échange (cas le plus défavorable).

Ces résultats mettent en doute l'hypothèse de stricte additivité des capacités d'échange d'origine organique et minérale, que nous avons implicitement admise au départ. Nous aurons l'occasion, au paragraphe 4 de discuter de leur signification.

3.6. CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE LA FRACTION MINÉRALE DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS IVOIRIENS

T' , capacité d'échange des échantillons calcinés à 350 °C pendant 6 h, correspond théoriquement à la capacité d'échange de la fraction minérale de ces sols, puisque le complexe absorbant d'origine organique a été détruit.

Sur le tableau 11, sont portées les valeurs moyennes obtenues, ainsi que les équations de régression multiple de T' en fonction des taux d'argile (0-2 μ) et de limon fin (2 à 20 μ).

— L'ARGILE

En moyenne, les sols ferrallitiques fortement désaturés en (B) sous forêt dense sempervirente ne sont pas plus appauvris en argile que les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue (tableau 11).

Nous constatons par ailleurs (tableau 12), que T' est lié d'une manière significative aux taux d'argile. Toutefois, les coefficients de corrélation entre T' et A ne deviennent très élevés que dans l'horizon A₃. Pour ces derniers, la capacité d'échange de l'argile serait de l'ordre de 9 mé/100 g d'argile pour les sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente et de 11 mé/100 g d'argile pour les sols sous forêt dense semi-décidue.

TABLEAU 11. — CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE LA FRACTION MINÉRALE DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS DE CÔTE D'IVOIRE

Sols ferrallitiques	Horizons	Nombre d'échant.	Valeurs moyennes			Equations de régression multiple (domaine de variation des coefficients)
			T' mé/100 g	A %	Lf %	
Sous forêt dense humide sempervirente	A ₁	45	2,49	18,30	6,91	$T' = 0,959 + 0,048 A + 0,095 L$ ($\pm 0,035$) ($\pm 0,076$)
	A ₃	39	3,35	28,78	7,31	$T' = 0,197 + 0,091 A + 0,075 L$ ($\pm 0,018$) ($\pm 0,053$)
	B	40	5,18	43,37	11,48	$T' = 2,592 + 0,045 A + 0,055 L$ ($\pm 0,031$) ($\pm 0,053$)
Sous forêt dense semi-décidue	A ₁	44	4,23	17,46	9,64	$T' = 0,139 + 0,158 A + 0,138 L$ ($\pm 0,083$) ($\pm 0,101$)
	A ₃	41	3,79	28,84	6,99	$T' = 0,615 + 0,110 A$ ($\pm 0,054$)
	B	31	6,54	35,57	9,44	$T' = 4,976 + 0,044 A$ ($\pm 0,039$)

T' est la capacité d'échange des échantillons de sols calcinés à 350° pendant 6 h.

TABLEAU 12. — ANALYSE DES RÉGRESSIONS PARTIELLES ET MULTIPLES DE LA CEC DES MATIÈRES MINÉRALES DES SOLS FERRALLITIQUES FORESTIERS

Forêts	Horizon	Nbre d'éch.	Régression simple en A			Régression simple en L			r_{AL}	Régression multiple AL			
			$r_{T', A}$	Coef. dét.	FT_A	$r_{T', L}$	Coef. dét.	FT', L		Coef. dét. $T'(AL)$	$FT', (AL)$	$FT', A-L$	$FT', L-A$
dense humide sempervirente	A ₁	45	0,59 ***	0,34	23,5 ***	0,58 ***	0,33	22,2 ***	0,58 **	0,41	16,31 ***	6,21 *	7,23 *
	A ₃	39	0,85 ***	0,71	95,5 ***	0,32 *	0,08	4,2 *	0,11 NS	0,76	61,28 ***	106,4 ***	8,29 **
	B	40	0,46 **	0,19	10,31 **	0,36 *	0,11	5,81 *	0,17 NS	0,26	7,83 **	4,43 *	8,67 **
dense semi-décidue	A ₁	44	0,54 ***	0,27	17,0 ***	0,43 ***	0,16	9,3 **	0,18 NS	0,37	13,61 ***	7,59 **	14,85 ***
	A ₃	41	0,91 ***	0,82	17,6 ***	0,10 NS	—	—	0,004 NS	—	—	—	—
	B	31	0,53 **	0,25	11,2 **	-0,017 NS	—	—	-0,017 NS	—	—	—	—

Nous remarquerons que, même pour l'horizon A_3 de ces derniers sols, la capacité d'échange liée à l'argile reste inférieure à 16 mé/100 g d'argile avec une probabilité de 95 %. Par contre, elle peut être plus élevée pour les horizons humifères de surface des sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue. Ce phénomène déjà constaté précédemment (2.4) n'a encore pu être expliqué par l'analyse minéralogique des argiles contenues dans ces horizons de surface ; il est peut-être dû à la présence, à l'état de traces, de minéraux micacés qui ont résisté à l'altération.

Dans les horizons B, la capacité d'échange liée à la fraction argileuse est nettement plus faible : 4,5 mé/100 g d'argile (± 4). Toutefois, une fraction importante du complexe minéral n'est pas liée linéairement aux taux d'argile, puisque le terme constant est relativement élevé, spécialement pour les horizons B de sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue. Bien que les corrélations entre T' et A ne soient pas très étroites, les tests de linéarité montrent que la relation existant entre ces variables est linéaire. On peut donc conclure qu'une partie seulement de la capacité d'échange de la fraction minérale de l'horizon B de ces sols est proportionnelle au taux d'argile granulométrique. Une fraction plus importante est liée à d'autres facteurs. La fraction limoneuse, comme nous le verrons, paraît présenter une certaine capacité d'échange, mais elle est peu importante. On est donc obligé d'admettre que les sables et pseudosables jouent un rôle important dans la capacité d'échange cationique des horizons B de ces sols ferrallitiques forestiers spécialement sous forêt dense semi-décidue.

— LIMONS FINS

Les taux de limons fins (2 à 20 μ) sont relativement faibles dans les horizons A_3 et B, puisque le rapport L_f/A est voisin de 0,25 ; par contre, il est proportionnellement plus élevé dans l'horizon de surface A_1 . Les liaisons entre la capacité d'échange des échantillons calcinés (T') et les taux de limons fins sont en général nettement plus faibles que pour l'argile et même parfois apparemment inexistantes (horizons A_3 et B sous forêt dense semi-décidue). Lorsqu'il existe une corrélation significative entre T' et L , l'équation de régression multiple en fonction des teneurs en A et L fournit une meilleure estimation de T' que l'équation de régression simple en fonction de A %. Mais le domaine de variation du coefficient de l'équation fonction du taux de limon est très large.

L'importance relative de ces deux fractions granulométriques du point de vue de la capacité d'échange de la partie minérale de ces sols ferrallitiques forestiers, reste cependant très inégale (fig. 6). En effet les estimations de la capacité d'échange des limons sont en général plus faibles que celles de l'argile ; et surtout le taux de limons est nettement inférieur au taux d'argile dans le cas de ces sols ferrallitiques.

En conclusion, la capacité d'échange de la fraction minérale des différents horizons de ces sols ferrallitiques ne paraît dépendre d'une manière étroite du taux d'argile granulométrique, que dans l'horizon A_3 . Dans l'horizon B, souvent utilisé comme « horizon diagnostic », il n'en n'est pas de même apparemment.

Dans ce dernier horizon, une fraction plus ou moins importante de la capacité d'échange est liée à autre chose que l'argile granulométrique ordinaire. Il est possible que les équations de régression avec le taux d'argile maximum (après extraction du fer libre par exemple, et dispersion de l'argile contenue dans les pseudosables) montre une meilleure dépendance vis-à-vis de cette fraction granulométrique. Mais il apparaît nettement que pour l'horizon B de ces sols, ferrallitiques, l'utilisation du rapport T'/A ne permet pas une caractérisation correcte de la fraction argileuse, si A correspond au taux d'argile d'une granulométrie ordinaire.

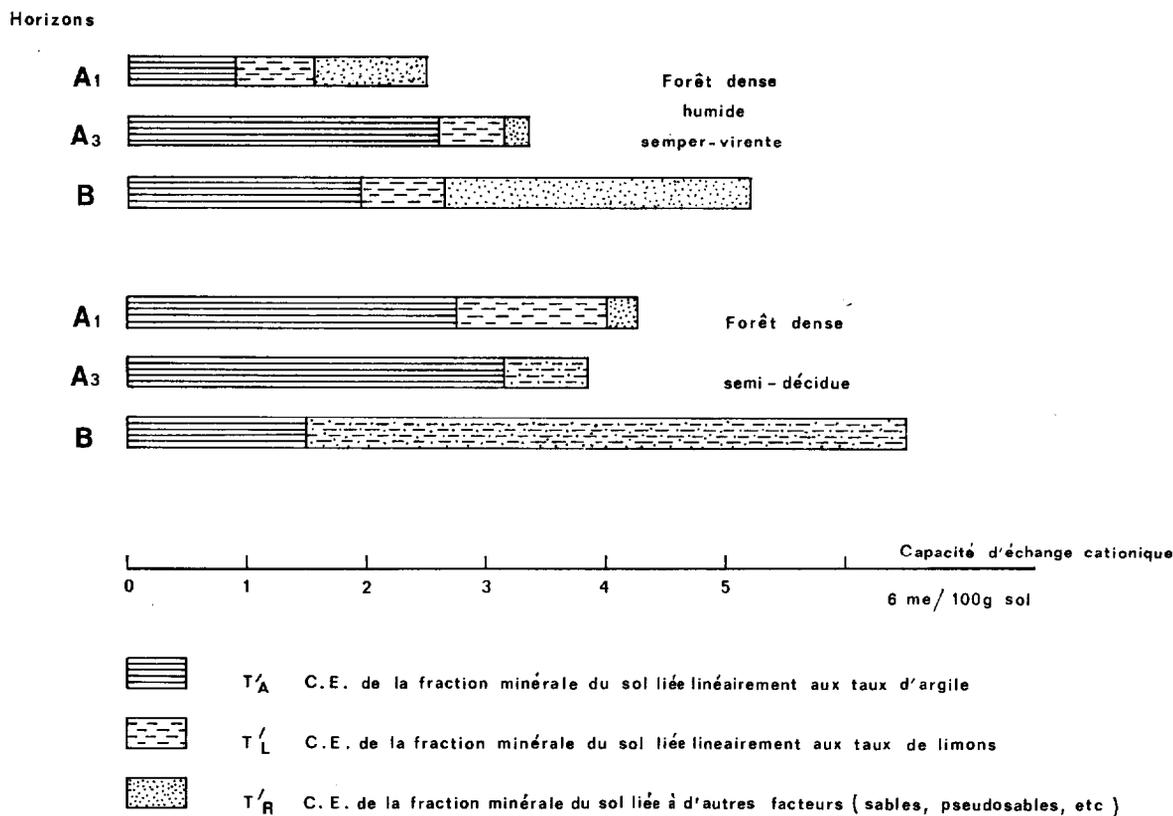


FIG. 6. — Complexe absorbant moyen de la fraction minérale des sols ferrallitiques forestiers ivoiriens.

4. REMARQUES SUR L'ADDITIVITÉ DES CAPACITÉS D'ÉCHANGE DES MATIÈRES ORGANIQUES ET MINÉRALES DES SOLS

Dans les deux méthodes d'investigation utilisées pour déterminer la part des matières organiques et des matières minérales dans le complexe d'échange de ces sols ferrallitiques forestiers, nous avons supposé, implicitement, que les capacités d'échange de ces deux fractions du sol étaient strictement additives.

On sait cependant que les propriétés des complexes argilo-humiques ne résultent pas de la simple juxtaposition des propriétés respectives de l'argile et de l'humus (BARBIER, 1935). En particulier, la capacité d'échange des sols ne serait pas strictement égale à la somme des capacités d'échange des matières organiques et des matières minérales, mais plus ou moins nettement inférieure.

Suivant la technique utilisée pour réaliser les complexes organo-minéraux « in vitro », et suivant les proportions relatives des constituants, la diminution de capacité d'échange par rapport à la somme théorique est plus ou moins importante. [BARBIER (1935), MYERS (1937), MCMEAN (1952), ARCHIBALD et ERICKSON (1955), GAUR (1964), SEN (1964), HELLING, CHESTERS et COREY (1964)]. Toutefois SAKUM

(1942), TSAPECK et SAKUM (1944), ALEKSANDROVA et NAD (1958) indiquent qu'il n'y aurait pas de baisse de la capacité d'échange lorsque les acides humiques et les suspensions argileuses sont mélangées.

Aucun auteur à notre connaissance, ne paraît cependant avoir démontré cette absence d'additivité pour les sols naturels. Seul RENGER (1965) a pu indiquer grâce à l'analyse statistique de régressions multiples non linéaires, pour des sols de marais, qu'il existait des interactions significatives entre les capacités d'échange dues aux matières organiques et à l'argile. Le coefficient du terme fonction de (M.O. % \times A %) est bien négatif et hautement significatif dans le cas de trois types de sols sur quatre. Toutefois, la diminution de capacité d'échange due à cette interaction est en général assez faible. Elle est en moyenne inférieure à 6 % de la capacité d'échange totale pour deux types de sols, et n'atteint 13 % que dans un seul cas.

WILDING et RUTLEDGE (1966) ont également essayé d'estimer l'influence des complexes organominéraux en ajoutant dans les équations de régression multiple divers termes explicitant ces interactions entre l'argile et les matières organiques. Ces auteurs signalent que les équations obtenues ne sont pas plus significatives, et les coefficients de détermination R^2 ne sont pas plus élevés.

Nous avons recherché dans le cas des sols étudiés, s'il existe une interaction significative entre l'influence des facteurs contrôlés (teneur en argile et en carbone) du point de vue de la capacité d'échange du sol. Un double exemple de comparaison de la variance¹ due à l'interaction (ou non linéaire)

TABLEAU 13

ANALYSE DE LA VARIANCE DUE À L'INTERACTION ET DE LA VARIANCE RÉSIDUELLE
POUR LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES SOLS FERRALLITIQUES SOUS FORÊT SEMI-DÉCIDUE SUR GRANITE

Horizons	Source de variations	Degrés de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F
A ₁	Interaction (ou non-linéarité)	$p-3 = 13$	$SCE_{ni} = 6,150$	$V_{ni} = 0,473$	$F_{ni} = 0,52$
	Variabilité résiduelle	$n-p = 81$	$SCE_r = 73,166$	$V_r = 0,903$	NS
A ₃	Interaction (ou non-linéarité)	$p-3 = 10$	$SCE_{ni} = 0,771$	$V_{ni} = 0,077$	$F_{ni} = 0,026$
	Variabilité résiduelle	$n-p = 39$	$SCE_r = 115,109$	$V_r = 2,952$	NS

et de la variance résiduelle est donné ci-dessous dans le cas de populations d'échantillons de sols provenant des horizons A₁ et des horizons A₃ des sols ferrallitiques sous forêt semi-décidue sur granite (régression linéaire donnée au paragraphe 2.4.).

La variance résiduelle est beaucoup plus importante que la variance due à l'interaction. Ceci ne prouve pas qu'il n'existe pas d'interaction, mais la variabilité résiduelle non contrôlée, fonction en particulier des erreurs de mesure, est telle, qu'il n'est pas possible d'apprécier l'influence de cette éventuelle interaction.

¹ La technique de calcul statistique utilisée pour l'analyse de la variance, dans ces cas non orthogonaux, est celle donnée par les auteurs suivants :

RAO C.R., 1965 — Linear Statistical inference and its application. Ed. John Wiley.

DAGNELIE P., 1966 — La régression multiple. *Biométrie-Praximétrie*, Vol. 7, n° 4.

DAGNELIE P., 1970 — Théories et méthodes statistiques. Ed. Duclot-Gembloux.

Nous remercions vivement Mr L. BELLIER (Maître de Recherches au Laboratoire d'Ecologie du Centre ORSTOM d'Adiopoumé, Côte d'Ivoire) pour les nombreux conseils qu'il nous a donnés pour l'analyse statistique de ces données.

Nous avons cependant noté (paragraphe 3.5.) que la capacité d'échange de certains échantillons peu humifères, calcinés à 350 °C était parfois supérieure à la capacité d'échange des échantillons initiaux. Cette constatation déjà faite par JACQUES-FÉLIX et BETREMIEUX (1949), ainsi que LAUDELOUT et d'HOORE (1949), également sur des sols tropicaux, mais après traitement par H_2O_2 , nous conduit à l'hypothèse suivante :

Un certain nombre de charges négatives du complexe absorbant de ces sols seraient initialement masquées par les liaisons entre les argiles et les matières organiques :

— Les grandes molécules organiques, maintenues au contact des minéraux argileux par des forces d'adsorption physiques (forces de Van der Waals), peuvent bloquer des sites d'échange [MCLEAN (1952)] et/ou les rendre inaccessibles aux cations minéraux ;

— ou bien, les molécules organiques sont liées aux argiles par des ponts cationiques (cations bi-ou trivalents) [MYERS (1937), SEN (1960)] ce qui entraîne une diminution de la capacité d'échange des sols dans la mesure où ces cations qui servent de liaison ne sont plus facilement échangeables.

Lorsque les matières organiques sont détruites par calcination à température modérée (ou par l'eau oxygénée), le complexe absorbant d'origine organique est effectivement détruit ; mais un certain nombre de sites d'échange du complexe absorbant d'origine minérale sont libérés. Dans le cas de ces échantillons de sols très faiblement humifères, on peut penser que la charge négative des composés organiques peut être inférieure à la fraction de la charge des composés organiques et minéraux, initialement bloquée par les liaisons entre ces deux types de composés des sols.

Pour les échantillons des sols plus riches en matière organiques, il est fort probable qu'il existe également une interaction entre les composés organiques et minéraux des sols, qui réduit la capacité d'échange du sol. Les évaluations qui ont été réalisées précédemment, soit par l'étude des régressions linéaires multiples, soit par la méthode analytique par différence, ne tiennent pas compte de ces interactions possibles. Les chiffres obtenus pour la capacité d'échange des matières organiques sont donc probablement entachés d'une certaine erreur par défaut.

Ces interactions entre matières organiques et argiles ne sont pas les seules à intervenir pour réduire la capacité d'échange totale des sols. La fixation sur les argiles de polymères d'hydroxydes d'alumine et/ou de fer d'une part, la formation de chélates avec des composés humiques d'autre part, peuvent être également la cause d'une nette diminution de la capacité d'échange des constituants minéraux et organiques des sols.

Les relations existant entre la capacité d'échange cationique apparente d'un échantillon de sol et les capacités d'échange potentielles de ses constituants organiques et minéraux, apparaissent donc comme complexes. Il paraît difficile et quelque peu arbitraire de vouloir préciser très exactement le rôle respectif des constituants organiques et minéraux dans le complexe absorbant du sol.

A la faveur de ces remarques, il apparaît donc que les estimations qui sont rapportées dans la présente note, rendent compte simplement du rôle apparent des complexes absorbant d'origine organique et minérale. Par contre, la capacité d'échange potentielle de l'humus et de la fraction argileuse de ces sols ferrallitiques forestiers n'ont pu être précisées exactement.

CONCLUSIONS

Les sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire peuvent être divisés du point de vue de leur humus en deux types nettement différents qui correspondent aux deux zones écologiques de la forêt dense humide sempervirente en basse Côte d'Ivoire, et de la forêt dense semi-décidue en moyenne Côte d'Ivoire.

Quand on passe de la première zone à la seconde, le climat devient moins pluvieux avec une saison sèche plus marquée et le bilan de l'humification dans les sols se modifie. Les matières organiques des sols deviennent plus abondantes et plus évoluées. Le rapport C/N décroît, le taux d'humification est un peu plus élevé, le pourcentage d'acides fulviques diminue et le taux d'acides humiques gris augmente. Ces matières organiques plus polymérisées possèdent une capacité d'échange significativement supérieure. A ces différences qualitatives, il convient d'ajouter l'aspect quantitatif. Les teneurs en matières organiques des sols sous forêt dense humide sempervirente sont nettement plus faibles que sous forêt dense semi-décidue. Il en résulte donc au total, que pour l'horizon humifère de surface (A_1), le complexe absorbant d'origine organique des premiers est en moyenne deux fois plus faible que celui des seconds.

Le complexe absorbant d'origine minérale des horizons supérieurs de ces sols ferrallitiques est, par contre, assez voisin. Malgré un drainage très différent¹, l'appauvrissement en argile des horizons humifères n'est guère plus marqué pour les sols de basse Côte d'Ivoire qu'en moyenne Côte d'Ivoire. La capacité d'échange de la fraction argileuse serait légèrement plus élevée pour les seconds ; mais au total, le complexe absorbant d'origine minérale joue un rôle très modeste dans les horizons supérieurs A_1 de ces sols ferrallitiques.

Pour les horizons de pénétration humifère A_3 , les deux méthodes d'investigation utilisées ne permettent pas d'estimer avec précision la capacité d'échange des matières organiques. Il semble qu'elle soit un peu supérieure à celle des matières organiques de l'horizon A_1 ; mais malgré tout, c'est le complexe absorbant d'origine minérale qui joue déjà un rôle prédominant. La capacité d'échange de l'argile est voisine de 10 mé/100 g d'argile.

Enfin, dans l'horizon B de ces sols ferrallitiques, le rôle joué par les matières organiques est apparemment très faible et même parfois négatif du fait des interactions entre les complexes absorbants d'origine organique et minérale. La fraction argileuse qui est ici maximum joue un rôle très important. Cependant une partie non négligeable du complexe absorbant d'origine minérale ne paraît pas liée linéairement aux taux d'argile granulométrique et de limons fins, spécialement pour les sols ferrallitiques sous forêt dense semi-décidue. Il est fort probable que les pseudosables, qui sont plus abondants dans ces sols, possèdent une capacité d'échange non négligeable.

Les complexes absorbants des différents horizons de ces sols ferrallitiques forestiers sont plus ou moins saturés en bases. Ici encore la distinction déjà faite en fonction des deux zones écologiques reste nette.

Tandis que sous forêt dense humide sempervirente, les sols possèdent des horizons humifères A_1 faiblement saturés, avec une réaction fortement acide, au contraire, sous forêt dense semi-décidue, le

1 L'indice de drainage calculé d'Hénin-Aubert passe de 750 à 450 mm/an pour des sols de perméabilité moyenne.

complexe absorbant pourtant beaucoup plus important est le plus souvent presque saturé. Le pH est alors en général voisin de 6 ou supérieur.

Le stockage des cations au niveau des horizons humifères est très limité dans le cas des sols forestiers de basse Côte d'Ivoire. Les cations provenant de la minéralisation des débris végétaux qui tombent sur le sol, sont rapidement utilisés à nouveau par les plantes ou lixiviés en pure perte. Au contraire en moyenne Côte d'Ivoire, il existe un stockage important de cations minéraux dans l'horizon humifère de surface et l'on peut dire que la remontée biologique l'emporte sur la lixiviation des bases.

La somme des bases échangeables diminue plus fortement que la capacité d'échange, lorsque l'on passe de l'horizon A_1 à l'horizon A_3 , si bien que le taux de saturation est nettement plus faible dans ce dernier horizon. Pour les sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente, le taux de saturation dans l'horizon A_3 est même souvent plus faible que dans l'horizon B ; et l'on peut dire que cet horizon est véritablement un horizon lixivié.

Dans l'horizon B des sols ferrallitiques de basse Côte d'Ivoire, les taux de saturation sont encore très faibles (sols fortement désaturés en (B)) ; en moyenne Côte d'Ivoire par contre, le taux de saturation en (B) est très variable.

En résumé, l'importance du complexe absorbant d'origine organique dans les horizons humifères de ces sols ferrallitiques forestiers ivoiriens, et la saturation en base de ce complexe, apparaissent donc comme un phénomène zonal. Par contre, la désaturation de l'horizon B ne paraît pas liée strictement au climat actuel.

Le gradient du pH en fonction de la profondeur (fig. 3), qui est croissant dans le cas des sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente et décroissant sous forêt dense semi-décidue, donne un schéma global du bilan des processus antagonistes d'une part de minéralisation et d'humification, d'autre part de lixiviation des bases et de remontée biologique.

Manuscrit déposé le 29 octobre 1970

BIBLIOGRAPHIE

- ABRUNA-RODRIGUEZ (F.), VICENTE CHANDLER (J.), 1955 — Organic matter activity of some typical soil of Puerto-Rico. *J. Agric. Univ. Puerto-Rico*, XXXIX, 2, pp. 65-76.
- ALEKSANDROVA (L.N.), NAD (M.), 1958 — The nature of organo-mineral colloids and methods for their studies. *Sov. Soil Sci.*, 10, pp. 1100-1105.
- ARCHIBALD (J.A.), ERICKSON (A.E.), 1955 — Cation exchange properties of a number of clay-conditionner systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 19, pp. 444-446.
- AUBERT (G.), SEGALIN (P.), 1966 — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 4, pp. 97-112.
- BARBIER (G.), 1935 — Influence des colloïdes humiques sur certaines propriétés chimiques des terres argileuses. *Ann. agron.*, pp. 765-780.
- BARSHAD (I.), ROJAS-CRUZ (L.A.), 1950 — A pedologie study of a Podzol-soil profile from the equatorial region of Columbia, South-America. *Soil Sci.*, 70, pp. 221-236.
- BARTLETT (J.B.), RUBLE (R.W.), THOMAS (R.P.), 1937 — The influence of hydrogen peroxyde treatments on the exchange capacity of Maryland soils. *Soil Sci.*, XLIV, pp. 123-138.
- BOISSEZON (P. de), LATHAM (M.), PERRAUD (A.), RIEFFEL (J.M.), RICHE (G.), 1967-1968 — Etude pédologique des zones vulnérables de Labbé, Irobo, Comoé, Port-Gauthier, Niègre, Tiassalé, Gagnoa, Gregbé, Bouafié, Oumé, Cechi, Béki.

- BROADBENT (F.E.), 1954 — Modification in chemical properties of straw during decomposition. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18, pp. 165-169.
- DAVIES (B.E.), DAVIES (R.I.), 1965 — Changes in exchangeable cations and exchange capacity of soil consequent on oxidation of its organic matter. *J. agric. Sci.*, 65, 2, pp. 241-243.
- ENDREY (A.S. de), QUAGRAINE (K.A.), 1960 — A comprehensive study of cation exchange in tropical soils. *Congr. Int. Sci. Sol.*, 7, 1960. Madison, vol. II, pp. 312-320.
- FLAIG (Dr W.), BEUTELSPACHER (Dr H.), SOCHING (H.), 1954 — Humus als Kationenaustaucher. Potassium symposium. 2. 1954, Zurich, Inst. int. Potasse, Berne, pp. 81-105.
- GAUR (A.C.), 1964 — Influence de l'acide humique et de la paille de blé en décomposition sur la capacité d'échange de cations du sol. *Bull. A.F.E.S.*, n° 6, pp. 266-270.
- HALLSWORTH (E.G.), WILKINSON (G.K.), 1958 — The contribution of clay and organic matter to the cation exchange capacity of the soil. *J. agric. Sci.*, 51, 1, pp. 1-3.
- HELLING (C.S.), CHESTERS (G.), COREY (R.B.), 1964 — Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 4, pp. 517-520.
- JACQUES-FELIX (H.), BETREMIEUX (R.), 1949 — Etude de quelques sols tropicaux. *Conf. Afr. Sols.* 1948. Goma. *Bull. agric. Congo belge*, XL, 1, pp. 171-192.
- KELLEY (C.W.), THOMAS (R.P.), 1942 — A method of estimating the organic exchange complex of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 7, pp. 201-206.
- LAUDELOUT (H.), D'HOORE (J.), 1949 — Influence du milieu sur les matières organiques en relation avec la microflore du sol de la région de Yangambi. *Publ. INEAC, Série Sci.*, n° 44. Bruxelles, 32 p.
- DE LEENHEER (L.), DE BOODT (M.), WELVAERT (W.), 1950 — La détermination de la capacité d'échange de la fraction minérale et organique des sols des polders marins belges. *Congr. Int. Sci. Sol.* 4. 1950. Amsterdam, vol. I, pp. 129-132.
- LOUE (A.), 1964 — Etude sur les principales caractéristiques en particulier sur les teneurs en cations échangeables et sur la capacité d'échange de quelques sols de Touyas. *Bull. A.F.E.S.*, n° 1, pp. 44-59.
- MCGEORGE (W.T.), 1930 — The base exchange properties of organic matter in soils. *Arizona agric. Expt. Sta. Tech. Bull.*, 30, pp. 181-213.
- MCLEAN (E.O.), 1952 — The effect of humus on cationic interactions in a Beidellite clay. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16, 2, pp. 134-137.
- MITCHELL (J.), 1932 — Origin, nature and importance of soil organic constituents having base exchange properties. *J. Amer. Soc. Agron.*, 24, pp. 256-275.
- MYERS (H.E.), 1937 — Physico-chemical reactions between organic and inorganic soil colloids as related to aggregate formation. *Soil Sci.*, 44, pp. 331-359.
- OLLAT (C.), COMBEAU (A.), 1960 — Méthodes de détermination de la capacité d'échange et du pH d'un sol. Relation entre le complexe absorbant et le pH. *Sols Afr.*, V, 3, pp. 343-380.
- OLSON (L.C.), BRAY (R.H.), 1938 — The determination of the organic base exchange capacity of soils. *Soil Sci.*, XLV, pp. 483-496.
- PELLOUX (P.), 1963 — Méthodes de détermination des cations échangeables : de la capacité d'échange dans les sols courants, calcaires ou non, mais ni salés ni gypseux. *ORSTOM. C.S.T., Bondy*, 55 p. *multigr.*
- PERRAUD (A.), 1970 — Note sur les différents types d'humus des sols ferrallitiques forestiers de la Côte d'Ivoire. *C.R. Acad. Sci.*, t. 270, pp. 1302-1305.
- PRATT (P.F.), 1957 — Effect of fertilizers and organic materials on the cation-exchange capacity of an irrigated soil. *Soil Sci.*, 83, 2, pp. 85-89.
- RENGER (M.), 1965 — Berechnung der Austauschkapazität der organischen und anorganischen Anteile der Boden. *Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkunde*, 110, 1, pp. 10-26.
- RICARDO (Rui Pinto), 1961 — Características dos Ácidos Húmicos de Alguns solos de Angola. *Junta de investigações do Ultramar. Estudos, Ensaios e documentos n° 87.* Lisboa, 89 p.
- RUSSEL (J.S.), 1961 — Soil fertility changes in the longterm experimental plots at Kybybolite, South Australia. III. Changes in cations exchange capacity and exchangeable cations. *Aust. J. agric. Res.*, 12, 2, pp. 273-285.
- SAKUN (N.E.), 1942 — The interaction of humate with the mineral portion of soil. *Pochvovedenie*, n° 8, pp. 3-20.

- SCHNITZER (M.), HOFFMAN (I.), 1964 — Pyrolysis of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 4, pp. 520-525.
- SCHULZ-SCHOMBURGK (K.), 1954 — Influencia de la materia organica sobre el intercambio ionico en los suelos del Llano. *Agro. trop. Maracay*, 4, pp. 69-79.
- SEN (B.C.), 1960 — Studies on base exchange capacities of clay-humic acid mixture. *Indian J. appl. Chem.*, 23, pp. 145-149.
- SEN (B.C.), 1960 — Studies on the adsorption of humic acids on H-clays and the role of metal cation on humus adsorption. *J. Indian chem. Soc.*, 37, pp. 793-797.
- SEN (B.C.), 1964 — The effect of different constituents of soil humic acids on the formation of clay-humus complexes. *J. Indian. chem. Soc.*, 41, pp. 145-149.
- STEPHENS (F.R.), 1969 — Source of cation exchange capacity and water retention in Southeast Alaskan Spodosols. *Soil Sci.*, 6, pp. 429-431.
- TEDROW (J.C.F.), GUILLAM (W.S.), 1941 — The base exchange capacity of the organic and inorganic fractions of several podzolic soil profiles. *Soil Sci.*, 51, pp. 222-233.
- TSCHAPEK (M.W.), SAKUN (N.E.), 1944 — Interaction of humates with soil minerals. *Kolloid Zh.*, 107, pp. 41-55.
- WILDING (L.P.), RUTLEDGE (E.M.), 1966 — Cation-exchange capacity as a function of organic matter, total clay and various clay fractions in a soil toposequence. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 6, pp. 782-785.