

P. de BOISSEZON*

les matières organiques des sols ferrallitiques

Introduction

« Un des caractères généraux des sols ferrallitiques est de posséder une teneur généralement faible en matière organique et surtout en humus ; et l'absence d'humus grossier (AUBERT, 1954). Ces sols ont un humus à décomposition rapide souvent appelé " mull " et dans certains cas " crypto-mull ", malgré les caractères qui les différencient de cette forme d'humus : celle-ci en reste la plus proche parmi toutes celles qui ont été définies jusqu'à présent. Il paraît plus exact d'indiquer seulement que cet humus est bien évolué et provient d'une décomposition rapide de la matière organique (AUBERT, 1964). Cette décomposition de la matière organique est poussée et celle-ci est très liée à la matière minérale (AUBERT-SEGALEN, 1966). »

Cette définition de la matière organique des sols ferrallitiques qui a été précisée au fil des ans, recouvre la grande majorité des humus de ces sols. Toutefois dès le départ, les pédologues ont observé un certain nombre d'exceptions. Certains sols ferrallitiques sont relativement riches en matières organiques en particulier en altitude ou sur roche basique. Les horizons supérieurs de certains autres possèdent un humus grossier analogue à celui que l'on observe dans les sols podzoliques. Enfin lorsque l'on essaie de préciser les caractéristiques morphologiques et biochimiques des matières organiques des sols ferrallitiques, on s'aperçoit qu'il existe de sérieuses différences qui conduisent à distinguer différents types ou sous-types d'humus, parmi ceux qui répondent à la définition donnée précédemment.

Si nous examinons par ailleurs le bilan des matières organiques dans ces sols et dans la végétation qui les recouvre, il est clair qu'il existe également des différences marquées suivant le type de couverture végétale : forêt dense humide sempervirente ou semi-décidue, forêt dense sèche, forêt claire et savanes.

* Pédologue de l'O.R.S.T.O.M., Centre de Tananarive (République malgache).

Dans ces conditions, est-il justifié de faire référence au type d'humus dans la définition des sols ferrallitiques ? Cette question est en fait double :

— les matières organiques des sols ferrallitiques présentent-elles un certain nombre de caractéristiques communes qui permettent de les ranger dans un type unique d'« humus » ?

— cet « humus » conditionne-t-il en grande partie les processus évolutifs de ces sols (altération, évolution des minéraux argileux, migrations, etc.) ?

Le but de la présente revue bibliographique est de répondre à ces deux questions en fonction des observations et résultats analytiques divers qui ont été publiés sur les matières organiques des sols ferrallitiques.

Nous limiterons le sujet à l'étude des matières organiques des sols ferrallitiques sous végétation naturelle ; laissant à d'autres auteurs le soin de préciser le rôle de la microflore et de la faune de ces sols, ainsi que l'influence du défrichement et de la mise en culture, sur l'évolution de ces matières organiques.

1 - BILAN DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LES SOLS FERRALLITIQUES

Les *débris ou résidus végétaux* qui tombent sur le sol (feuilles, fruits, rameaux, branches et troncs) et ceux qui se décomposent dans le sol (racines et exsudats racinaires) constituent la source primaire de matière organique. Dans le cas des sols ferrallitiques ces résidus végétaux sont en général (1) rapidement décomposés par l'activité biologique. Une partie importante est minéralisée donnant des éléments solubles ou gazeux ; une autre est transformée (humifiée) en divers composés humiques par des réactions de biodégradation ou de synthèse.

Ces *composés humiques* de nature chimique très variée, liés d'une manière plus ou moins intime aux matières minérales en particulier aux argiles et aux sesquioxides, paraissent pour une grande part relativement résistants aux actions microbiennes et ne se décomposent que très lentement. Ils constituent l'« humus ».

Cette division des matières organiques du sol en résidus végétaux et composés humiques est cependant délicate, car les matières végétales qui tombent sur le sol et constituent la *litière*, contiennent déjà des composés hydrosolubles, précurseurs des matières humiques (KONONOVA, 1961). Dans le sol lui-même, les *matières organiques dites « libres ou légères »* (de faible densité, cf. § 3.1.) ne sont pas constituées uniquement de matières organiques fraîches, mais contiennent également des composés humiques. Enfin la *fraction « dense ou liée aux colloïdes minéraux »* est constituée pour partie par des *« matières humiques »* extractibles par les solvants alcalins, et pour partie par ce que l'on appelle *« l'humine »* et qui correspond à des matières organiques plus ou moins transformées, étroitement liées aux matières minérales (cf. § 3.2.4). Au total, l'estimation des termes du bilan organique des sols, ainsi que des vitesses et rendements d'humification d'une part, de minéralisation de l'humus d'autre part sont relativement complexes.

(1) Les exceptions seront étudiées au § 4.4.1.

1. 1 Biomasses végétales et réserves minérales contenues dans les différents types de végétations naturelles qui recouvrent les sols ferrallitiques

Il est possible d'estimer, au moins grossièrement, le poids sec de la végétation naturelle, sur et dans le sol, à une époque de l'année. Les chiffres rapportés dans le tableau 1 montrent les différences importantes qui existent entre les biomasses de divers types de végétation qui recouvrent les sols ferrallitiques. Cette masse de matière végétale est spécialement importante sous forêt dense. Il semble toutefois que les premiers observateurs qui se sont simplement fiés à l'aspect extérieur de la forêt équatoriale aient exagéré l'importance de sa biomasse. La comparaison avec les résultats rapportés par RODIN et BASILEVIC (1968) montrent en effet que la biomasse des vieilles forêts de hêtres ou de chênes de pays tempérés est simplement inférieure d'un tiers ou d'un quart à celle de la forêt dense humide. La biomasse végétale est toutefois beaucoup plus faible sous savane que sous forêt dense humide.

TABLEAU N° 1. — Biomasses des principaux types de végétation recouvrant des sols ferrallitiques

Types de végétation	Poids secs en tonnes/ha					Localisation	Références
	Total	Matières vertes	Bois	Racines	Litière + bois mort		
<i>Forêt dense humide sempervirente</i>	> 500	40	370	90	2	Valeurs moyennes	<i>in</i> RODIN, BASILEVIC 1968
<i>id.</i>		9,3	405			Côte d'Ivoire (Banco)	BERNHARD 1969
<i>id.</i>		7,3	240			(Anguédédou)	MULLER <i>et al.</i> 1965
<i>Forêt subtropicale</i> ...	410	12	316	82	10	Valeurs moyennes	<i>in</i> RODIN, BASILEVIC 1968
<i>Jachère forestière</i> ...	175	6	114	31	5,5	Congo (Yan-gambi)	BARTHOLOMEW <i>et al.</i> 1953
18 ans						Congo (Yan-gambi)	<i>id.</i>
5 ans	112	5,6	71	25	7,3	Congo (Yan-gambi)	<i>id.</i>
<i>Savanes boisées</i>	66,6	8,3	54,4	3,9	1,3	Ghana (Ejura)	NYE 1958
<i>Jachère herbacée</i> ...							
<i>Panicum maximum</i>	39,8	8,3		9,9	21,7	Congo (Yan-gambi)	BARTHOLOMEW <i>et al.</i> 1953
<i>Setaria sphacelata</i>	40,4	6,9		7,7	25,8	<i>id.</i>	<i>id.</i>
<i>Cynodon dactylon</i>	46,3	8,4		12,1	25,8	<i>id.</i>	<i>id.</i>

La réserve minérale contenue dans la végétation est encore plus différente suivant que l'on a affaire à une savane ou à une forêt (Tableau 2). Pour fixer les idées, il est intéressant de comparer ces valeurs d'une part aux teneurs en matières organiques des sols correspondants et d'autre part à la réserve minérale de ces sols (Tableau 3).

Sous forêt dense humide sempervirente, le stock de matière organique du sol ne représente environ que le tiers de celui constitué par la végétation; mais la réserve en azote du sol est par contre trois fois plus importante que celle contenue dans la végétation.

TABLEAU N° 2. — Immobilisation d'éléments minéraux dans la végétation recouvrant les sols ferrallitiques

Types de végétation	Eléments minéraux en kg/ha						Localisation	Références
	N	P	K	S	Ca	Mg		
Forêt dense humide sempervirente (ancienne)	(2200)*	(90)*	(255)*	—	(445)*	(198)*	Côte d'Ivoire (Banco)	BERNHARD 1969
Forêt dense humide sempervirente	(570)*	(39)*	(409)*	—	(523)*	(213)*	Ghana (Koumasi)	NYE 1958
Forêt dense humide semi-décidue	(450)*	(30)*	(276)*	—	(444)*	(189)*	Ghana (Ejura)	NYE 1958
Jachère forestière 18 ans	701	108	601	196	822		Congo (Yangambi)	BARTHOLOMEW et al. 1953
Jachère forestière 5 ans	567	32	456	103	421		Congo (Yangambi)	" " "
Savane arbustive	(140)*	(26)*	(202)*	—	(271)*	(83)*	Ghana (Ejura)	NYE 1958
Jachère herbacée : <i>Panicum maximum</i> (3 ans)	374	37	351	51	169		Congo (Yangambi)	BARTHOLOMEW et al. 1953
<i>Setaria sphacelata</i> (3 ans)	378	35	273	63	151		id.	id.
<i>Cynodon dactylon</i> (3 ans)	463	52	423	60	250		id.	id.
Pois d'Angole (2 ans)	346	58	260		157	98	Ghana (Ejura)	NYE 1958

* Les éléments minéraux contenus dans les racines d'arbres ne sont pas compris dans ces évaluations.

TABLEAU N° 3. — Estimation comparée des éléments minéraux dans les sols ferrallitiques et dans la végétation (kg/ha)

	Végétation : Jach. forestière (1)		Sol forestier (1)		Savane (2) arbustive	Forêt dense semi- décidue (2)	Sols (2)	
	8 ans	18 ans	0-15 cm	15-100 cm			0-30 cm	
N Total	579	701	1500-2500	3000-5000	140	450	1400	1200
P Total	35	108	920	4300	26	30	36	10
P assimilable			12	40				
K total (échangeable) .	404	578	(45)	(250)	202	276	(220)	(160)
Ca total (échangeable) .	264	244	(27)	(150)	271	444	(3000)	(2200)
Mg total (échangeable)	839	601	(180)	(1000)	83	189	(290)	(240)

(1) in BARTHOLOMEW et al. 1953 — Congo (Yangambi) : Sols ferrallitiques fortement désaturés appauvris, jaunes à horizons humifères très acides.

(2) in NYE 1958 — Ghana (Ejura) : limons sableux, brun rouge, issus de grès.

Cette série de sols correspond à des sols ferrallitiques moyennement désaturés appauvris rouges dont les horizons humifères sont pratiquement saturés.

Pour les éléments minéraux, la quantité de cations (Ca, Mg et K) contenue dans la végétation est nettement plus importante que la somme des éléments échangeables dans le premier mètre du profil de sol ferrallitique fortement désaturé du Congo ; et LAUDELOUT (1954) considère d'une manière imagée, que les cations du sol ne constitueraient que le placement à court terme du capital minéral circulant dans la végétation.

On doit cependant noter, qu'il existe tout de même des sols ferrallitiques dont les horizons humifères ont une richesse en bases échangeables moins faible. L'exemple donné par NYE (1958) au Ghana, montre que sous forêt dense semi-décidue, le stock de cations, en particulier alcalino-terreux contenus dans l'horizon humifère peut être nettement plus important que celui contenu dans la végétation naturelle.

1. 2 Cycle des matières organiques

1.2.1 L'apport annuel de matière organique au sol

Une partie de ces matières végétales tombent chaque année sur le sol (feuilles, fruits, branches, troncs), ou se décomposent directement dans le sol (racines). Des essais

TABLEAU N° 4. — Apport annuel de matières végétales aux sols ferrallitiques

Type de végétation	Poids de matière sèche t/ha/an			Localisation	Références
	Total	Feuilles	Bois et autres débris		
Forêt dense humide sempervirente	(25)	16		Données moyennes	RODIN et BASILEVIC 1968
Forêt hétérogène	12,4			Congo (Yangambi)	BARTHOLOMEW <i>et al.</i> 1953
— à <i>Brachystegia</i>	12,3			<i>id.</i>	<i>id.</i>
— à <i>Macrolobium</i>	15,3			<i>id.</i>	<i>id.</i>
Parasoleraie	14,9			<i>id.</i>	<i>id.</i>
Forêt à <i>Turraeanthus</i>	12,0	8,2	3,8	Côte d'Ivoire (Banco)	BERNHARD (1969)
— à <i>Diospiros</i>	9,2			Côte d'Ivoire (Yapo)	<i>id.</i>
»	10,5	7,0	3,5	Ghana	NYE 1961
Forêt d'altitude à larges feuilles <i>id.</i>	10,2			Colombie	JENNY <i>et al.</i> 1949
		8,5		Ituri	BRYNAERT <i>in</i> BRAY <i>et al.</i> 1964
— (à <i>Dipterocarpus</i>)	6,3			Malaisie (600 m)	MITCHELL 1936
Forêt subtropicale	(21)	12		Données moyennes	RODIN, BASILEVIC 1968
Savane arbustive	(11,5)	8,3		Données moyennes	RODIN, BASILEVIC 1968

Les résultats entre parenthèses tiennent compte de la chute d'arbres morts par éclaircie naturelle et des racines mortes. Les chiffres donnés par les autres auteurs ne paraissent pas en tenir compte.

de détermination de cet apport de débris ont été tentés pour différents types de végétations tropicales. Les feuilles, fruits et branches ont été recueillis périodiquement au cours de l'année.

Les estimations provenant de différents auteurs (Tableau 4), montrent que ces retombées végétales annuelles sont assez différentes suivant le type de végétation. Sous forêt dense humide, cet apport annuel est très élevé. Il est de l'ordre de deux à trois fois l'apport annuel sous forêt de pays tempéré (fig. 1).

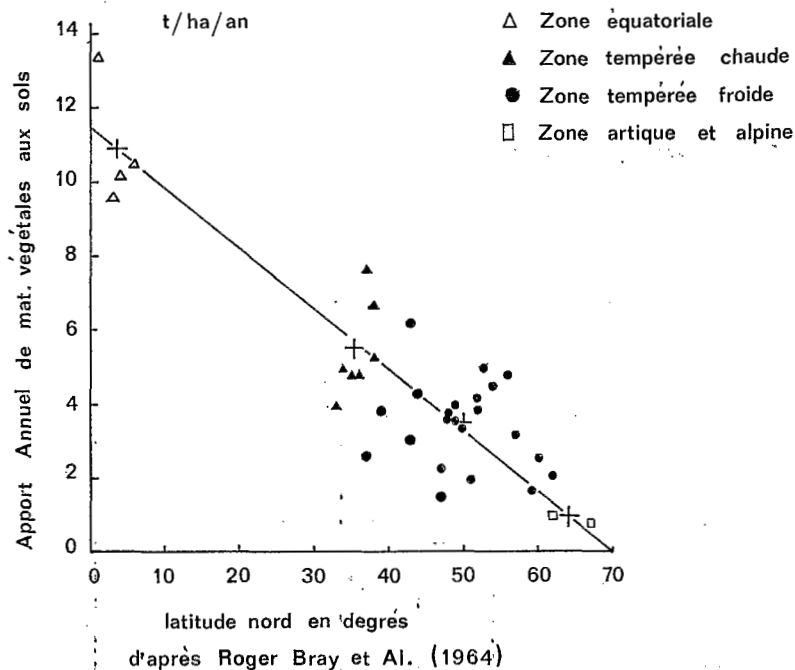


FIG. 1. — Production totale de litière sous forêt en relation avec la latitude

Importance de la litière sur les sols		Rapport entre le poids de litière et l'apport annuel de matières végétales	
	t/ha		L/Lf
Forêts tropicales humides	2		0,1
Savanes	1,3		0,2
Forêts subtropicales	10		0,7
Steppes tempérées sèches	6,2		1,5
Forêts de chênes ou de hêtres	15		3 ou 4
Forêts de sapins (Taïga)	30 à 45		10 à 17
Arbustes nains (Toundra)	84		92

d'après Rodin et Basilévic (1968)

On doit par ailleurs remarquer que ces estimations sont sans doute inférieures à la réalité, car une partie importante des feuilles des espèces dominantes de la forêt dense est interceptée par les strates inférieures avant d'atteindre le sol. Certaines feuilles

et surtout les branches et troncs morts se décomposent partiellement, ou sont dévorés par les insectes avant de tomber sur le sol. Enfin le taux de renouvellement annuel des racines est très difficile à estimer. Il existe donc une différence importante entre cet apport annuel au niveau du sol et la production primaire de la couverture végétale.

1.2.2 La litière

L'importance de la litière qui recouvre le sol dépend de cette chute de débris végétaux, mais également de la vitesse de leur décomposition. Elle paraît relativement variable au cours de l'année.

Même sous forêt dense sempervirente, la chute de matières végétales est soumise à des variations saisonnières qualitatives et quantitatives. Par exemple dans la cuvette congolaise, LAUDELOUT *et al.* (1954) ont constaté qu'il existe deux minima correspondant aux saisons des pluies et deux maxima correspondant aux fins de saisons sèches. De même JENNY *et al.* (1949), MITCHEL (1936), NYE (1961), BERNHARD (1967) ont observé une chute de feuilles assez régulière au cours de l'année avec cependant un minimum en saison des pluies et un maximum en fin de saison sèche.

Ce rythme saisonnier de l'apport de feuilles et débris organiques aux sols est évidemment plus net dans le cas des forêts denses humides semi-décidues, le maximum correspondant à la saison sèche.

Enfin en savane, cet apport saisonnier est sûrement très marqué, mais les débris de feuilles ou de chaumes brûlent pratiquement partout à la faveur des feux de brousse.

La décomposition de cette litière est également soumise à un rythme saisonnier en fonction du microclimat qui règne à la surface du sol, plus ou moins favorable à une décomposition biologique de ces débris organiques. La température ne paraît pas être ici un facteur limitant, si ce n'est pour les sols d'altitude. Par contre l'humidité réduite en saison sèche limite la vitesse de décomposition de la litière.

Au total, la quantité de litière qui recouvre les sols ferrallitiques n'est pas très importante (*cf.* Tableau 1) (1). Maximum en fin de saison sèche, elle se réduit à un tapis peu épais, voire discontinu, de feuilles et brindilles en fin de saison des pluies.

1.2.3. Bilan de la décomposition de la litière.

Pour les forêts climaciques, on peut cependant admettre que, d'une année sur l'autre, un état d'équilibre existe entre la chute des débris végétaux sur le sol et la décomposition des débris végétaux et de la litière ; de sorte que le poids de cette litière se retrouve identique à une même époque de l'année. Si A est l'apport annuel, et L le poids de litière, on peut définir un coefficient de décomposition K tel que :

$$A = K (A + L)$$

Pour les forêts denses humides de Colombie, JENNY *et al.* (1949) ont trouvé pour K des valeurs comprises entre 40 et 60 %. Pour les forêts de la zone équatoriale congolaise, LAUDELOUT et MEYER (1954) ont calculé des valeurs de K encore plus élevées (63 à 76 %). Ces valeurs du coefficient de décomposition des matières organiques sous forêt équatoriale sont donc beaucoup plus importantes que celles mesurées sous forêt en pays tempéré et à plus forte raison des pays froids (*cf.* p. précédente).

En développant en série la formule ci-dessus et en intégrant, JENNY *et al.* (1949) ont montré que :

$$L = L_E (1 - e^{-Kt})$$

où L_E est le poids de litière pour une forêt en équilibre avec le climat et t le temps. Si l'on enlève toute la litière qui recouvre le sol (soutrage), on peut, par cette formule, calculer le temps nécessaire pour qu'elle se reconstitue. Pour les forêts de la cuvette

(1) Sauf pour certains sols forestiers sableux (*cf.* paragr. 4.4.1).

congolaise le temps nécessaire pour arriver à 95 % de la valeur d'équilibre est de 2 à 3 ans seulement (LAUDELOUT et MEYER, 1954). Cette reconstitution de la litière est donc très rapide par rapport à celle des forêts de pays tempéré.

En résumé, malgré l'apport considérable de matières organiques sous forêt tropicale humide, la quantité de matière organique stockée dans la litière est faible et la décomposition de ces débris organiques est donc très rapide.

1.3 Bilan des matières organiques dans les sols ferrallitiques

1.3.1. Humification (s.l.)

La source primaire de matière organique du sol proprement dit est donc constituée essentiellement par les produits de décomposition de la litière et des racines mortes.

A ceci s'ajoute des exsudats racinaires et les produits organiques de synthèse des germes autotrophes et des algues du sol. La plus grande partie de ces matières organiques fraîches se minéralise, libérant essentiellement du gaz carbonique et de l'ammoniaque et un certain nombre de cations et d'anions minéraux; une faible partie se transforme en « humus » au sens large du terme selon WAKSMAN (1938). Sans entrer dans le détail de ces réactions de transformation et de néosynthèse d'origine surtout biologique, nous pouvons essayer de chiffrer le bilan de ces réactions dans le cas des sols ferrallitiques.

On peut supposer que au total la quantité de matières organiques qui se transforme en humus est proportionnelle, pour un type de sol donné, à l'apport annuel de matière organique primaire. Si A est cet apport annuel, on peut définir un coefficient K_1 ou coefficient isohumique (HENIN et DUPUIS, 1945), correspondant à la fraction de la matière organique fraîche qui est transformée en humus.

Ce coefficient de transformation pourrait à la rigueur être considéré comme constant pour un type de sol donné, si les conditions pédoclimatiques qui président à l'humification pouvaient être considérées comme constantes (RUSSEL, 1964); ce qui est à peu près réalisé en zone équatoriale toujours humide, mais ne l'est pas en zone tropicale humide à saisons alternantes.

Ce coefficient doit être par ailleurs très variable en fonction de la nature des matières végétales qui se décomposent et s'humifient. Sous végétation naturelle, il va de soi que la vitesse et les rendements d'humification doivent être très différents suivant la nature plus ou moins lignifiés, et la richesse en azote très inégale des matières organiques fraîches (feuilles, branches, etc.).

Les rendements d'humification dépendent sûrement des conditions dans lesquelles s'effectuent ces transformations: sur le sol (litière) et dans le sol (racines). Si L et R représentent respectivement l'apport pendant l'unité de temps t, d'une part de résidus végétaux sur le sol, d'autre part de racines mortes et d'exsudats racinaires; il est nécessaire, pour établir le bilan de l'humification, de faire intervenir deux coefficients f_1 et f_r qui correspondent aux fractions de ces matières organiques qui ne sont pas minéralisées et perdues par oxydation, érosion ou lessivage hors du profil.

L'augmentation du taux d'humus pendant la période de temps considérée est donc exprimée par l'expression mathématique:

$$f_1 L + f_r R$$

Ces coefficients seraient compris d'après GREENLAND et NYE (1959) entre les limites suivantes:

f_1 : 1/4 à 1/10

f_r : 1/2 à 1/5 lorsque les poids de matières organiques de la litière et des racines sont exprimés par leurs teneurs en carbone.

Si l'apport annuel de litière L peut être approximativement mesuré, par contre l'apport annuel de racines mortes est difficile à estimer. Les auteurs précédemment cités pensent que la teneur en carbone des matières organiques apportées par les racines, sous forêt tropicale, serait de l'ordre de la moitié de celle apportée sous forme de litière : $R = 0,5 L$. Pour les savanes, le manque de données sur la croissance relative des parties aériennes et souterraines ne permet pas de préciser une telle relation. Les auteurs ont donc supposé que ce rapport L/R doit être analogue à celui observé sous herbage en pays tempéré (1), soit de l'ordre de 3 à 1.

Il ne paraît pas possible de mesurer ces constantes d'humification f_l et f_r sous végétation naturelle, car pendant le même temps une partie de l'humus de ces sols se minéralise.

1.3.2. Minéralisation de l'humus (s.l.)

Il est généralement admis que la quantité de matière organique d'un sol qui se minéralise pendant une période donnée est proportionnelle au taux de matière organique (JENNY 1941, HENNIN et DUPUIS 1945, BIRCH 1958, HENIN *et al.* 1959). La masse de matière carbonée du sol qui se décompose dans l'unité de temps peut donc s'écrire : $K_f C$ où K_f est un paramètre de décomposition de l'humus.

Pour un champ défriché, la mesure de la vitesse de décomposition de l'humus peut être faite en gardant le sol sans végétation ; mais les conditions sont très différentes de celles sous une couverture végétale naturelle. Il est cependant possible de calculer cette constante K_f sous végétation naturelle, en faisant le bilan des deux processus antagonistes d'humification et de minéralisation de l'humus.

1.3.3. Bilan de l'humification et de la minéralisation de l'humus

La variation de la teneur en carbone d'un sol dC , pendant le temps dt , est égale à la somme algébrique des gains et des pertes. En utilisant les symboles précédemment explicités, on peut écrire :

$$dC/dt = f_l L + f_r R - K_f C$$

Pour un sol sous végétation naturelle qui a atteint son équilibre climacique, la teneur en carbone du sol peut être considérée comme constante d'une année sur l'autre, et égale à C_E et $dC/dt = 0$

On a donc :

$$K_f C_E = f_l L + f_r R$$

C'est-à-dire que les gains de matières organiques sont alors compensés par les pertes (GREENLAND et NYE, 1959).

Connaissant la teneur en carbone du sol sous une végétation en équilibre avec le climat, il est donc théoriquement possible de calculer la constante K_f de décomposition de l'humus. En fonction des valeurs limites précédemment mentionnées pour f_l et f_r , et en supposant que $R = 0,5 L$ sous forêt, et $R = 0,33 L$ sous savane, GREENLAND et NYE (1959), ont calculé les valeurs limites de la constante de décomposition de l'humus (K_f) sous végétation ou jachère naturelle de longue durée (Tableau 5).

Pour les forêts tropicales denses humides, il existe de grandes différences en fonction de l'altitude, sans doute en raison de la température plus froide qui ralentit les réactions biologiques de décomposition des matières organiques du sol. Mais la constante de décomposition reste cependant supérieure à celles calculées pour les sols forestiers des pays tempérés.

(1) Les études réalisées par les agronomes du Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) paraissent montrer que l'importance relative de la production racinaire de plantes fourragères est plus faible en pays tropical et le rapport L/R fort probablement plus élevé : 5 à 10/1.

TABLEAU N° 5. — Constantes de décomposition de l' « humus » et apports organiques aux sols tropicaux

Types de végétation Forêts	Production annuelle de litière (L) t de C/ha/an	Quantité de carbone organique présent dans la couche (0—30 cm) du sol t/ha	Constan- te de décom- position de l'humus (K _f)		Alti- tude m	Pluvio- métrie mm/an	Références GREENLAND et NYE (1959) d'après :
			max.	min.			
<i>Forêt tropicale basse altitude</i>							
Colombie	3,9	395	0,51	0,20	30	8400 mm	JENNY 1950
Ghana	5,4	109	2,47	1,0	0-450	1500-2000	ENDREY et MONTGOMERY 1954
Indes	5,4	51,4	5,45	2,18	120		SANTYANARAGANA et al. 1946
Congo (Kinshasa)	6,2	60,3	5,15	2,04	450	1800	GERMAIN, EVRARD 1956
Indonésie	5,4	74	3,64	1,46	450	3000	HARDON 1936
<i>Moyenne (Colombie exclue)</i>		73,5	4,18	1,67			
<i>Forêt tropicale d'altitude</i>							
Colombie	5,1	403	0,63	0,25	1500	2800	JENNY 1950
Indonésie	5,4	348	0,77	0,31	1200	2500	HARDON 1936
Madagascar	5,8	351	0,80	0,31	1700	2000	PERNET 1953
<i>Moyenne</i>		360	0,73	0,29			
<i>Savane</i>							
Humide	(R) 1,4	56	1,33	0,53	600	1300	NYE 1958
Sub-humide	0,45	16,8	1,22	0,49	600	900	WEINMANN 1948

Pour les sols de forêt à basse altitude, cette constante serait environ 10 fois supérieure à celle mesurée sous forêt de chênes en pays tempéré. Le sol de Colombie qui fait exception et donne des valeurs très faibles pour K_f paraît correspondre à un sol très acide à humus très grossier (JENNY, 1948), probablement à classer parmi les sols ferrallitiques podzolisés.

La constante de décomposition des matières organiques des sols de savane serait d'après ces calculs approximatifs environ trois fois plus faible que celle des sols ferrallitiques forestiers de basse altitude. Ce fait, suivant les auteurs, doit être relié à une action dépressive des graminées sur la décomposition de l'humus, comme indiqué par la faible nitrification dans ces sols (GREENLAND, 1958).

1.3.4. Apport d'éléments minéraux par la chute de matières végétales sur le sol

Des estimations de l'apport annuel d'éléments minéraux par la végétation ont été réalisées par différents auteurs sous forêt dense humide (cf. Tableau 6). Les teneurs en éléments minéraux varient suivant la nature des débris végétaux (feuilles, fruits, fleurs, bois), qui tombent sur le sol, en fonction des espèces végétales originelles, de la saison et du sol (BRAY et al. 1964, BERNHARD 1966).

TABLEAU N° 6. — Apports annuels d'éléments minéraux par la chute de matières végétales

Types de végétation	Eléments minéraux (Kg/ha/an)						Localisation	Références
	N	P	K	S	Ca	Mg		
<i>Forêt dense humide sempervirente :</i>								
— Hétérogène	224	7	48	30	105	53	Congo (Yangambi)	LAUDELOUT et MEYER 1954
— à <i>Brachystegia</i>	223	9	62	30	91	44	<i>id.</i>	<i>id.</i>
— à <i>Macrobium</i>	154	9	87	20	84	49	<i>id.</i>	<i>id.</i>
— Parasoleraie	140	4	104	29	124	43	<i>id.</i>	<i>id.</i>
— à <i>Turraeanthus</i>	147	6,6	25		60	47	Côte d'Ivoire (Banco)	BERNHARD 1969
»	153	10	70		87	36	<i>id.</i>	BERNHARD 1969
<i>Forêt dense humide semi-décidue</i>	235	10	74		288	71	Ghana (Kade)	NYE 1961

Si l'on tente un tel bilan, on doit aussi remarquer qu'aux éléments minéraux qui proviennent de la décomposition de la litière s'ajoutent les éléments apportés par les eaux de pluie et ceux lessivés dans la voûte forestière (Tableau 7). Ces derniers paraissent relativement importants en particulier pour le phosphore et surtout le potassium (Tableau 7) (MEYER *et al.* 1959, NYE 1961, MATHIEU et MONNET 1970).

TABLEAU N° 7. — Apports annuels d'éléments minéraux par les eaux de pluies (Kg/ha/an)

Types de végétation	N-NO ₃	N-NH ₃	P	K	Ca	Mg	Localisation	Références
En terrain découvert	2,5	(11,5)	0,41	17,5	12,6	11,3	Ghana (Kade)	NYE 1961
Sous forêt	11,6	14,8	4,1	237	41,5	29,1		
Eléments lessivés dans couverture végétale	9,1	3,3	3,7	229	28,9	17,8		

Deux remarques intéressantes à propos de ces chiffres ont été faites par LAUDELOUT et MEYER (1954) :

- Les quantités de cations minéraux (Ca, Mg, K) qui passent annuellement du domaine végétal au sol sont du même ordre de grandeur que dans le cas des forêts des pays tempérés, mais l'apport d'azote est de 6 à 10 fois plus grand, alors que la chute des feuilles n'est que 3 à 4 fois plus grande.
- La composition cationique des matières végétales qui retournent au sol est analogue aux pourcentages de saturation cationique du complexe absorbant du sol. Ce parallélisme est attribué au cycle rapide des éléments minéraux dans le sol, ce qui fait que la composition cationique tend à devenir identique à celle de la matière végétale en circulation.

On doit cependant noter que les éléments minéraux ont des mobilités différentes tant dans le sol que dans la végétation ; et la durée du cycle n'est probablement pas la même pour tous (LAUDELOUT 1962). Ces bilans annuels du cycle des éléments nutritifs sont donc très approximatifs.

Inversement la richesse minérale du sol paraît influencer sur la composition minérale de la litière (BERNHARD, 1969). Les résultats présentés par NYE (1961) (cf. Tableau 6) montrent d'ailleurs que sur le sol ferrallitique forestier de Kade au Ghana, dont les horizons supérieurs sont peu désaturés, les teneurs en magnésium et surtout en calcium de la litière sont considérablement plus élevées que sur les sols très acides de la cuvette congolaise. Au total, la quantité de calcium et de magnésium qui circule annuellement est alors nettement plus élevée, tandis que pour les autres éléments minéraux les valeurs sont très comparables. Nous avons déjà mentionné les différences importantes existant entre le stock d'éléments minéraux contenu dans les divers types de végétation qui recouvrent les sols ferrallitiques. Cette comparaison montre que parallèlement la quantité d'éléments minéraux qui participe au cycle biogéochimique peut être quantitativement différente.

Le « turnover » des éléments minéraux dans la végétation, dans la litière et dans les horizons humifères des sols ferrallitiques paraît donc fort différent suivant les écosys-

TABEAU N° 7^{bis}. — Accumulation et dynamique des éléments minéraux et de l'azote dans un certain nombre de types de végétation (d'après RODIN et BASILEVIC 1968)

	Forêts tropicales humides	Savanes	Forêts sub-tropicales (1)	Forêt de chênes (1)
Eléments minéraux et Azote dans la Biomasse (Kg/ha)	11.081	727	5.283	5.800
dont :				
— parties vertes %	26 %	21 %	15 %	5 %
— parties aériennes pérennes	48 %	74 %	57 %	66 %
— racines	26 %	5 %	28 %	29 %
Charges en cendres et N de la production primaire N (Kg/ha)	427	...	277	95
Cendres (Kg/ha)	1.602	...	716	235
Charge apportée par les retombées végétales :				
N Kg/ha	261	...	226	57
Cendres Kg/ha	1.279	...	569	198
N + Cendres apportées par les parties vertes (Kg/ha)	(1.484)	(152)	(701)	(245)
Part des éléments organogènes (Ca + K + P + S) dans les retombées végétales (%)	22 %	...	61 %	82 %
Part des biohalogènes (Na, Cl, S)	0,6 %	...	1,7 %	
Teneurs en cendres et azote de la litière Kg/ha	178	16	600	800
Principaux éléments minéraux :				
— dans les retombées végétales	Si, N, Ca (Al, Fe, S, Mn)	...	N, Ca, K (Si, Al, Fe)	Ca, N, K
— dans la litière	Fe, Si, N (Al, Mn)	...		Ca, N, Si (Al, Fe)

(1) Les chiffres correspondants à ces deux types de végétation sont donnés à titre de comparaison.

tèmes (Tableau 7). On ne peut que regretter le nombre limité d'études de ce bilan. Il est également dommage que les agropédologues qui ont réalisé un travail considérable d'échantillonnage pour réaliser ces estimations, n'en aient pas profité pour doser certains éléments minéraux comme la silice, l'aluminium, le fer ou le manganèse. D'HORRE (1954) cite quelques chiffres sur l'immobilisation de SiO_2 dans les cultures, et reproduit les résultats obtenus par BATHOLOMEW et MEYER sur les teneurs en silice des feuilles et du bois de différentes espèces forestières ; mais l'on aimerait connaître l'importance du « turnover » annuel de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dans la végétation.

En résumé, les biogéocénoses correspondant aux sols ferrallitiques sont donc caractérisées par une production primaire nette très élevée en ce qui concerne les forêts denses humides, faible pour les savanes.

La quantité d'éléments minéraux et d'azote apportée au sol par les retombées végétales est également très importante sous forêt. Par contre le stockage de matières organiques et d'éléments minéraux sur le sol (litière) est très limité.

Le cycle des éléments minéraux sous savane est très peu connu. La quantité d'éléments minéraux qui transitent chaque année dans la végétation serait environ dix fois plus faible que sous forêt dense humide.

2 - RÉPARTITION ET TENEURS EN MATIÈRES ORGANIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES

Dans le paragraphe relatif au bilan des matières organiques, nous avons considéré globalement le stock de matière organique contenu dans les trente ou cent premiers centimètres du profil. Cette approximation nécessaire pour chiffrer la plus grande partie de l'humus de ces sols, cache en fait une grande hétérogénéité dans la nature et la répartition des matières organiques dans les profils. Les facteurs qui entrent en jeu sont essentiellement :

- le type de végétation naturelle qui recouvre le sol,
- les possibilités de migration des matières organiques dans le profil.

2.1 Répartition des matières organiques dans le profil

2.1.1. Influence de la végétation sur la répartition des matières organiques

Les graphiques n° 2 montrent les différences existant entre les sols de forêt et les sols de savane, compte tenu de la texture des sols. Pour les premiers, les 3 à 5 centimètres supérieurs sont très riches en matières organiques, puis les teneurs décroissent ensuite rapidement. Pour les sols de savane, les teneurs en matières organiques sont plus faibles en surface mais l'horizon humifère est plus épais. En profondeur, les teneurs en matières organiques sont analogues à celles sous forêt ou légèrement plus faibles.

dans les horizons A₁ et A₃, puis diminuent dans l'horizon B (2 à 4 fois moins). On peut donc penser qu'une partie importante des matières organiques entraînées par les eaux de drainage sont insolubilisées (polymérisation, condensation, chélation) ou minéralisées (biodégradation). Malgré tout, la charge organique, entraînée par les eaux de drainage à une profondeur supérieure à 1,50 m, serait encore supérieure à 100 kg C/ha/an sous forêt dense humide sempervirente ou semi-décidue.

Aucune étude biochimique des produits organiques solubles ou pseudo-solubles provenant de la décomposition de la litière ou s'écoulant dans les différents horizons des sols ferrallitiques ne paraît avoir été entreprise à ce jour ; mais les résultats d'analyses des matières humiques dans les horizons profonds de sols ferrallitiques (Cf. §§ 3.2.3, 3.2.4) confirment cette migration profonde des composés organiques peu polymérisés. Il n'existe généralement pas d'horizon d'accumulation brutale de ces matières humiques (1) car le substrat reste presque toujours très filtrant. On observe simplement une lente décroissance du taux de matières organiques avec la profondeur. Cette infiltration d'humus dépend donc essentiellement de la structure et de la porosité des horizons A₁, A₃ et B :

— Dans le cas des sols ferrallitiques sableux ou sablo-faiblement argileux (BOISSEZON, 1963), ou dans celui de sols nettement plus argileux mais très poreux comme ceux dérivés de basalte (SEGALEN 1957, BOURGEAT *et al.* 1962, SIFFERMANN *et al.* 1968), la pénétration humifère est relativement homogène et profonde.

— Pour les sols argilo-sableux ou argileux plus structurés, la pénétration humifère devient généralement moins profonde et beaucoup plus irrégulière. Les macroporosités du sol (ancien passage de racines, galeries de rongeurs ou d'insectes), et fentes de retrait de la surstructure prismatique des horizons B (oxiques), sont souvent revêtues d'enduits humifères brunâtres qui diffusent faiblement à l'intérieur des unités structurales.

A ces causes physiques de migration des matières humiques entraînées par les eaux percolantes, s'ajoutent des causes biologiques. Il y a d'abord la décomposition « *in situ* » des racines profondes qui peuvent pénétrer les profils ferrallitiques jusque dans les horizons d'argiles tachetées et parfois même les horizons d'altération. Ces racines profondes sont toutefois peu nombreuses. Il y a aussi le comblement des galeries de rongeurs ou d'insectes par la terre humifère provenant des horizons supérieurs.

2. 2 Richesse en matière organique des sols ferrallitiques

Les auteurs anciens ont été frappés par le contraste existant entre la végétation luxuriante de la sylvie équatoriale et le faible développement des horizons humifères des sols ferrallitiques. La faible coloration de certains humus forestiers est peut être la cause de cette impression exagérée (MILNE 1937, VAGELER 1930). Depuis des dosages de carbone et d'azote ont été réalisés, et l'on s'est aperçu que les teneurs en matières organiques des sols ferrallitiques n'étaient pas tellement faibles tout au moins sous forêt. Certains sols ferrallitiques d'altitude et/ou sur roches basiques possèdent même des teneurs en matières organiques relativement élevées et ces sols ont été qualifiés d'humifères ou d'humiques (2), ou « d'humic latosols » (AYRES 1943, SHERMANN 1949, CLINE 1950, 1955, TAMURA *et al.* 1953, HAWKINS *et al.* 1965).

Les causes de cette accumulation de matière organique dans des sols tropicaux parfaitement drainés reste encore incomplètement expliquée. Nous avons vu que dans les sols

(1) Exceptions § 4.4.

(2) Dans le projet de classification des sols ferrallitiques (AUBERT-SEGALEN 1966), les sols « humifères » doivent posséder une teneur en matière organique supérieure à 7 % sur 20 cm, ou bien plus de 1 % jusqu'à au moins 1 mètre de profondeur. Les sols « humiques » ont plus de 3 % de matière organique (probablement dans les 20 premiers cm du profil).

d'altitude le coefficient de décomposition de l'humus K_f est relativement plus faible. Ce n'est évidemment pas l'altitude qui joue ici, mais fort probablement la température un peu plus basse (1), et la pluviométrie plus élevée (SEGALEN, 1957).

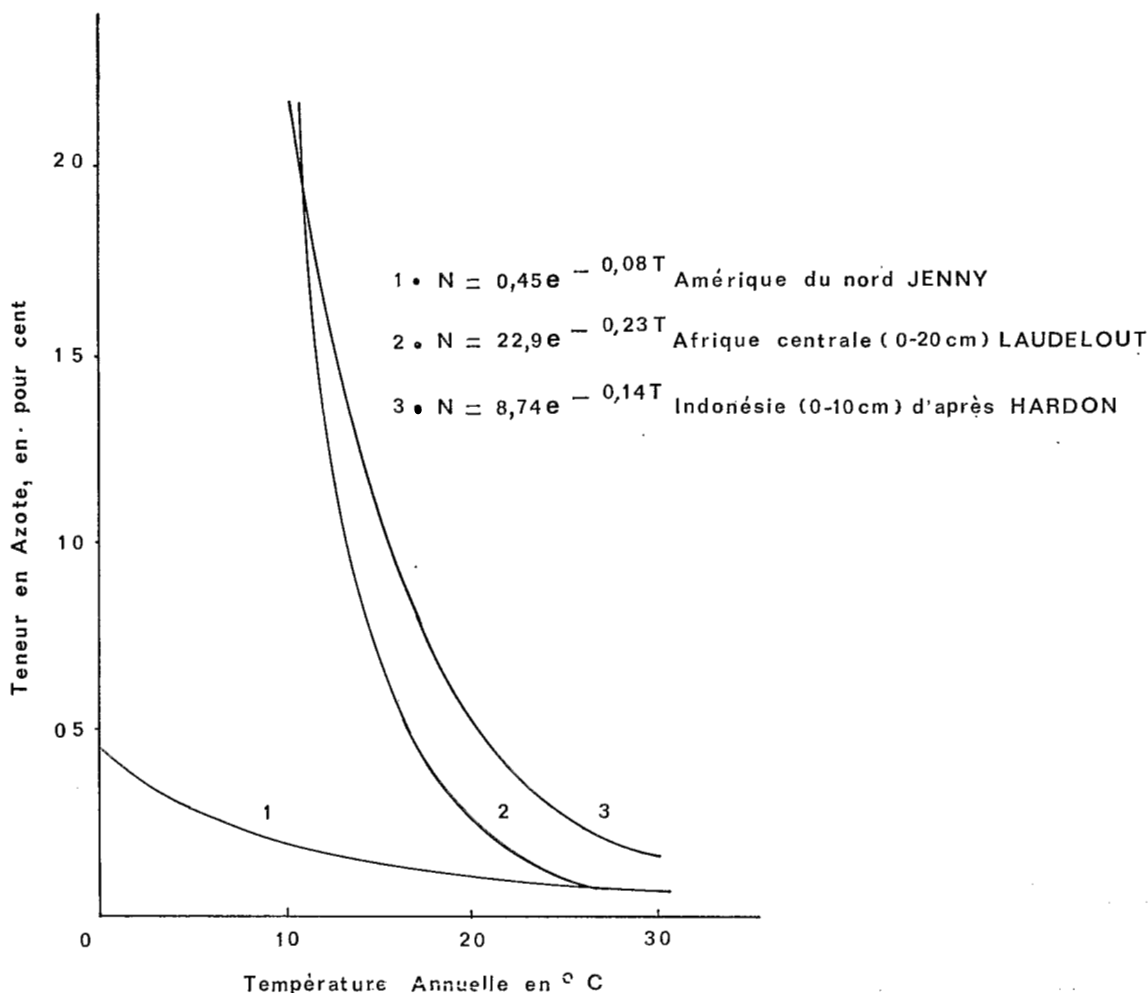


FIG. 3. — Teneur en Azote des sols en fonction de la température (LAUDELOUT 1962)

2.2.1. Influence de la température

En 1930, JENNY avait montré que la teneur en matière organique des sols tempérés (U.S.A.), décroît lorsque la température moyenne annuelle augmente :

$$N = 0,55 e^{-0,08 t} (1 - e^{-0,005 H})$$

où N est la teneur en azote des 20 premiers cm du sol, t la température moyenne annuelle (degré C.), et H (ou N.S.Q.) est le quotient de Meyer (Pluviométrie en mm/an divisée par le déficit de saturation en mm de mercure).

(1) $t = t_0 - \frac{\text{Alt.}}{K}$ où t_0 est la température moyenne au niveau de la mer, et K une constante pour un pays donné.

L'extrapolation de cette formule aux sols des régions tropicales donne des valeurs calculées beaucoup plus faibles que dans la nature (HARDON 1936, DEAN 1938, JENNY *et al.* 1948, LAUDELOUT *et al.* 1960). Il existe cependant une relation de même forme qui relie la teneur en azote des sols intertropicaux à la température moyenne annuelle, pour des zones d'égaies humidités atmosphériques. Par exemple pour les sols de Colombie, JENNY *et al.* (1948) ont pu montrer que :

$$N = 12 e^{-0,138 t} (1 - e^{-0,0034 H})$$

N est la teneur en azote de la couche (0.8 in = 20 cm), t° variant entre 10° et 30 °C, et H entre 150 et 500. De même LAUDELOUT (1960, 1962) a constaté à partir des données de HARDON à Sumatra et de nombreuses données recueillies au Congo Kinshasa, qu'il existe une relation analogue très étroite entre la teneur en matière organique des sols et la température (fig. 3).

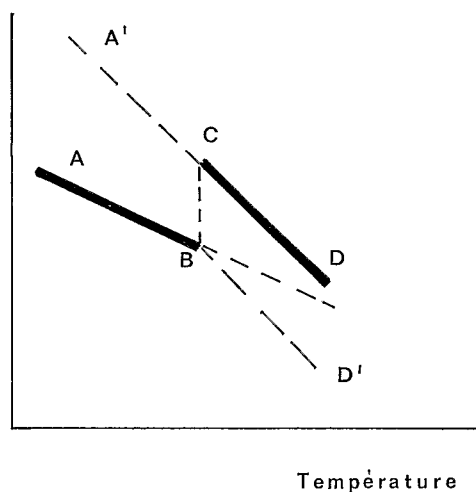


FIG. 4. — Logarithme de la teneur en matière organique des sols

Graphique simplifié représentant les variations de la teneur en matière organique des sols en fonction de la température (d'après LAUDELOUT 1962).

La décroissance de la température ralentit plus la croissance des plantes qu'elle n'a d'effet sur le taux de décomposition des matières organiques du sol (fig. 5).

Les raisons des différences entre les courbes (fig. 4) établies pour l'Amérique du Nord (zone tempérée) et pour les pays intertropicaux humides sont encore assez obscures. LAUDELOUT (1962) fait une analyse détaillée des causes évoquées par différents auteurs, mais n'arrive pas à donner de raisons péremptoires expliquant ce décalage des courbes, ni leurs pentes différentes.

Les variations de la teneur en carbone des sols ferrallitiques ne sont pas exactement parallèles à celles de l'azote, car comme nous le verrons (§ 2.3), le taux de carbone diminue plus rapidement que le taux d'azote quand la température augmente (HARDON 1936, JENNY *et al.* 1948).

2.2.2. Influence de la pluviométrie et de l'humidité atmosphérique

CRAIG et HALAIS (1936) à l'île Maurice, DEAN (1938) aux Hawaï, puis comme nous l'avons vu (§ 1.3.3.) JENNY *et al.* (1948) en Colombie, ont montré que la teneur en matière organique des sols ferrallitiques augmentait avec la pluviométrie. L'augmentation de la pluviométrie favoriserait la croissance de la végétation sans avoir beaucoup

d'effet sur le taux de décomposition des matières organiques du sol (BIRCH et FRIEND, 1956).

Il semble toutefois que pour les sols de basse altitude il n'en soit pas de même. L'épaisseur de l'horizon humifère diminue souvent au fur et à mesure que la pluviométrie est plus élevée (DABIN, 1968). En Côte d'Ivoire par exemple (BOISSEZON, 1970), les sols ferrallitiques sous forêt dense humide sempervirente (pluviométrie supérieure à 1 600 mm) ont des teneurs en matières organiques inférieures de 40 % à celle des sols sous forêt dense humide semi-décidue (pluviométrie comprise entre 1 300 et 1 600 mm).

En fait, ces comparaisons sont toujours délicates ; car dans des régions où l'altitude et la température moyenne peuvent être considérées comme analogues, la végétation et les autres conditions pédoclimatiques sont fortement modifiées (durée de la saison sèche par exemple), lorsque la pluviométrie varie. Le type même d'évolution de l'humus diffère fortement (Cf. §§ 3.2.4 et 4.2).

A = Production d'humus

B = Destruction d'humus

B₁ = avec suffisamment d'eau

B₂ = sous l'eau

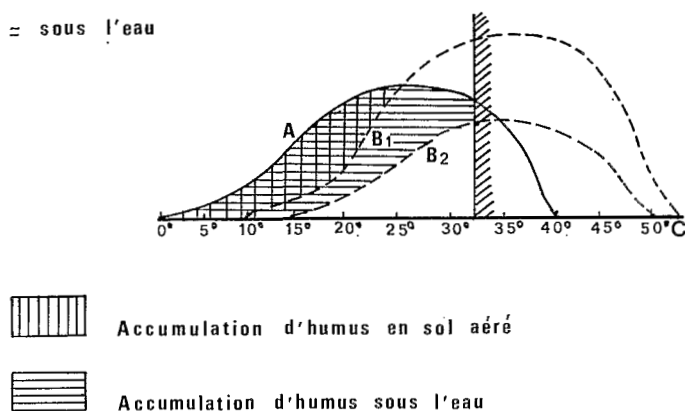


FIG. 5. — Domaines d'accumulation ou de destruction de l'humus en relation avec la température (d'après MOHR et VAN BAREN 1954)

2.2.3. Influence de la texture

Il est bien connu que la teneur en matière organique des sols est liée d'une manière plus ou moins étroite à la texture et en particulier à la teneur en argile. Les corrélations qui ont été recherchées pour des horizons homologues de sols ferrallitiques analogues ne sont pas toujours significatives (G. MARTIN, 1963), ou sont assez laches (FAUCK 1960, COMBEAU *et al.* 1961, BOISSEZON 1965, 1970, *cf.* fig. 6). Les causes de cette augmentation de la teneur en matière organique en fonction du taux d'argile sont sans doute multiples :

— la présence de quantités d'argile importantes dans les horizons humifères peut entraîner un léger engorgement qui limite les réactions de décomposition aérobie (fig. 5) ; mais les horizons humifères de sols ferrallitiques sont en général bien drainés et l'on n'observe pas de zone réductrice. On doit cependant remarquer que le degré d'évolution des matières organiques est en général plus faible (rapport C/N élevé) dans les sols de texture lourde.

— les complexes argilo-humiques sont réputés plus résistants à la décomposition microbienne, et il est bien connu que le taux de décomposition des matières organiques d'un sol (coefficient K_1 et K_2 du § 1.3.2) est d'autant plus faible que le sol est plus argileux. Il est également probable que la formation de ces complexes humus-argile limite la migration des complexes humifiés dans les profils, d'où une accumulation humifère essentiellement superficielle dans les sols ferrallitiques argileux (fig. 2).

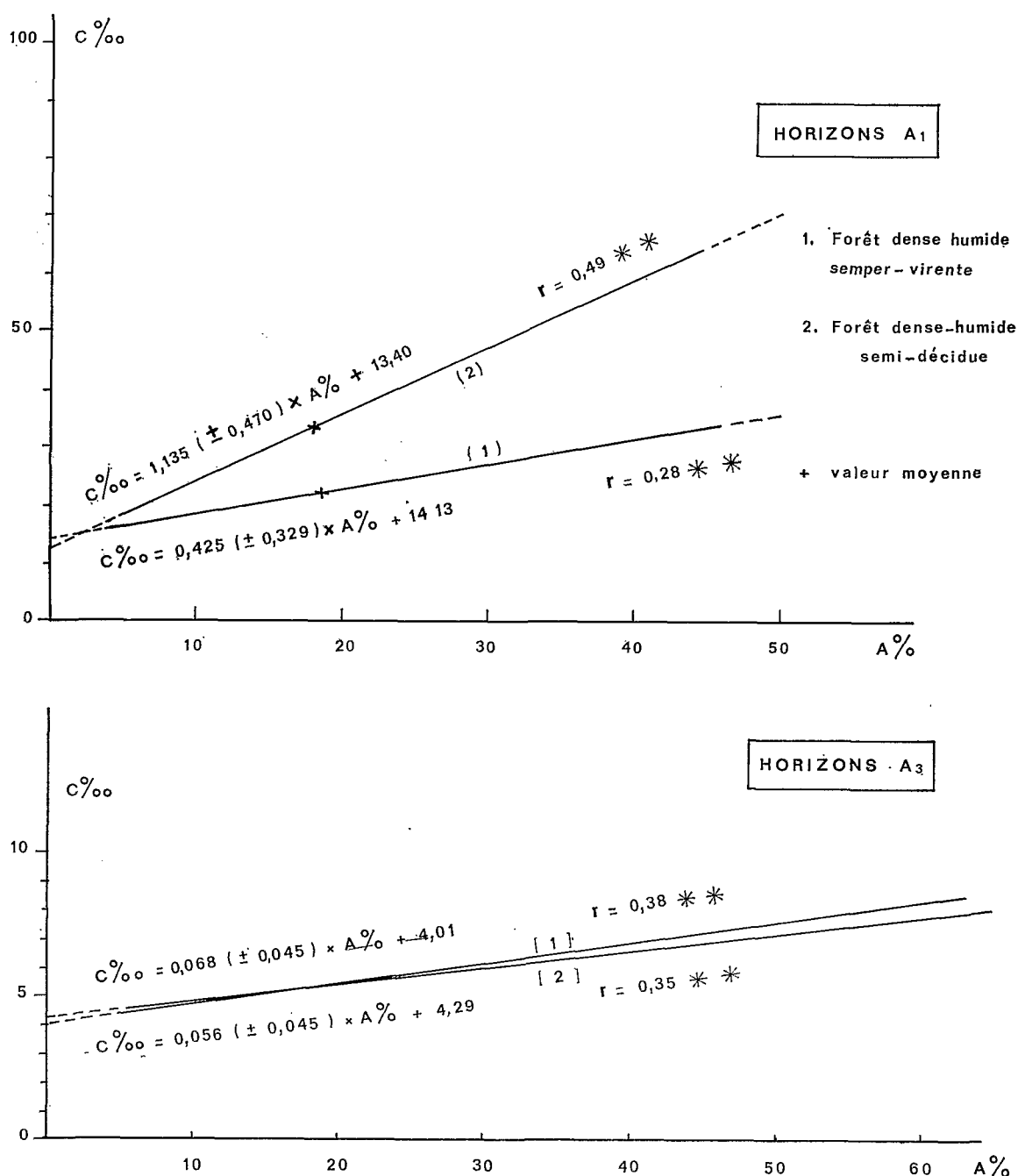


FIG. 6. — Relations entre la teneur en carbone et le taux d'argile pour les sols ferrallitiques forestiers ivoiriens issus de granite

d'après P. de BOISSEZON 1970

Qu'elles qu'en soient les causes, cette influence du taux d'argile est très importante ; et en particulier il n'est pas possible de se faire une idée valable de l'influence des autres facteurs (température, pluviométrie) sur la teneur en matières organiques des sols ferrallitiques sans tenir compte de la texture des sols (LAUDELOUT, 1962).

2.2.4. Influence du couvert végétal

Nous avons vu qu'en fonction du type de végétation naturelle (1) qui recouvre les sols ferrallitiques : forêt dense ou savane, l'apport annuel de matières organiques fraîches au sol est trois à cinq fois plus petit. Le rendement de transformation en humus serait toutefois plus élevé sous savane que sous forêt et le coefficient de minéralisation plus faible. Il en résulte au total que la teneur en matière organique des sols de savane (trente premiers cm) n'est inférieure que d'environ un tiers à celle des mêmes types de sols sous forêt. Remarquons que cette comparaison de la richesse en matière organique des sols

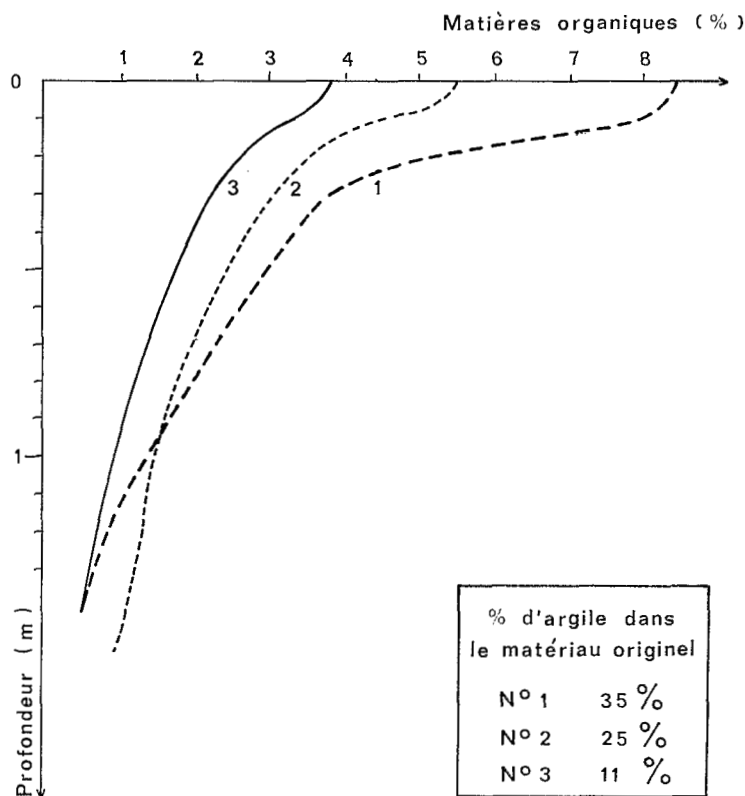


FIG. 7. — Répartition des matières organiques dans le profil de sols ferrallitiques fortement désaturés appauvris sous savane (de BOISSEZON 1965)

ferrallitiques en fonction du couvert végétal n'est vraiment valable que pour des sols de savane non édaphiques c'est-à-dire possédant un même type de climat, de position topographique, et de profil textural (BERLIER *et al.* 1956, BOISSEZON 1962, BOISSEZON et GRAS, 1970). Lorsque ce n'est pas le cas, cette comparaison des humus de forêt et de savane devient très complexe car à l'action de la végétation s'ajoutent des conditions pédoclimatiques différentes. Seule une analyse statistique sur les lois conditionnelles permettrait de préciser l'influence des différents facteurs (type de végétation, température, pluviométrie, texture, etc.) et les interactions entre ces influences.

(1) Seuls les types de végétation en équilibre avec le « climax » ou le « fire climax » sont envisagés ici. L'influence des plantes cultivées sur la richesse en matière organique des sols ferrallitiques sera étudiée dans un autre tome de cette revue bibliographique sur les sols ferrallitiques.

2.3 Le rapport C/N des matières organiques des sols ferrallitiques

D'une manière générale le rapport C/N dépend du type de végétation, ainsi que du mode et du degré d'évolution des matières organiques dans les sols donc secondairement des conditions pédoclimatiques :

2.3.1. Influence de l'altitude

HARDON (1936) avait montré pour les sols de forêt primaire de Java que ce rapport augmentait avec l'altitude. En 1948, JENNY *et al.* ont observé le même phénomène en Colombie. Le graphique n° 8 reproduit l'enveloppe des points correspondant à des sols

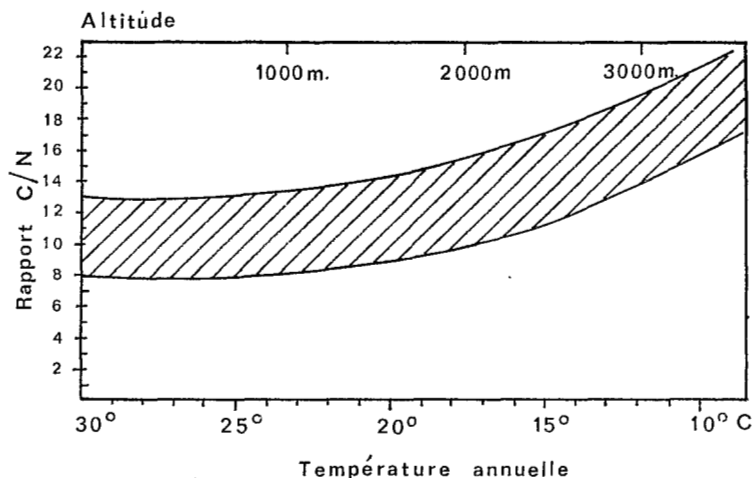


FIG. 8. — Rapport C/N des sols de Colombie en relation avec l'altitude et la température annuelle (d'après JENNY et Al. 1948)

forestiers ou cultivés de ce pays d'Amérique du Sud. Le rapport C/N augmente quand la température diminue. La dispersion des résultats est attribuée par JENNY à la couverture végétale variée, mais on peut penser cependant qu'il existe d'autres facteurs qui peuvent modifier ce rapport dans les sols.

2.3.2. Influence de la pluviométrie

CRAIG et HALAIS (1934) à l'Ile Maurice, puis DEAN (1938) aux Hawaï ont constaté qu'il existe une relation étroite avec la pluviométrie : le rapport C/N augmente avec celle-ci.

SEGALEN (1957) a tenté une synthèse de l'action de ces deux facteurs climatiques, en cherchant la relation existant entre le rapport C/N de divers sols malgaches et l'indice d'aridité de DE MARTONNE ($P/T + 10$). Il constate que le rapport C/N varie peu entre les valeurs 40 et 80 de cet indice climatique, mais augmente rapidement pour des valeurs supérieures à 80.

2.3.3. Influence du pédoclimat

Ce rapport dépend également du pédoclimat qui préside à l'évolution des matières organiques. Les facteurs principaux du pédoclimat qui paraissent avoir une action marquée sur le degré d'évolution des matières organiques du sol sont : la texture, la richesse en bases et la position topographique.

— Texture : les sols lourds sont généralement riches en une matière organique à rapport C/N élevé — inversement les sols ferrallitiques sableux ont un rapport C/N relativement faible, sauf dans le cas des sols ferrallitiques podzolisés à humus grossier (Cf. § 4.4.1).

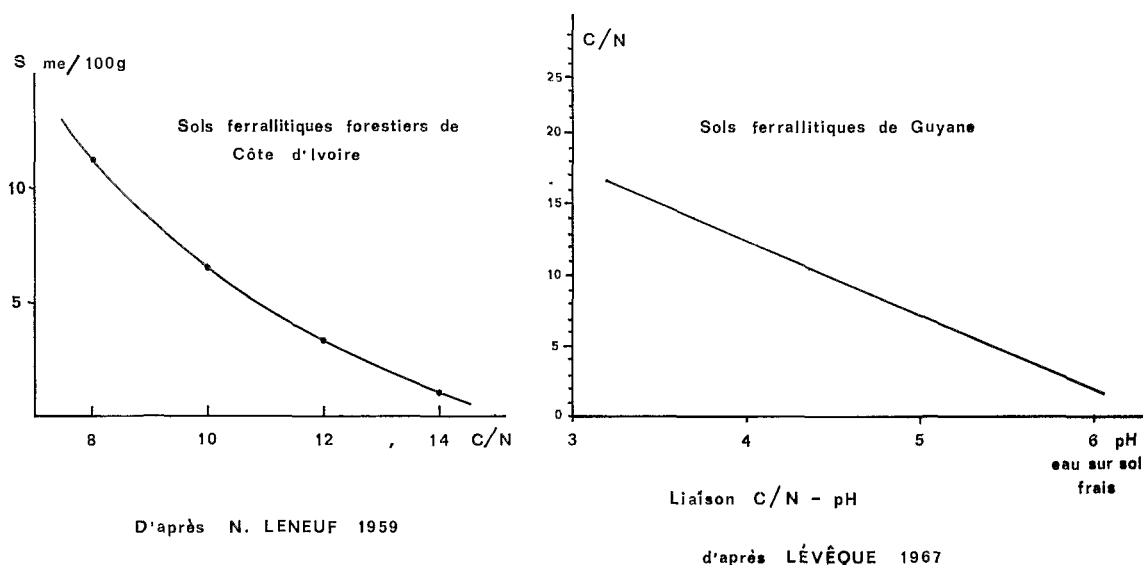


FIG. 9. — Relations entre le rapport C/N et la somme des bases échangeables ou le pH

— Richesses en bases : son influence sur le degré d'évolution des matières organiques a été également notée (LÉVÊQUE 1967, cf. graph. 9, BOISSEZON 1962, BACHELIER 1963, PERRAUD 1970).

Pour des types de végétation analogues, le rapport C/N décroît quand le sol est moins acide ou plus riche en bases (HARDON 1936, LENEUF 1959). Toutefois cette richesse en bases des horizons humifères n'est pas un facteur indépendant résultant uniquement de la nature du matériau originel. Elle dépend essentiellement, sous végétation naturelle, des modalités du cycle des éléments minéraux dans le sol et de la végétation qui dépend elle-même du climat (Cf. §§ 1.3.4 et 4.2).

— Position topographique : la position du sol le long des versants influe sur le pédo-climat, l'érosion et sur le degré d'évolution des matières organiques. Les portions de versant les plus érodées ont des sols peu humifères à rapport C/N relativement bas, parce qu'une partie de la litière et de l'horizon humifère de surface est constamment enlevée par l'érosion (BOISSEZON 1962, LÉVÊQUE 1967). Inversement les sols des bas de pente concaves bénéficient d'apport de matières organiques peu évoluées transportées par ruissellement et sont soumis à un engorgement temporaire qui favorise l'accumulation d'une matière organique à rapport C/N un peu plus élevé (BRUGIÈRE 1953).

2.3.4. Influence de la végétation

Le facteur le plus important qui influe sur le rapport C/N des matières organiques des sols ferrallitiques est cependant sans conteste le type de végétation. Très tôt les pédologues ont opposé les humus de forêt aux humus de savane ; non seulement en raison de la couleur plus sombre (grise ou noire) des derniers, mais surtout parce que leur rapport C/N est presque toujours plus élevé (MARTIN D. 1966). La pauvreté en azote des graminées de la savane et le fait que les processus de fixation d'azote y paraissent assez peu développés (AUBERT, 1964) sont peut-être à l'origine de cette différence. Toutefois il est également possible que les fines particules de charbon végétal provenant des feux de brousse soient dosées avec le carbone organique, tout au moins en partie, par les méthodes habituelles (WALKLEY et BLACK, ou ANNE). Il est donc probable que les rapports C/N plus élevés des sols de savane ne signifient pas que l'humus de ces sols est moins évolué, il semble plutôt que nos méthodes d'investigation sont faussées dans ce cas par la présence de carbone à l'état minéral (*cf.* § 3.2.4).

Le rapport C/N a néanmoins été utilisé pour différencier humus de forêt et humus de savane. Les chiffres cités par AUBERT (1959) paraissent toutefois un peu faibles :

	Horizons de surface	Horizons situés en dessous
Sols de forêt	8 à 12	7 à 9
Sols de savane	13 à 15	8 à 10

Les sols ferrallitiques de savane ont souvent un rapport C/N supérieur à 15 en surface et qui peut atteindre 18 à 20 même sur des sols bien drainés, mais relativement argileux (BOISSEZON et GRAS, 1970). De même les sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire ont un rapport C/N compris entre 12 et 14 dans l'horizon A₁ (BOISSEZON, 1970) et ceux de Guyane voisin de 15 en surface et même parfois supérieur pour les sols ferrallitiques humifères (LÉVÊQUE, 1967). En fait ces différences entre les rapports C/N des matières organiques des sols dépendent pour beaucoup de la profondeur des prélèvements.

2.3.5. Variations du rapport C/N avec la profondeur

Le rapport C/N décroît fortement avec la profondeur. Il varie parfois très rapidement d'un horizon à l'autre, en particulier dans la partie supérieure du profil des sols ferrallitiques forestiers. Il est donc essentiel pour ces sols, de bien préciser quel est l'horizon étudié. Encore aura-t-on souvent des variations suivant la manière dont est fait le prélèvement (DUCHAUFOUR, 1970). Inversement la comparaison des rapports C/N à des profondeurs standard ne donne qu'une mauvaise idée du degré d'évolution des matières organiques, parce que le développement des différents horizons humifères varie beaucoup, même pour des sols très analogues et très proches.

Au total il est donc très difficile d'utiliser le rapport C/N comme caractéristique de ces types d'humus.

2.4 Accumulation de matière organique dans les sols ferrallitiques

En conclusion, on peut dire que la richesse en matière organique, sa répartition dans le profil et le rapport C/N de ces matières organiques des sols ferrallitiques paraissent très variables en fonction du type de végétation, du climat et du pédoclimat (température, pluviométrie, texture, saturation en bases, position topographique, etc.).

La distinction faite dans différentes classifications et en particulier celle d'AUBERT et SEGALIN (1966), en fonction de la teneur en matière organique est certainement commode et justifiée, mais peut-être un peu simplificatrice. En même temps que la teneur en matière organique d'un sol augmente, son degré d'évolution varie comme l'indiquent les modifications du rapport C/N, et la répartition des matières organiques dans le profil n'est pas toujours la même. On compare des teneurs en carbone d'horizons humifères contenant des matières organiques assez différentes et qui se forment dans des conditions pédoclimatiques plus ou moins favorables à l'accumulation de matières organiques (influence de la texture par exemple).

Il semble donc que pour refléter plus fidèlement l'influence de l'altitude, de la température plus fraîche et de la pluviométrie plus forte sur l'accumulation de matière organique dans les horizons supérieurs de certains sols ferrallitiques, il faudrait tenir compte de la texture du sol ; et les valeurs limites requises pour la teneur en matière organique des sols « humifères » et « humiques » devraient être définies pour chacune des grandes classes texturales de sols ferrallitiques.

3 - COMPOSITION DE L'HUMUS DES SOLS FERRALLITIQUES

Le fractionnement physique ou chimique des composés organiques qui constituent l'humus se heurte à de sérieuses difficultés. En effet la séparation des matières organiques incomplètement décomposées, de la fraction humifiée ne peut se faire de façon précise étant donné l'existence de produits intermédiaires tels que la lignine plus ou moins transformée (DUCHAUFOUR, 1957). Les débris végétaux en voie de décomposition contiennent déjà des composés hydrosolubles précurseurs d'acides humiques (KONONOVA, 1961). Enfin certaines fractions humifiées sont étroitement associées aux matières minérales des sols (humine) de sorte que leur extraction par différentes méthodes, même après des prétraitements énergiques, n'est pas toujours possible. Cette fraction difficile à isoler est particulièrement importante dans les humus de sols ferrallitiques.

S'il est donc possible de caractériser les humus de sol ferrallitique par l'importance relative de différentes fractions séparées par diverses techniques, les résultats obtenus sont fonction des conditions standardisées de ces méthodes d'extraction ou de fractionnement.

Par ailleurs on ne peut pas considérer que ces fractions obtenues sont spécifiques ; en ce sens que la nature chimique des divers composés organiques extraits en même temps n'est généralement pas la même. Il apparaît plutôt que les composés organiques contenus dans ces diverses fractions ont comme point commun leur mode de liaison avec les matières minérales du sol et/ou leur domaine de solubilité.

3.1 *Séparation des composés humiques et des matières organiques fraîches*

La méthode au bromure d'acétyle qui dissout les matières organiques fraîches et ne dissout pas les composés humiques de néoformation (SPRINGER, 1952) ne paraît pas avoir été utilisée pour la séparation des matières humifiées des sols ferrallitiques si ce n'est récemment pour l'étude de l'humine (cf. § 3.2.4).

Les *méthodes densimétriques* (LEIN 1940, HENIN et TRUC 1950, MONNIER *et al.* 1962) ont par contre été utilisées sur divers sols ferrallitiques pour séparer les fractions légères ou libres, et les matières organiques humifiées liées à la matière minérale (fraction lourde). Les résultats présentés par PERNET (1952) en utilisant la méthode Henin et Turc, montrent que les différentes fractions densimétriques sont plus ou moins riches en matières organiques (fig. 10). Les fractions de densité supérieure à 2,4 ne contiennent pratiquement plus de matière organique pour les sols issus de gneiss ; mais pour les sols issus de basalte cette fraction lourde contient encore des taux relativement importants de matières humifiées (PERNET, 1953). Pour les fractions de densité inférieure à 2,4, il ne semble pas, toujours d'après PERNET, que l'on aboutisse à une différenciation sélec-

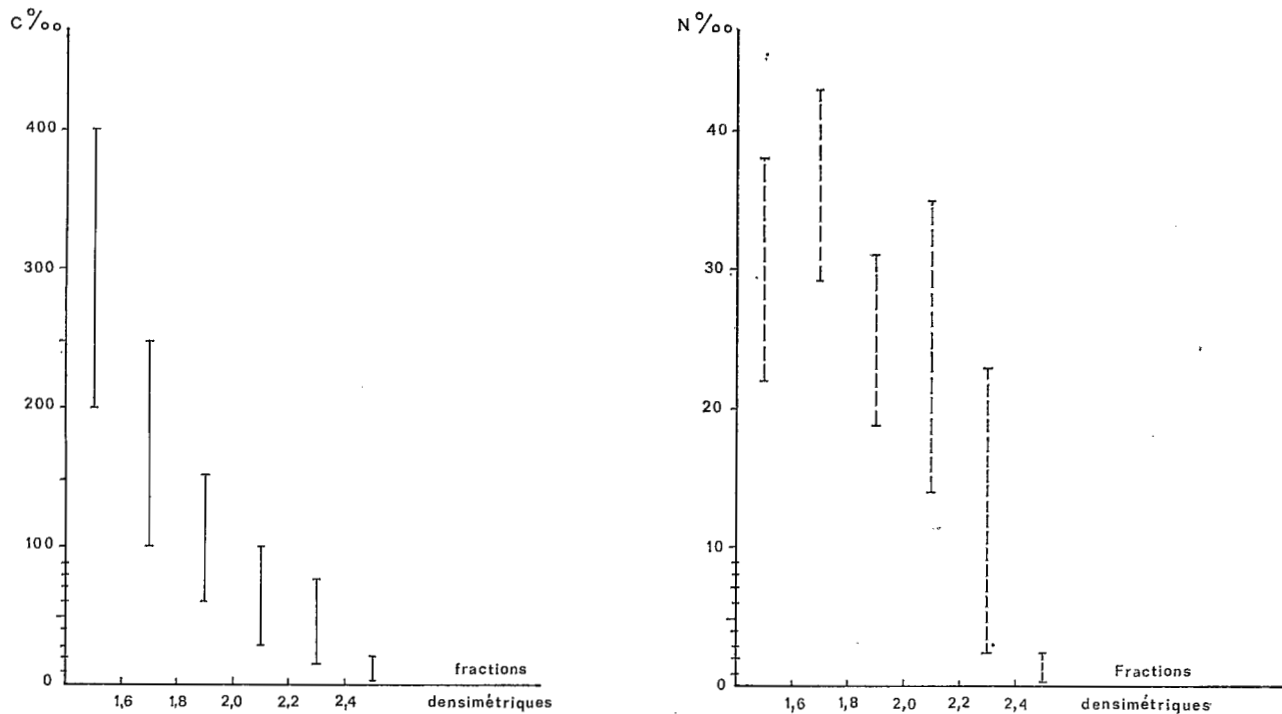


FIG. 10. — Teneur en matières organiques des fractions densimétriques de sols malgaches d'après PERNET (1952)

tive des diverses substances humiques, et en particulier les acides humiques et fulviques (Cf. *infra*) se répartissent dans les différentes fractions densimétriques.

La technique mise au point par MONNIER *et al.* (1962) est moins délicate (broyage très fin et centrifugation) et donne des résultats plus reproductibles. La limite (1,8 ou 2,0) pour la densité maximum de la fraction libre reste quelque peu arbitraire et devrait être testée au préalable pour chaque type de sols ferrallitiques (examen des fractions à la loupe binoculaire, et teneur en argile des diverses fractions).

Le pourcentage de matières organiques légères est en général assez faible dans le cas des sols ferrallitiques (Cf. § 3.2.4 et fig. 13), ce qui confirme la décomposition rapide des débris organiques dans ces sols.

BATES (1960) a tenté un fractionnement granulométrique par tamisage dans l'eau, sans dispersant. Dans la partie supérieure d'un sol ferrallitique sous forêt semi-décidue au Nigeria, les résidus végétaux obtenus par décantation représentent 18 % des matières organiques totales ; mais la plus grande partie de cette dernière semble se localiser dans les agrégats de la taille des limons grossiers.

3. 2 Matières humiques extractibles des sols ferrallitiques

L'extraction des « matières humiques » des sols ferrallitiques a été réalisée par de nombreux auteurs, soit en utilisant des bases alcalines (NaOH, NH₄OH diluées, à froid, soit des solutions de sels neutres de métaux alcalins (oxalate, fluorure, pyrophosphate de sodium). Les matières organiques ainsi solubilisées, ou « matières humiques totales » (MHT), sont plus ou moins importantes suivant la technique utilisée. Les avantages et inconvénients (efficacité, risques d'artéfacts) des différentes méthodes ont été étudiés en détail par HENNEBERT et LIVENS (1953) et par THOMANN (1963), DABIN et THOMANN (1970), dans le cas de sols ferrallitiques.

3.2.1. Taux d'humification ou plus exactement d'extraction

Le taux d'humification, ou plutôt le pourcentage de carbone humifié extractible correspond au rapport :

$$\frac{C_{MHT}}{C_{Total}} \times 100$$

Ce taux de carbone humifié dépend de la méthode d'extraction des matières humiques utilisée. Il est en général assez faible (10 à 35 %) dans le cas des sols ferrallitiques, même si on utilise les réactifs d'extraction les plus efficaces comme le pyrophosphate ou la soude diluée. Il varie sensiblement avec la technique utilisée (rapport sol/réactif d'extraction, temps de contact, agitation, broyage préalable plus ou moins poussé, etc.). Il est donc difficile de caractériser les différents types d'humus par ce pourcentage. Seules des conditions strictement standardisées permettent de faire quelques comparaisons valables (tabl. 8).

Comme dans le cas de la richesse en matière organique, l'influence des différents facteurs du pédoclimat sur le « taux d'humification » est difficile à apprécier. Il semble

TABLEAU N° 8. — Valeurs caractéristiques de quelques humus de sols ferrallitiques (d'après DUCHAUFOR et DOMMERGUES 1963 et TURENNE 1969) (Horizon A₁)

Climat	Sols ferrallitiques	T. Hum. %	AF/AH	AH %		
				bruns	interm.	gris
Soudano-guinéen (forêt)	Faiblement désaturés en surface (Sénégal-Casamance)	11,4	1,22	36,7	11,1	52,2
		25,0	0,72	39,6	9,6	50,8
		18,7	0,48	37,4	9,6	53,0
Guinéen forestier (forêt)	Sols fortement désaturés en surface et profondeur (sud Côte d'Ivoire) (1)	19,0	1,18	51,8	13,9	34,3
		28,6	1,31	55,9	13,1	31,0
		20,5	0,92	42,3	16,9	40,8
		40,6	0,91	47,8	20,9	31,3
Forêt	Sols ferrallitiques fortement désaturés en surface et profondeur (1)	28	0,96	38	15	46
Savane	lessivés hydromorphes (1) (Guyane)	41	1,08	41	21	47
		61,5	1,0	64	15	21

(1) Sols ferrallitiques très sableux.

ependant que ce taux augmente avec l'altitude (SEGALEN, 1957), mais ces matières humiques plus abondantes sont alors constituées par des composés peu polymérisés : acides humiques bruns, acides fulviques (*Cf. infra*) (SIFFERMANN *et al.* 1968). L'influence de la texture est peu nette, si ce n'est que les « taux d'humification », ou plus exactement de solubilisation, les plus élevés ont été observés dans certains sols ferrallitiques très sableux (tabl. 8) (DUCHAUFOUR *et al.* 1963, TURENNE 1969, BOISSEZON *et al.* 1970).

L'augmentation du « taux d'humification » avec la profondeur est par contre un caractère général.

3.2.2. Rapport Acides fulviques/Acides humiques (AF/AH)

On a coutume de séparer ces deux fractions humiques par acidification : les acides humiques (AH) floculent, les acides fulviques (AF) restent solubles. Toutefois les conditions dans lesquelles sont effectuées l'extraction des matières humiques, puis cette séparation, paraissent avoir une importance non négligeable sur les pourcentages relatifs. En particulier à des pH inférieurs à 1 certains acides humiques redeviennent solubles (DE BRITO 1969, FLAIG 1970). Le rapport AF/AH, ou plus exactement le quotient des teneurs en C de ces deux fractions, sont très variables dans l'horizon A₁ des divers sols ferrallitiques.

Le plus souvent ce rapport est compris entre 0,5 et 1,5. Il augmente presque toujours avec la profondeur ; et dans les horizons A₃ ou B de sols ferrallitiques, il est en général nettement supérieur à 1.

3.2.3. Fractionnement des matières humiques des sols ferrallitiques selon la méthode de TYURIN (1951) ou TYURIN modifiée par DUCHAUFOUR (1960)

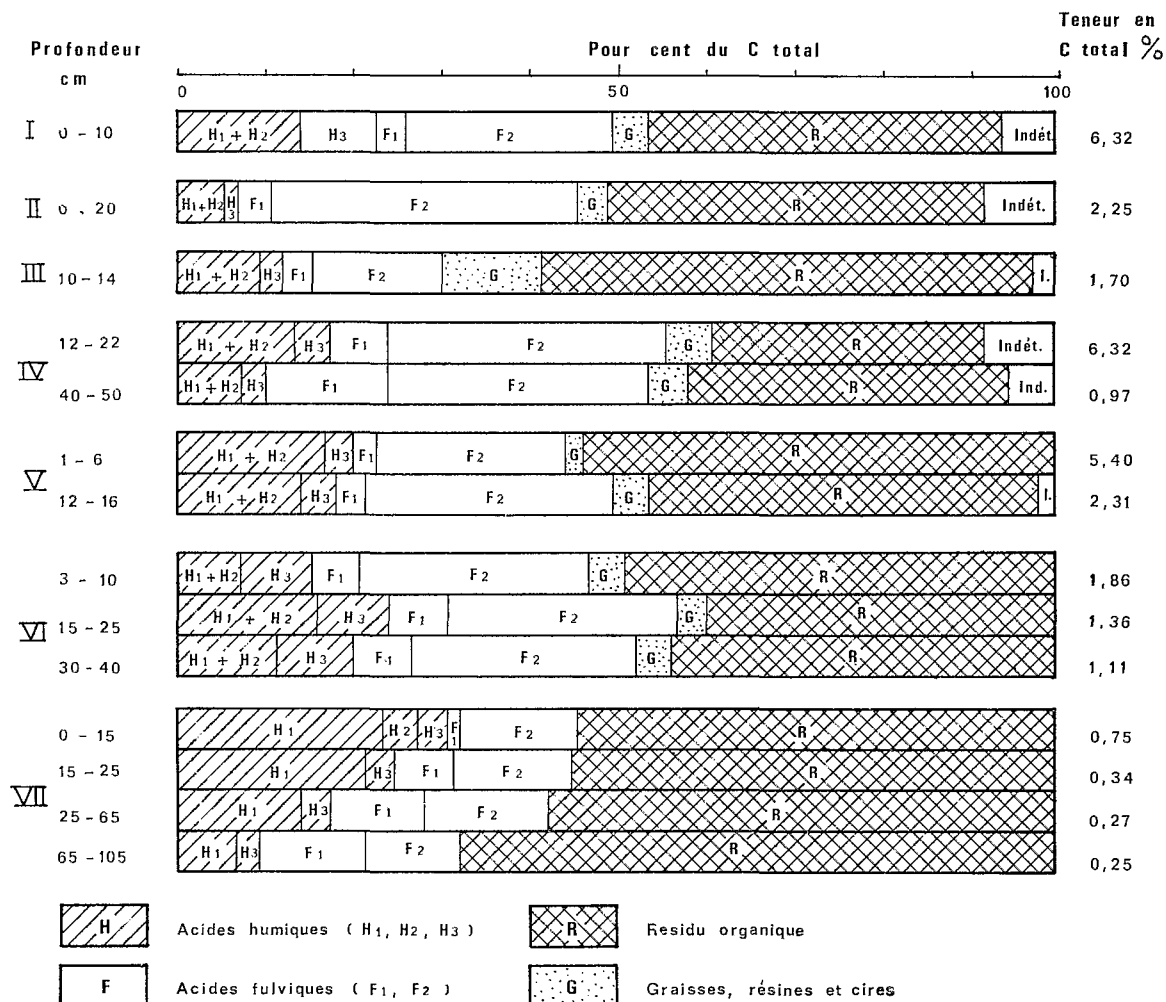
Dans cette méthode, les différentes fractions humiques sont extraites par les acides ou par la soude, après ou sans prétraitements. On distingue :

F₁. — *les acides fulviques libres* (extraits par SO₄H₂, 0,05 N). Ces composés très acides et agressifs vis-à-vis des colloïdes minéraux sont peu abondants (3 à 10 % des MHT) dans les horizons humifères de surface des sols ferrallitiques analysés (fig. 11 et 12). Leur importance relative paraît nettement augmenter avec la profondeur (migration ou biodégradation ?) (RICHE, 1964). Toutefois lorsque l'extraction par le mélange Ethanol-Benzène (graisses, cires, tanins...) précède cette extraction par SO₄H₂ diluée, c'est surtout cette fraction F₁ qui se trouve minorée (KONONOVA *et al.*, 1961).

F₂ et F₃ — *les acides fulviques liés aux acides humiques* (ils sont extraits par la soude diluée en même temps que les différents acides humiques (*Cf. infra*). Ces corps réputés comme moins mobiles que les précédents et moins acides, sont beaucoup mieux représentés dans les sols ferrallitiques puisqu'ils constituent 25 à 70 % des MHT dans l'horizon A₁. Dans l'horizon A₃ ou B, les teneurs en acides fulviques décroissent moins vite que les teneurs en acides humiques ; et ils représentent généralement plus de la moitié des MHT.

H₁ — *les acides humiques libres* (extraits directement à la soude diluée). Ce sont des « acides humiques bruns » (*Cf.* § 3.2.4). Il s'agit généralement d'acides humiques à petites molécules et faiblement liés à l'argile et aussi de « précurseurs d'acides humiques ». Cette fraction est semble-t-il toujours bien représentée dans les horizons humifères de surface des sols ferrallitiques, mais elle diminue fortement avec la profondeur (DABIN et THOMANN, 1970).

H₂ — *les acides humiques liés à l'argile par Ca* (extraits par la soude après décalcification préalable) ils sont étroitement adsorbés par les colloïdes minéraux et constituent une des formes d'acides humiques « gris ». Cette fraction semble mal représentée en général dans les sols faiblement ferrallitiques du Sud Sénégal (THOMANN, 1963) ainsi que dans 2 des 3 sols ferrallitiques typiques d'Angloa (FRANCO, 1968), et sont pratiquement absents dans les sols latéritiques de Chine (TU MEN CHAO, 1961).



- I. Sol latéritique sur calcaire (Chine) (1) V. Sol latéritique humique de montagne sur granite (Vietnam) (1)
- II. Sol latéritique sur basalte (Vietnam) (1)
- III. Sol latéritique humique de montagne sur grès (Chine) (1) VI. Sol jaune sous forêt humide altitude moyenne (Chine) (3)
- IV. Sol latéritique humique de montagne sur gneiss (Vietnam) (1) VII. Sol faiblement ferrallitique sur sables argileux (Sénégal) (2)

FIG. 11. — Fractionnement des matières humiques de divers sols ferrallitiques (suivant la méthode TIURIN ou TIURIN modifiée DUCHAUFOUR)

H₃ — les acides humiques liés à l'argile par l'intermédiaire des sesquioxydes (Ils ne peuvent être extraits du sol que par des traitements alternés SO₄H₂ N/10 à chaud, et NaOH). C'est donc une fraction difficilement extractible qui peut être considérée comme faisant déjà partie de l'humine, puisque pour l'extraire, il faut modifier sérieusement le complexe minéral du sol. Cette fraction H₃ paraît assez bien représentée dans les différents horizons des sols ferrallitiques de basse Côte d'Ivoire (RICHE, 1964) et d'Asie du Sud

(1) D'après NIU CHIN WEN, 1961.
 (2) D'après CH. THOMANN, 1964.
 (3) D'après TU MEN CHAO, 1961.

Est ; elle paraît par contre assez faible pour les sols du Sénégal et d'Angola, analysés par cette technique.

Ces quelques résultats sur le fractionnement des matières humiques de sols ferrallitiques ne concordent pas parfaitement ; on peut y voir deux causes :

— la méthode Tyurin est longue et délicate et chaque auteur applique une technique particulière, qui ne diffère pas fondamentalement dans son principe de la méthode origi-

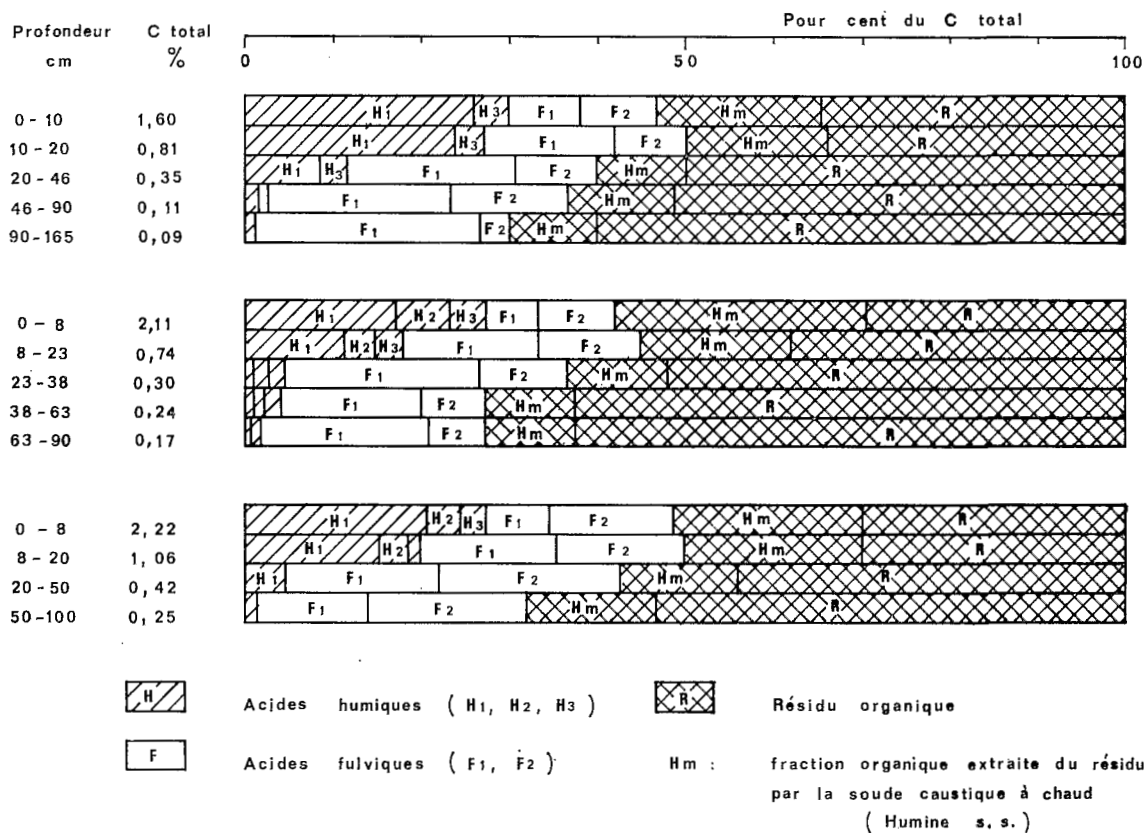
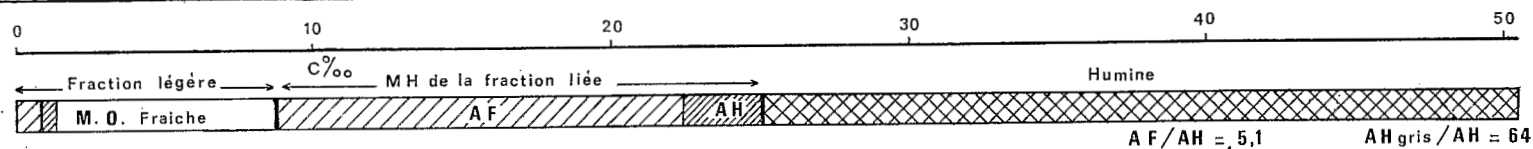


FIG. 12. — Fractionnement des matières humiques de sols ferrallitiques d'Angola (d'après PINTO RICARDO 1968) suivant la méthode TYURIN modifiée DUCHAUFOR

nelle, mais qui peut amener une certaine variation dans les résultats. Nous noterons en particulier l'influence de la méthode de précipitation et de lavage des acides humiques en milieu plus ou moins acide, la présence d'argile dispersée dans les extraits sodiques qui risque de fausser les résultats des dosages (DUCHAUFOR et JACQUIN, 1963). Enfin le dosage des composés humiques par leur pouvoir réducteur est rendu très imprécis quand on ajoute à la solution du chlorure de sodium pour flocculer les argiles (Cl⁻ → Cl⁰). Il est préférable d'utiliser du sulfate de sodium.

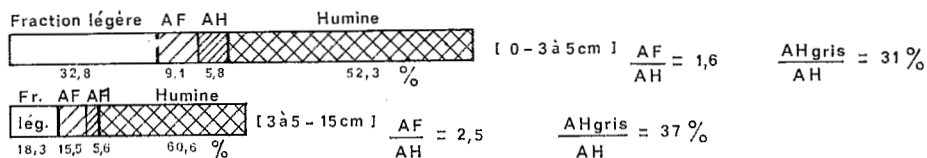
— malgré ces différences imputables aux techniques, il semble cependant qu'il existe une certaine hétérogénéité dans la composition des matières humiques de ces divers sols ferrallitiques. Les études plus récentes par électrophorèse semblent le confirmer.

Sol ferrallitique humique d'altitude (prairie à Loudetia stipoïdes) d'après Duchaufour et Jacquin (1966)

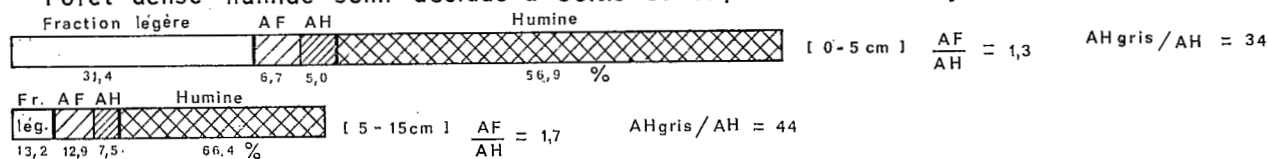


Sols ferrallitiques forestiers de Côte d'ivoire d'après Perraud (1970)

Forêt dense humide semper - virente



Forêt dense humide semi-décidue à Celtis et Triplochiton scleroxylon



Forêt dense semi-décidue à Aubrevillea kerstingui et Kaya grandifolia et forêt dense sèche à Anogeissus leiocarpus et Cola cordifolia

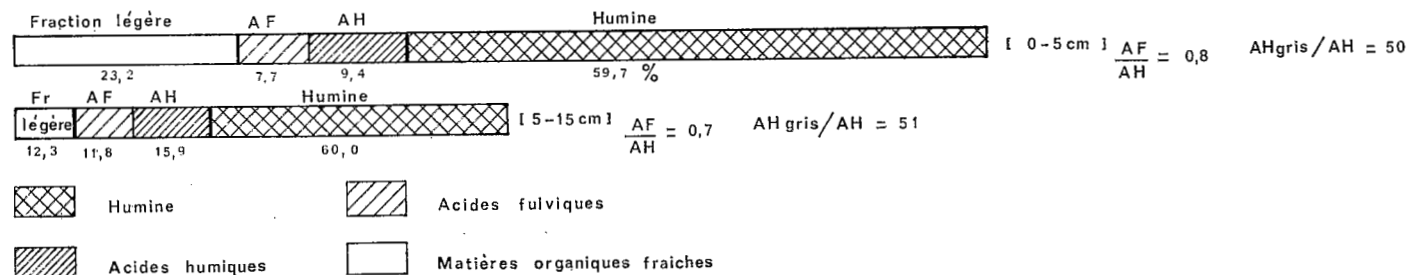


FIG. 13. — Fractionnement des matières organiques des sols ferrallitiques (Méthode DUCHAUFOUR - JACQUIN 1966)

3.2.4. Fractionnement des matières humiques des sols ferrallitiques par la méthode DUCHAUFOUR-JACQUIN (1966)

Cette méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques est une combinaison :

- de la méthode densimétrique de MONNIER *et al.* (1962) (Cf. § 3.1),
- des méthodes utilisant le pyrophosphate de sodium et la soude (KONONOVA *et al.* 1961) pour l'extraction des matières humiques,
- et l'électrophorèse sur papier pour la séparation des divers acides humiques (JACQUIN, 1963).

La séparation densimétrique permet comme nous l'avons vu de séparer :

- une fraction légère qui correspond essentiellement à la matière organique libre, c'est-à-dire des débris végétaux ou animaux encore organisés,
- et une fraction lourde liée aux matières minérales des sols. Le choix de la densité limite : 1,8 (DUCHAUFOUR-JACQUIN, 1966) ou 2 (PERRAUD, 1969) paraît quelque peu arbitraire, car la fraction légère ne devrait contenir que des matières organiques fraîches, en fait elle contient toujours une certaine quantité d'argile et de matière humifiée solubles dans le pyrophosphate de sodium. Toutefois ces matières humifiées contenues dans la fraction légère (d inférieure à 2) paraissent relativement limitées dans le cas des sols ferrallitiques.

Le fractionnement chimique est réalisé grâce à trois extractions successives :

- la première par le pyrophosphate de sodium à pH 7 en présence de SO_4Na_2 ,
- puis par le pyrophosphate M/10 à pH : 9,8,
- enfin par la soude N/10.

Ce fractionnement chimique est complété par une analyse électrophorétique des acides humiques sur papier, en milieu tamponné (pH : 7,4). On détermine ainsi les pourcentages d'acides humiques mobiles (AH bruns), moyennement mobiles (AH intermédiaires), peu ou non mobiles (AH gris).

Les résultats de ces différentes déterminations réalisées sur des *sols ferrallitiques forestiers* indiquent que :

a) les matières organiques non extractibles contenues dans la fraction lourde ou « *humine* » constituent à elles seules plus de la moitié des matières organiques totales. Cette abondance de l'humine dans les horizons humifères de sols ferrallitiques rapprocherait ce type d'humus du « *mull* » des pays tempérés. Toutefois la nature de cette humine est encore très mal connue. Une faible partie de cette humine est solubilisable après traitement par SO_4H_2 dilué à chaud (Cf. § précédent), ce qui laisse à penser que l'insolubilisation de ces composés humiques serait favorisée par la grande quantité d'oxydes de fer et/ou d'alumine.

Une autre partie, mais encore plus faible est solubilisable par les solvants alcalins après destruction des argiles par attaque HCl - HF. Mais la plus grande partie de l'humine des sols ferrallitiques demeure insoluble dans les solvants alcalins, même après ces prétraitements énergiques.

La solubilité dans le bromure d'acétyle a permis à PERRAUD *et al.* (1971) de distinguer :

- des matières organiques fraîches ou peu évoluées en quelques sortes séquestrées par les sesquioxides,
- et des matières organiques transformées peut-être assez proches de la lignine, mais pas suffisamment transformées pour être solubles dans les solvants alcalins, ou bien des composés très polymérisés dans lesquels la diminution des groupements fonctionnels par rapport au nucléus entraîne l'insolubilisation dans les réactifs alcalins.

Les pourcentages de chacune de ces fractions par rapport au carbone total sont les suivants pour l'horizon humifère de surface d'un sol ferrallitique faiblement acide :

TABLEAU 9

Matière organique fraîche libre (fraction densimétrique)	20 %
Matières humiques totales (extractions par les réactifs alcalins)	22 %
Humine :	
— mat. humiques liées par Fe (prétraitement SO_4H_2)	8 %
— mat. humiques liées à l'argile (prétraitement HCl-HF)	5 %
— mat. orga. fraîche séquestrée (soluble dans $\text{CH}_3\text{CO Br}$)	18 %
— mat. orga. transformée (insoluble dans $\text{CH}_3\text{CO Br}$)	27 %

b) la fraction légère (d. inf. à 2) est en général nettement plus faible dans les sols ferrallitiques analysés, puisqu'elle contient environ 20 à 30 % du carbone total pour l'horizon A_{11} et 10 à 20 % pour l'horizon A_{12} (PERRAUD 1970, fig. 13).

c) les *matières humiques* (s.s.) proviennent surtout de la fraction lourde et ne représentent que 10 à 25 % des matières organiques totales de l'horizon A_{11} des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. Leur importance relative croît avec la profondeur.

Le rapport AF/AH (somme des différentes extractions) est assez variable suivant les sols ferrallitiques étudiés. Pour les sols sous forêt dense humide sempervirente, il est compris entre 1 et 1,5 dans l'horizon A_{11} , mais il devient inférieur à 1 sous forêt dense semi-décidue. Il augmente sensiblement avec la profondeur sauf pour ce dernier type de sols forestiers (fig. 13).

d) les travaux de DUCHAUFOUR et DOMMERGUES (1963) et surtout ceux de E. et A. PERRAUD (1969) sur l'électrophorèse des acides humiques ont par ailleurs montré que :

— les acides humiques intermédiaires sont faiblement représentés dans ces sols ferrallitiques forestiers (fig. 14).

— les acides humiques bruns sont en général dominants, spécialement sous forêt dense humide sempervirente.

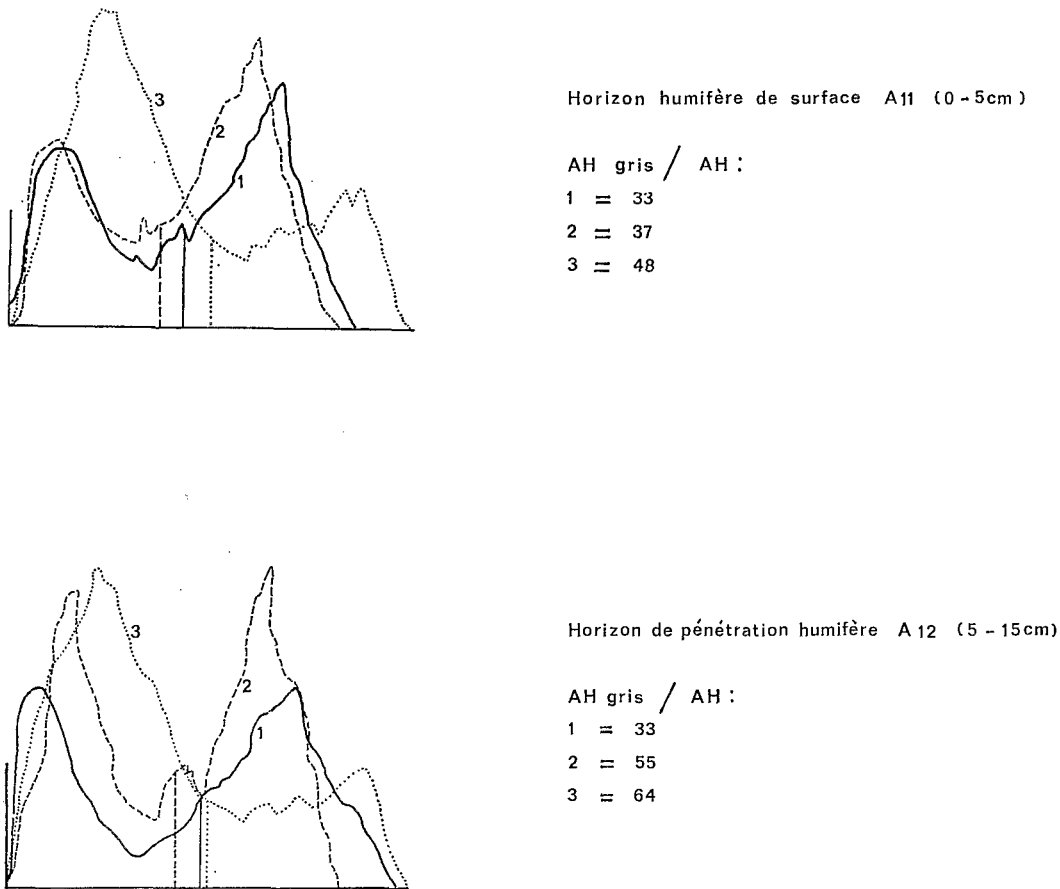
— le taux d'acides humiques gris augmente relativement en profondeur. Il est plus élevé que le taux d'acides humiques bruns dans les sols ferrallitiques sableux même sous forêt dense humide sempervirente (TALINEAU *inédit*), et il atteint des valeurs voisines de 50 % pour les sols forestiers de la zone de transition avec un climat à saison alternante plus marquée (DUCHAUFOUR *et al.* 1963, PERRAUD 1970).

Pour les *sols de savane*, quelques résultats ont été publiés par LEROUX (1969), mais il s'agit de sols ferrallitiques assez sableux, au moins en surface, intergrades avec les sols ferrugineux et à complexe absorbant presque saturé.

La fraction légère paraît plus importante que sous forêt claire, malgré des teneurs en matières organiques totales plus faibles. La couleur noire de cette fraction légère serait due selon les observations de l'auteur à l'abondance de fines particules de charbon végétal.

La fraction humifiée extractible se caractérise par des rapports AF/AH de l'ordre de 0,4 pour l'horizon A_1 , et nettement supérieurs à 1 en profondeur. Ce rapport AF/AH est plus élevé en saison des pluies qu'en saison sèche surtout en profondeur (polymérisation ou condensation des acides fulviques en acides humiques due à la dessiccation).

L'électrophorèse des acides humiques montre une dominance des acides humiques gris (55 % ou plus dans l'horizon A_1). Les acides humiques bruns sont un peu mieux représentés que les acides humiques intermédiaires.



- 1 ——— Sous forêt dense humide semper-virente
 2 - - - - - Sous forêt dense humide semi-décidue à *Celtis* ssp. et *Triplochiton scleroxylon*
 3 Sous îlot de forêt dense semi-décidue à *Aubrevillea kerstingii* et *Khaya ivorensis* (zone préforestière)

d'après A. Perraud 1970

FIG. 14. — *Electrophorèse des acides humiques de sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire*

Les résultats obtenus par BOULVERT (1968, 1969, 1970, 1971) sur un échantillonnage plus étendu de sols ferrallitiques de savane de République Centre-Africaine confirment :

— la prédominance en surface des acides humiques sur les acides fulviques tandis qu'en profondeur c'est l'inverse.

— l'importance relative plus grande, sous savane que sous forêt, des acides humiques gris par rapport aux acides humiques bruns ; tandis que les acides humiques intermédiaires sont dans les deux cas faiblement représentés.

Conclusion :

Ces quelques résultats analytiques ne permettent évidemment pas de caractériser tous les types d'humus de sols ferrallitiques. Il semble cependant que l'humine soit toujours

supérieure à 50 % des matières organiques totales. La fraction humifiée, c'est-à-dire directement extractible par les solvants alcalins ne représente que 10 à 35 %. Ces matières humiques sont en général assez peu polymérisées puisque les acides fulviques et acides humiques bruns l'emportent sur les acides humiques gris.

Toutefois lorsque l'on passe du domaine équatorial au domaine intertropical humide à saisons contrastées, les taux d'acides fulviques et d'acides humiques bruns diminuent généralement, tandis que le pourcentage d'acides humiques gris augmente. PERRAUD (1971) a montré que dans l'humine l'importance relative des matières organiques transformées (insolubles dans CH_3COBr) augmente relativement. Ce type d'humus ferait alors transition avec celui des sols bruns eutrophes tropicaux.

Il semble donc que le passage d'un régime constamment humide, à un régime d'alternance hydrique marqué s'accompagne d'une tendance à la polymérisation ou à la condensation des matières humiques. Mais nous remarquerons qu'en même temps la saturation en bases de ces matières organiques devient plus élevée. Cette richesse en cations, en particulier alcalino-terreux, peut également jouer un rôle important dans l'orientation de ce processus de transformation ou de néosynthèse des matières humiques pour les sols ferrallitiques des zones à climat nettement alterné (Cf. § 4.2).

3.2.5. *Nature et propriétés des « matières humiques » des sols ferrallitiques*

Les diverses fractions des « matières humiques » extraites ou fractionnées par les méthodes que nous venons de rappeler, ne sont pas constituées par des matières organiques de composition chimique strictement homogène. Des purifications ou des fractionnements chimiques complémentaires sont par ailleurs nécessaires pour éliminer les traces d'argile, ou d'éléments minéraux (sesquioxides en particulier) qui ont été extraites en même temps, et pour aboutir à des fractions constituées de composés organiques présentant un certain nombre de propriétés physico-chimiques communes. Ces purifications sont relativement délicates et les méthodes les plus efficaces risquent d'entraîner soit des pertes (cofloculation avec les argiles), soit des modifications de ces matières humiques (hydrolyse acide, ou oxydation en milieu basique).

En fait, les auteurs qui se sont intéressés aux propriétés des matières humiques des sols ferrallitiques se sont contentés généralement de centrifuger les solutions d'extraction, de répéter les précipitations des acides humiques et de soumettre les solutions obtenues à une dialyse assez poussée.

— *Analyse élémentaire des acides humiques et fulviques des sols ferrallitiques*

Les quelques résultats publiés ont été rassemblés dans le tableau 10. Les teneurs en carbone des acides humiques des sols ferrallitiques sont tout à fait analogues à celles des acides humiques d'autres types d'humus (Cf. KONONOVA, 1961). Les teneurs en azote sont également moyennes, et au total le rapport C/N des acides humiques de sols ferrallitiques serait compris entre 14 et 17.

Le rapport C/H des acides humiques de sols ferrallitiques est de l'ordre de 12. Cette valeur relativement basse par rapport aux chiffres cités pour d'autres types de sols (KONONOVA 1961, NIU CHIN WEN 1962), laisse à penser que les acides humiques des sols ferrallitiques ont un caractère aromatique légèrement plus marqué que ceux des sols podzoliques, de certaines terres rouges ou de sols tourbeux, mais nettement inférieur à celui des acides humiques de chernozems ou des vertisols. Nous verrons que ce faible degré de condensation des noyaux aromatiques paraît confirmé par les résultats de densité optique.

Les teneurs en oxygène des acides humiques des différents types d'humus paraissent très analogues (31 à 33 %) (NIU CHING WEN 1962). Celles des acides humiques de sols

ferrallitiques paraissent cependant inférieures aux chiffres cités par KONONOVA (1961), pour les chernozems, rendzines, et sols podzoliques, ce qui indiquerait que les groupements carboxyles, carbonyles et hydroxyles sont moins bien représentés dans les acides humiques de sols ferrallitiques (*Cf. infra* : capacité d'échange).

La seule analyse d'acides fulviques d'un sol dit « latéritique » a été publiée par NIU CHING WEN (1962). Ces acides fulviques ont une teneur en carbone faible (45 %) et une teneur en oxygène nettement plus élevée que pour les acides humiques. Ceci peut être mis en relation avec la capacité d'échange cationique plus élevée des acides fulviques que pour les acides humiques.

TABLEAU N° 10. — Composition élémentaire des acides humiques et fulviques de quelques échantillons de surface de sols ferrallitiques d'Angola (Domaine de variation) d'après RUI PINTO RICARDO 1961 et de République Populaire de Chine (NIU CHING WEN 1962)

	C %	N %	H %	O %	C/N	C/H	Cen- dres %	P* %	Fe* %	Al* %
Sols ferrallitiques d'Angola (ac. humiques) { max.	57,7	3,7	4,8	—	17,0	12,4	5,9	0,39	2,29	1,03
{ min.	56,3	3,4	4,5	—	15,6	12,0	0,5	0,07	0,11	0,13
Sol latéritique sur calcaire de Chine										
Ac. humiques	58,7	4,1	4,9	32,4	14,3	12,0	4,2			
Ac. fulviques	45,0	3,0	4,7	47,3	14,5	9,6	6,9			

* Valeurs rapportées au poids d'acides humiques séchés à 100° C.

— Teneurs en cendres des acides humiques

Cette teneur dépend des conditions de purification des extraits humiques. Il est probable, comme le fait remarquer RICARDO (1961) qu'une quantité appréciable de ces éléments minéraux n'appartienne pas aux molécules humiques. Nous noterons que le fer, l'alumine et le phosphore constituent l'essentiel de ces cendres.

— Capacité d'échange des acides humiques

La capacité d'échange cationique (C.E.C.) des acides humiques dépend de la teneur en groupements carboxyles et hydroxyles phénoliques. Elle varie fortement en fonction du pH auquel se fait la réaction d'échange. Les acides humiques de sols ferrallitiques désaturés ont, en présence d'un sel neutre tel que Cl_2Ba une réaction moyennement acide (pH : 3,5). A pH : 7, la C.E.C. serait de l'ordre de 260 à 350 mé/100 g d'acides humiques (RICARDO 1961, NIU CHING WEN 1962), et à pH : 10, la C.E.C. est de l'ordre de 350 mé/100 g. Ces valeurs moyennes sont en accord avec les teneurs moyennes en oxygène données par l'analyse élémentaire.

Nous noterons cependant que OLLAT et COMBEAU (1960), puis THOMANN (1963) ont montré pour des sols ferrallitiques de Guinée et de Centrafrique, qu'il existait une corré-

lation plus étroite entre la capacité d'échange des sols et le taux de matière organique totale qu'avec le taux de matières humiques. Les matières humifiées extractibles, particulièrement les acides fulviques, seraient moins efficaces par unité de poids que les autres formes de matières organiques de ces sols du point de vue de la capacité d'échange qu'elles confèrent aux sols.

Il existe donc une contradiction apparente entre les résultats obtenus sur les extraits humiques purifiés, et le rôle réel de ces matières humiques du point de vue de la capacité d'échange. On peut penser, avec SCHNITZER *et al.* 1965, qu'il existe un blocage par les sesquioxides d'un certain nombre de groupements carboxyles des acides humiques dans ces sols. Le rôle apparent des acides humiques peut être également réduit du fait des liaisons existant dans les complexes argilo-humiques qui masqueraient des sites d'échanges (interaction). Enfin l'humine, constituant essentiel des matières organiques de ces sols ferrallitiques, pourrait jouer un rôle important du point de vue du complexe absorbant.

— Floculation des acides humiques

Les courbes de floculation par Cl_2Ba d'hydrosols d'acides humiques de sols ferrallitiques présentées par RICARDO (1961) montrent qu'il est nécessaire d'atteindre une concentration ionique nettement plus élevée pour floculer les acides humiques des sols ferrallitiques d'Angola que pour ceux des vertisols. Toutefois la concentration ionique nécessaire pour floculer les tourbes tropicales acides est encore supérieure. Les résultats de NIU CHING WEN (1962) confirment la forte dispersion des acides humiques de sols ferrallitiques et la nécessité d'ajouter de grandes quantités d'électrolytes pour obtenir leur coagulation. Les courbes de floculation à froid en fonction de la concentration en ions H , montrent que c'est seulement en dessous de pH 3 que les acides humiques de sols ferrallitiques commencent à floculer (DE BRITO 1969).

— Propriétés optiques des acides humiques

Les solutions d'acides humiques dialysées et d'égale concentration (0,136 g C/l) absorbent d'autant plus la lumière que la longueur d'onde diminue. Différents auteurs ont montré qu'il existe une relation directe entre cette absorption de la lumière et le degré de condensation des noyaux aromatiques des acides humiques. Les travaux de RICARDO (1961) et de NIU CHING WEN (1961) indiquent que les coefficients d'extinction des acides humiques de sols ferrallitiques sont généralement bas. Tout en restant supérieurs au coefficient d'extinction de ceux extraits de tourbes, ils sont comparables à ceux des extraits de sols rouges ou de sols podzoliques, mais ils sont nettement inférieurs à ceux des chernozems ou des vertisols.

Conclusion :

Ces quelques résultats paraissent montrer que les « matières humiques » de sols ferrallitiques sont peu condensées, assez pauvres en noyaux aromatiques ; et leur insolubilisation nécessite des concentrations ioniques élevées.

Ces « matières humiques » (solubilisables par les solutions alcalines diluées) ne représentent qu'une faible fraction de l'humus de ces sols ferrallitiques. La fraction la plus importante : l'humine, fortement liée aux matières minérales, présente des caractéristiques encore très mal connues. Est-ce un « vieil humus » pratiquement inactif, ou au contraire cette humine joue-t-elle un rôle important du point de vue des propriétés physico-chimiques dans les horizons humifères de ces sols ?

4 - INFLUENCE DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES

Le rôle joué par les matières organiques du point de vue des propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques a été précisé par un certain nombre d'études relativement récentes.

4.1 Capacité d'échange des matières organiques des sols ferrallitiques

Quelques estimations de la capacité d'échange cationique (C.E.C.) à pH : 7, des matières organiques de sols ferrallitiques ont été réalisées :

— soit par l'analyse des régressions linéaires multiples en fonction des taux de matière organique et d'argile (OLLAT et COMBEAU 1960, THOMANN 1963, BOISSEZON 1970) ;

— soit par comparaison des C.E.C., avant et après destruction du complexe absorbant d'origine organique par l'eau oxygénée, ou par calcination à température modérée (ABRUNA-RODRIGUES *et al.* 1955, AYERS 1943, BOISSEZON 1970, ENDREY *et al.* 1960, JACQUES FÉLIX *et al.* 1949, LAUDELOUT et D'HOORE 1949, SCHULZCHLOMBRUGK 1954, SEGALÉN 1959, WAEGEMANS *et al.* 1946).

Les valeurs trouvées pour la C.E.C. (pH : 7) sont généralement comprises entre 100 et 200 mé/100 g M.O. ; c'est-à-dire des valeurs moyennes, intermédiaires entre celles trouvées pour le « mor » ou le « moder » et celles des « mulls calciques ».

Il semble toutefois que la C.E.C. des matières organiques de l'horizon A₁ des sols ferrallitiques les plus acides, sous forêt dense humide sempervirente, est inférieure à celle des sols ferrallitiques à humus faiblement désaturé sous forêt dense semi-décidue (ENDREY *et al.* 1960, THOMANN 1963, BOISSEZON 1970), ou sous savane (OLLAT et COMBEAU 1960).

Dans l'horizon A₃ des sols ferrallitiques, la C.E.C. des matières organiques serait plus élevée, mais les taux de matière organique sont faibles et c'est déjà le complexe absorbant d'origine minérale qui devient prédominant. Enfin dans l'horizon B, les matières organiques ont un rôle apparemment très faible du point de vue de la capacité d'échange et parfois négatif (JACQUES-FÉLIX et BÉTRÉMIEUX 1949, LAUDELOUT et D'HOORE 1949, BOISSEZON 1970). Au total, il est manifeste que les matières organiques jouent un rôle très important du point de vue du complexe absorbant dans les horizons humifères A₁ des sols ferrallitiques. Par exemple pour les sols forestiers de Côte d'Ivoire, 45 à 80 % de la C.E.C. à pH : 7 sont dus aux matières organiques (BOISSEZON, 1970). Cette importance relative du complexe absorbant d'origine organique ne paraît pas due à une capacité d'échange spécialement élevée, ni à de fortes teneurs en matières organiques, mais à la faible importance du complexe absorbant d'origine minérale dans ces horizons humifères souvent appauvris en argile, et à argile kaolinitique à faible capacité d'échange.

4. 2 Saturation en bases et réactions des horizons humifères

Elles dépendent étroitement du bilan des matières organiques dans et sur le sol. La capacité d'échange des horizons humifères varie au cours des saisons en fonction de la teneur en matière organique du sol (1). La saturation en bases dépend de l'apport d'éléments minéraux par décomposition des débris végétaux et de l'humus. Saturation en bases et pH constituent donc des caractéristiques qui précisent le bilan des processus antagonistes :

— d'une part d'humification et de minéralisation de l'humus (influence sur le taux de matière organique et donc sur la capacité d'échange) ;

— d'autre part de la minéralisation de débris végétaux et de l'humus (apport de cations) et de la lixiviation des bases ou de leur adsorption par les racines.

Le niveau d'équilibre entre ces processus varie sensiblement, mais dans certaines limites, au cours de l'année (G. MARTIN 1958, DE BOISSEZON 1961) en fonction du rythme saisonnier de la végétation et des conditions pédoclimatiques plus ou moins favorables à l'activité biologique dans la litière et dans le sol (1). Cette caractéristique synthétique constitue donc une donnée indispensable pour la définition des types de bio-géo-cenose ou d'humus climacique (AHN 1961-1970, DE BOISSEZON 1970) (2). Récemment ce critère a été utilisé par PERRAUD (1969), pour caractériser différents types d'humus de sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire ; et il a pu montrer que les caractéristiques intrinsèques des matières organiques de ces sols (fig. 13) diffèrent sensiblement suivant que l'on est en présence d'un « mull forestier tropical calcique, eutrophe ou oligotrophe » (Cf. § 3.2).

4. 3 Influence des matières organiques sur la rétention de l'eau

Il est bien connu que la teneur en eau du sol aux différents pF est étroitement liée à la granulométrie et particulièrement aux taux d'éléments fins (argiles et limons fins). Le rôle des matières organiques du sol de ce point de vue, n'est cependant pas négligeable. Il a pu être précisé dans le cas des sols ferrallitiques grâce à l'analyse des régressions linéaires multiples (THOMANN 1963).

Pour des sols ferrallitiques de Centrafrique, les teneurs en eau fortement retenues dans le sol (pF : 4,2 et 3,0) dépendent des teneurs en éléments fins et en matières humiques. Par contre pour les faibles pF, ce seraient plutôt les matières organiques non humifiées, qui interviendraient d'une manière prépondérante.

COMBEAU et QUANTIN (1963) ont montré par ailleurs que le pF correspondant à la capacité au champ dépendait du taux de matière humique. L'équation de régression est alors la suivante :

pF de la capacité au champ = $0,038 (A + L \%) + 0,28 (MHT \%) + 0,12 I_s + 0,65$
où I_s est l'indice d'instabilité structurale (Cf. *infra*).

(1) La saturation en bases du complexe absorbant n'est envisagée ici que pour des sols ferrallitiques sous végétation naturelle en équilibre avec le « climax » ou le « fire climax ». L'évolution de cette saturation base dans les sols cultivés sera traitée dans un autre tome de cette revue bibliographique sur les sols ferrallitiques.

(2) La richesse en base et la réaction des horizons humifères ont été utilisées par les pédologues britanniques pour établir une classification zonale des sols ferrallitiques : « ochrosols » et « oxisols » (CHARTER, 1957).

4. 4 Influence des matières organiques sur la structure

4.4.1. Influence sur le type de structure

— Humus doux

La plupart des auteurs notent dans leurs descriptions de profils ferrallitiques, que la matière organique confère à l'horizon supérieur A_1 une structure de type grumeleuse, moyenne à fine plus ou moins développée. Par contre les horizons de pénétration humifère A_3 ont une structure diffuse ou polyédrique subangulaire faiblement exprimée. Dans ces deux horizons, la liaison entre les matières organiques et les matières minérales paraît très intime, mais le ciment argilo-humique ne confère pas aux horizons humifères une structure très bien développée. Il existe donc de ce point de vue quelques analogies entre l'humus des sols ferrallitiques et le « mull forestier » des pays tempérés (DUCHAUFOUR, 1970).

Si l'on essaie de définir avec plus de précision la structure de ces horizons humifères, on s'aperçoit qu'il existe des différences appréciables. Par exemple, PERRAUD (1969) a pu constater en Côte d'Ivoire que les horizons humifères A_1 ont, sous forêt dense humide sempervirente, une structure faiblement développée, se résolvant en particulaire, avec localement des sables nus, non liés. Sous forêt dense humide semi-décidue et sous forêt dense sèche, la structure grumeleuse est mieux développée et plus stable ; la présence de sables nus non liés devient exceptionnelle.

Les sols ferrallitiques brun-rouge formés en altitude sur roche volcanique basique ont en général une structure grumeleuse fine bien développée dans l'horizon humifère de surface (SEGALIN, 1954, 1957, LAPLANTE, 1954). En profondeur, la structure reste le plus souvent fine et de type grumeleuse ou polyédrique subangulaire par suite d'une pénétration humifère importante, mais aussi de la nature de la fraction argileuse (SIFFERMAN *et al.* 1958).

Certains sols ferrallitiques autrefois appelés « ferrisoliques » (AUBERT, 1964), ont encore dans les horizons A et B plus que des traces d'argile 2 : 1. Les complexes argilo-humiques particuliers favorisent le développement de la structure en A ; et dans l'horizon B on observe des faces brillantes sur les unités structurales, qui ont parfois été interprétées comme des revêtements argilo-humiques.

Enfin les pédologues belges ont observé sous savanes d'altitude (1 600 m), des sols acides et argileux (Kaolinite) présentant un « horizon sombre » légèrement plus humifère que l'horizon B structural qui les recouvre (VAN WAMBEKE 1964, SYS 1961). Plutôt qu'une migration profonde de matières organiques, RIQUIER (1966) pense qu'il s'agit d'un horizon humifère enterré.

— Humus grossier

La liaison intime entre les matières organiques et les matières minérales dans les horizons humifères paraît beaucoup moins vraie dans le cas des sols ferrallitiques forestiers sur matériaux très sableux, sur quartzite, ou pour certains sols fortement appauvris ou lessivés de la zone équatoriale très pluvieuse. La structure de l'horizon A_1 est alors particulaire, avec surtout des sables non liés, nus et luisants (non revêtus de matières organiques ou d'hydroxydes de fer). Les matières organiques sont parfois concentrées dans de petits agrégats noirâtres, peu ou très finement sableux, fort probablement d'origine biologique (BOISSEZON, 1963). La structure de ces horizons humifères est assez comparable à celle du « moder ». Ces sols à horizon A_1 particulaire sableux sont recouverts sous forêt par un horizon organique grossier, de plusieurs centimètres d'épaisseur, constitué d'un feutrage de racines plus ou moins fonctionnelles et de débris végétaux (feuilles, brindilles) en voie de décomposition, avec quelques sables nus épars. A la différence du « moder », la transition avec l'horizon A_1 est brutale.

En profondeur, on observe parfois dans ces sols ferrallitiques très sableux, un

horizon Bh (humique mais peu ferugineux sous forme de minces lignes horizontales, ou mieux développé dans la partie inférieure de versants à fortes pentes (BOISSEZON 1965, BOISSEZON et GRAS 1970). L'horizon A₂ blanchi paraît cependant exceptionnel dans les sols ferrallitiques sableux, bien drainés, du Congo (Brazzaville).

Inversement, les pédologues belges ont appelé « Arénoferals intergrade vers podzols » des sols sableux à horizon A₂ blanchi très développé, mais sans horizon B humifère (SYS, 1960).

De véritables podzols se développant en zone intertropicale humide ont été signalés par différents auteurs (Cf. MOHR et VAN BAREN 1954). Il semble cependant que la plupart se sont formés à partir de formations sédimentaires sableuses (SCHMID 1963, FRANCO 1968) plutôt qu'à partir d'un vieux profil ferrallitique (STEPHENS 1949, AUBERT 1954).

Certains types de végétation paraissent néanmoins favoriser un début de podzolisation sur des sols ferrallitiques. C'est par exemple le cas du pin en altitude au Vietnam, et des savanes à *Melaleuca leucadendron* (TERCINIER 1954, SCHMID 1963).

Il existe également à Madagascar des profils ferrallitiques à humus plus ou moins grossiers sous végétation de « savoka » (*Philippia*, *Helychrysum*). Bien que la litière soit très peu épaisse, l'horizon humifère très noir (10 à 15 cm) est constitué de matières organiques qui se décomposent mal (RIQUIER, 1966). La différenciation morphologique du profil sous-jacent, jaune sur rouge, ne semble pas pouvoir être rapportée dans tous les cas au lessivage du fer, mais plutôt à une action de l'humus sur les composés du fer (HERVIEU, 1961).

4.4.2. Matière organique et stabilité des agrégats

Les matières organiques jouent un rôle important en tant que facteur de stabilité des agrégats (BOYER *et al.* 1960). En effet les taux d'agrégats stables (tamisage dans l'eau) sont étroitement corrélés avec le taux de matières organiques (COMBEAU 1960, MARTIN 1963); et il existe une corrélation négative étroite en Is (Indice d'instabilité structurale d'Henin) et le taux de matière organique (COMBEAU *et al.* 1961).

Toutefois dès 1960, COMBEAU s'était aperçu que le taux d'agrégats stables après le prétraitement benzène était lié plus étroitement aux taux de matière organique non humifiée (MO-MHT), qu'aux taux de matière organique totale (1). G. MARTIN et THOMANN en 1963 ont d'ailleurs montré pour des sols ferrallitiques de Centrafrique et du Congo, que l'indice Is est également lié plus étroitement aux taux de matière organique non humifiée (1) qu'aux taux de matière organique totale. Les matières humiques (extractibles par le pyrophosphate de sodium) seraient donc moins efficaces par unité de poids que les autres formes de matières organiques présentes. Les régressions multiples obtenues pour Is semblent même montrer que les « matières humiques » auraient une action relativement faible ou même dépressive sur la stabilité structurale (2).

Le taux d'agrégats stables après prétraitement benzène est en général plus ou moins inférieur aux taux d'agrégats stables pour l'eau ou pour l'alcool, en raison inverse du taux de matière organique. Certains sols ferrallitiques sableux paraissent cependant avoir un taux d'agrégats stables pour le benzène plus élevé (BERLIER *et al.* 1956, BOISSEZON 1961). Il est possible que ce fait soit dû au rôle anti-mouillant de ces matières organiques grossières (MONNIER, 1965) (Cf. § 4.5).

Les travaux de BATES (1960) au Nigeria ont par ailleurs montré que le taux d'argile et de limon dispersable à l'eau est très faible dans l'horizon de surface d'un sol ferrallitique (sans doute parce que ce sol possède un humus presque saturé). Mais avec la

(1) MO-MHT : taux de matière organique moins le taux de « matières humiques » extraites par les solvants alcalins.

(2) Comme dans le cas des régressions relatives à l'humidité des sols aux différents pF (§ 4.3), on peut regretter que les auteurs n'aient pas fait et publié une analyse complète de la variance. Les taux de MO et de MHT sont en général fortement corrélés entre eux, pour un type de sol donné, et on peut craindre que les interprétations données soient partiellement erronées.

profondeur, tandis que la teneur en matière organique décroît, le taux de dispersion des éléments fins s'accroît. Il décroît à nouveau dans l'horizon B en relation avec l'accroissement du taux de fer libre (fig. 15).

Ces travaux confirment donc les relations étroites qui existent pour les sols ferrallitiques entre la stabilité des agrégats et les teneurs en matières organiques et en fer libre ou mobile (FRIPIAT *et al.* 1949, G. MARTIN 1963).

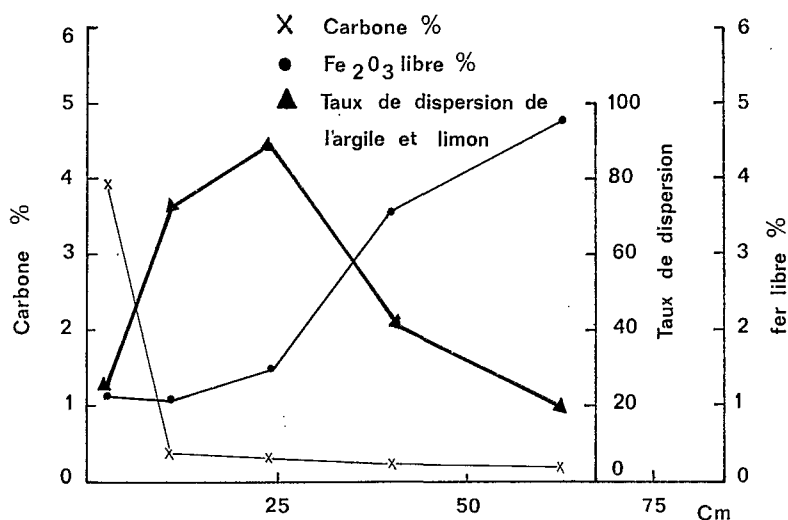


FIG. 15. — Relation entre le taux de dispersion de l'argile et des limons les teneurs en matière organique et en fer libre d'un sol rouge ferrallitique forestier du Nigeria

d'après BATES (1960)

4. 5 Matière organique et perméabilité

Les sols ferrallitiques même très argileux sont généralement dotés d'une porosité importante et ont une bonne perméabilité. Les études réalisées suivant le test Henin (mesure de la vitesse d'infiltration sur colonne de terre remaniée) montrent que les matières organiques de ces sols jouent un rôle important du point de vue de la perméabilité. MARTIN (1963) a pu montrer que le coefficient de perméabilité K de la formule de Darcy était étroitement corrélé avec le taux de matière organique. Comme dans le cas de la stabilité structurale, les « matières humiques totales » semblent avoir un rôle relativement moins important que les autres matières organiques contenues dans les horizons humifères des sols ferrallitiques étudiés (1).

Il apparaît cependant que la matière organique de certains sols ferrallitiques joue un rôle anti-mouillant et retarde donc l'infiltration ou la remontée capillaire dans la terre sèche. Cette propriété anti-mouillante paraît permanente dans le cas des horizons humifères de surface, particuliers, sableux (Cf. § 4.4.1). Elle existe parfois également avec des humus mieux évolués, mais ne s'observe qu'au moment de la saison sèche (BOISSEZON 1961). Ce serait une des raisons expliquant les forts coefficients de ruissellement mesurés pour les premières pluies après la saison sèche.

(1) Voir remarques infra-paginales page précédente.

Conclusion

Les propriétés physiques ou chimiques des horizons A des sols ferrallitiques paraissent donc dépendre étroitement de la richesse en matière organique et de son type d'évolution : humus doux plus ou moins acide, ou humus grossiers.

5 - MATIÈRE ORGANIQUE ET PEDOGENESE FERRALLITIQUE

Les différents processus qui interviennent dans la formation et l'évolution des sols ferrallitiques étant étudiés dans leur ensemble par ailleurs, nous nous bornerons à préciser ce que l'on sait de l'influence des matières organiques sur ces processus. Le rôle de l'humus dans la pédogénèse ferrallitique est d'ailleurs assez mal connu. Quelques hypothèses ont été émises ; peu ont été véritablement contrôlées.

5.1 Influence des matières organiques sur l'altération ferrallitique

L'action du gaz carbonique et des acides organiques provenant de la décomposition des matières organiques du sol a été autrefois présentée comme un agent essentiel de la « latéritisation ». Depuis, les études ont montré que la minéralisation des résidus végétaux était brutale et très poussée et qu'en dehors du gaz carbonique, il ne semble pas que les produits de décomposition interviennent dans les processus d'altération ferrallitique. L'influence acidifiante de la couverture forestière n'atteindrait pas les zones profondes (ERHART, 1956).

D'ailleurs les expériences de PEDRO (1964) ont montré que la présence d'acides organiques dans la solution qui percole les matériaux en voie d'altération entraînait une évacuation de l'alumine, fait qui ne se produit pas, ou très faiblement, dans le cas de l'altération ferrallitique. Par contre la présence de gaz carbonique provoque une altération de même tendance que celle obtenue en présence d'eau pure et conduit à une élimination plus rapide de la silice et une accumulation de l'alumine (Allitisation). Il semble donc que l'altération ferrallitique représenterait un type de processus lié essentiellement à une géochimie minérale et non pas organique.

Secondairement, certains sols ferrallitiques paraissent présenter un enrichissement superficiel en alumine libre tandis que le taux d'argile kaolinique décroît corrélativement (SEGALEN 1957; LELONG 1967, BOURGEAT 1970). D'HORRE (1954) avait constaté une dégradation de la kaolinite dans la partie supérieure de nombreux profils et suggéré une cause biologique (mobilisation de la silice par le couvert végétal en particulier graminéen). L'intervention des matières organiques très acides émanant de la litière dans le processus d'altération de la kaolinite a été suggérée par différents auteurs et en particulier par DUCHAUFOR et LELONG (1967). Ce dernier attribue à cette dégradation de la kaolinite un rôle majeur dans l'appauvrissement de certains sols ferrallitiques (Cf. § 5.3).

5. 2 *Matières organiques et lixiviation des bases*

Il faut distinguer les processus de lixiviation des bases alcalines et alcalino-terreuses, — dans la « phase profonde d'altération » qui paraît donc le fait d'eaux d'infiltration abondantes, mais assez pauvres en acides organiques (DUCHAUFOUR, 1968), — et dans la « phase pédogénétique » (LENEUF, 1966), c'est à dire dans le profil ferrallitique lui-même.

Comme nous l'avons vu (Cf. § 2.1.2.), les eaux de drainage qui percolent les sols ferrallitiques ont une charge organique importante et on peut penser que les acides organiques solubles ou pseudosolubles favorisent la migration des bases « *per descensum* ».

Toutefois les mesures de pH faites par ROOSE (1969-1970) sur les eaux de *drainage rapide* montrent que la solution du sol lorsqu'elle s'écoule librement est rarement aussi acide que le sol lui-même et a le plus souvent un pH compris entre 6 et un peu plus de 7.

L'image des sols ferrallitiques qui seraient brutalement percolés à la faveur des tornades par des eaux fortement acides qui désaturent le profil n'est donc pas très exacte. Ces eaux qui drainent en quelques heures se chargent en cations dès la surface ou dans l'horizon A₁ et la concentration en matière organique et en cations est maximum dans l'horizon A₃. Ensuite les concentrations en matière organique et en cations décroissent progressivement dans les horizons B, mais plus rapidement pour les matières organiques que pour les bases. Il est donc probable que le rôle de l'anion carbonique devient de plus en plus important avec la profondeur.

Il est difficile de se faire une idée de la lixiviation des bases par *drainage lent*. Il est probable qu'il s'établit un équilibre entre la solution du sol plus ou moins riche en anions organiques, et d'une part le complexe absorbant du sol, d'autre part la capacité d'échange des racines (adsorption par les racines). Seule une expérimentation en cases lysimétriques permettra de préciser l'importance de cette lixiviation des bases.

On peut supposer que sous forêt dense humide sempervirente et peut-être sous savane en saison des pluies, la lixiviation des bases est favorisée par l'abondance des composés organiques acides et peu polymérisés (Cf. § 3.2.4.). Sous forêt dense semi-décidue, l'humification relativement plus poussée serait moins favorable à la formation de produits lixivians. Ceci reste à vérifier par une étude biochimique des matières organiques solubles ou pseudo-solubles de la solution du sol.

Nous noterons enfin qu'on ne peut juger valablement de l'intensité de ce processus de lixiviation aux seules vues des résultats d'analyse sur l'état de saturation du complexe absorbant. Celui-ci dépend également de l'adsorption de cations par les racines, de la remontée biologique et de la nature du complexe absorbant d'origine minérale ou organique. La réaction et la désaturation des différents horizons est donc liée à un équilibre dynamique très complexe, sans doute caractéristique des différents écosystèmes (AHN 1961, BOISSEZON 1970), mais fort difficile à interpréter.

5. 3 *Matière organique et lessivage de l'argile*

Le rôle des matières organiques dans ce processus ne paraît pas être clairement démontré. Nous avons vu que les matières organiques des sols ferrallitiques agissent dans le sens d'une augmentation de la stabilité structurale et font diminuer le taux

d'éléments fins dispersables à l'eau (Cf. § 4.4.2.). Cependant les complexes argilo-humiques formés par de la kaolinite et des acides humiques peu polymérisés ont la réputation d'être peu stables. En fait l'action floculante serait surtout exercée dans le cas des sols ferrallitiques par des ions trivalents : Al^{3+} et Fe^{3+} . La dispersion de ces complexes et la migration de l'argile est donc subordonnée à la déferification préalable.

Il est donc probable que les produits organiques faiblement humifiés, qui comme nous le verrons provoquent le lessivage du fer, favorisent secondairement la dispersion des argiles. Il est également possible que les argiles migrent en relation étroite avec les acides fulviques (FAUCK, 1971), soit latéralement (érosion différentielle ou sélective et lessivage oblique), soit verticalement (lessivage avec accumulation diffuse).

Enfin il a été suggéré que dans certains sols ferrallitiques des régions équatoriales très pluvieuses, la litière grossière qui se forme à la surface des sols ferrallitiques (Cf. § 4.4.1.) donne naissance à des composés solubles qui peuvent subsister longtemps dans le profil (milieu biologique peu actif) et se fixer sur les molécules d'argile. Ces composés organiques joueraient un rôle « protecteur », donc dispersant à l'égard des argiles. Ils favoriseraient leur entraînement, même en présence de concentration élevée en Al^{3+} , comme l'ont montré en d'autres circonstances SOUCHIER et DUCHAUFOR (1969).

5. 4 Matière organique et mobilisation des sesquioxydes

Le rôle très important des matières organiques du point de vue de la mobilisation du fer et de sa migration dans les sols, a été étudié par de nombreux auteurs (*in*. SEGALEN 1964). Cependant dans le cas des sols ferrallitiques, l'individualisation et l'accumulation relative des sesquioxydes semble au départ être le résultat de processus d'altération dans lesquels les matières organiques n'interviennent sans doute pas ou peu (Cf. § 5.1.).

Par contre les matières organiques joueraient un rôle important dans la redistribution du fer dans le profil (BETREMIEUX *et al.* 1952), ou dans d'autres sols situés en aval (MAIGNIEN, 1956). Les processus évoqués pour la mobilisation (réduction biologique du fer ferrique en fer ferreux, en présence de matières organiques fermentescibles) et la migration (sous forme de complexes, chélates ou hydrosols stables) n'ont cependant pas été clairement démontrés dans le cas des sols ferrallitiques. On sait cependant que la solution du sol recueillie dans les différents horizons des sols ferrallitiques est riche en matières organiques solubles (acides fulviques et sans doute acides aliphatiques) et les horizons profonds contiennent d'ailleurs surtout des acides fulviques. Il est donc probable comme l'a montré FAUCK (1971) que ces acides fulviques permettent la dégradation des pseudo-particules, ce qui libère les hydroxydes de fer et permet leur migration. Toutefois dans le cas des sols rouges ferrallitiques étudiés, il semble qu'il y ait déplacement d'un complexe kaolinite — fer amorphe — acides fulviques. Il est cependant possible que dans d'autres conditions, le fer puisse migrer dans les sols ferrallitiques sous forme de complexe indépendamment des argiles ; mais ceci est à contrôler.

Inversement la précipitation et l'immobilisation du fer doit se produire lorsque le complexant organique est biodégradé en milieu plus oxydant (1) (formation d'horizon tacheté, concrétionnement, cuirassement).

En ce qui concerne l'alumine, on a cru pendant longtemps que cet élément était peu mobile et il a été pris souvent comme terme de référence invariant dans les bilans géochimiques des sols ferrallitiques (iso-alumine). A l'heure actuelle, on sait que l'ion Al^{3+} peut être complexé par certains composés organiques et devenir ainsi plus soluble que le fer en milieu oxydant (DUCHAUFOR, 1967). LELONG (1967) va d'ailleurs beaucoup plus loin et considère que le déficit d'alumine observé entre les « arènes plastiques » et

(1) Les bactéries qui minéralisent le fer paraissent abondantes dans les sols ferrallitiques (BOISSEZON, 1961).

les horizons de surface serait dû à une forte exportation d'alumine sous l'influence des matières organiques. Cette hypothèse qui remet en cause partiellement la théorie de la biostasie d'ERHART (1956) demanderait de plus amples vérifications.

Les pédologues qui ont travaillé dans la zone ferrallitique ont surtout été intéressés par l'aspect minéralogique et géochimique de l'évolution des sols. L'intervention de processus biologique ou biochimique n'a été évoquée que pour expliquer des phénomènes d'altération ou de migration qui ne paraissaient pas possibles par des mécanismes purement minéraux. Peu de vérifications expérimentales ont été tentées pour contrôler ces hypothèses. Et pourtant, c'est essentiellement par l'intermédiaire des processus biologiques et biochimiques que se manifeste l'influence du climat sur la dynamique actuelle des sols.

CONCLUSION

Nous pouvons à l'aide de ces données bibliographiques tenter une réponse aux deux questions posées dans l'introduction.

1. Existe-t-il un type d'humus particulier aux sols ferrallitiques ?

Manifestement, nous devons, tout d'abord mettre à part les humus grossiers qui se développent sur et dans certains sols ferrallitiques sableux très pauvres en bases, ou sous certains types de végétations dégradées comme la « savoka », ou dans des régions très pluvieuses de la zone équatoriale. Il est manifeste que ces types d'humus qui paraissent intermédiaires entre le « mor » et le « moder » provoquent une évolution à tendance podzolique dans la partie supérieure de profils ferrallitiques. Dans le cas où cette évolution est peu poussée (absence d'horizon A_2 blanchi cendré et/ou d'horizon Bh), il paraît logique de créer un sous-groupe particulier (podzolisé) dans la classe des sols ferrallitiques.

Les autres types de matières organiques des sols ferrallitiques paraissent par contre présenter un certain nombre de *caractères communs* :

Malgré l'apport annuel souvent considérable de débris organiques d'origine végétale, la litière est peu importante voire inexistante et l'on peut considérer que la décomposition de ces matières organiques fraîches est très rapide. Toutefois la plus grande partie de cette source primaire de matière organique se minéralise et la part qui s'humifie est relativement faible. Au total, les teneurs de matières organiques des sols ferrallitiques, fonction de l'équilibre entre une humification faible et une minéralisation rapide de l'humus, sont relativement faibles (1).

Ces matières organiques des sols ferrallitiques sont liées d'une manière intime aux matières minérales, mais la structure qu'elles confèrent aux horizons humifères est en général faiblement développée.

L'« humine » fraction fortement liée aux matières minérales constitue plus de la moitié de ces matières organiques. Les « matières humiques » sont par contre peu abondantes et surtout constituées par des composés organiques peu polymérisés : acides humiques bruns et acides fulviques. Ces derniers deviennent dominants en profondeur.

(1) Sauf en altitude : Cf. *infra*.

Cet ensemble de caractères rapprocherait donc l'humus des sols ferrallitiques du « mull forestier » des régions tempérées, mais le degré de polymérisation des composés humiques paraît plus faible.

Il existe par contre de nombreux *caractères divergents* qui paraissent liés soit à la nature très différente des couverts végétaux naturels qui recouvrent ces sols, soit aux conditions pédoclimatiques qui favorisent plus ou moins l'accumulation et orientent différemment le type d'évolution des matières organiques.

En fonction de ces conditions, nous avons vu que :

— le cycle biologique (turnover) dans le sol et la végétation intéresse une masse plus ou moins importante de matières carbonées, d'azote et d'éléments minéraux ;

— les teneurs en matières organiques des sols de basse altitude sont faibles, mais dès que l'altitude augmente, on observe une accumulation de matière organique dans les horizons supérieurs des sols ;

— le degré d'évolution de ces matières organiques paraît inégal comme l'indiquent les valeurs très différentes du rapport C/N, du « taux d'humification », du rapport AF/AH et AH gris/AH total dans les horizons A_1 ;

— la saturation en bases de ces matières organiques est également très variable, et la réaction souvent fortement acide peut l'être faiblement ou même être voisine de la neutralité. Enfin le stockage d'éléments minéraux sur le complexe absorbant d'origine organique peut être très dissemblable.

Ces différences importantes ne permettent pas de conclure à l'unicité de l'humus des sols ferrallitiques. En fait il aurait été étonnant de n'observer qu'un seul type d'humus dans la « zone ferrallitique » étant donné la diversité des conditions écologiques qui président à la formation et à l'évolution des matières organiques de ces sols.

2. Ces types de matières organiques conditionnent-ils en grande partie les processus évolutifs des sols ferrallitiques ?

La rapide revue bibliographique sur le rôle des matières organiques dans la pédogénèse ferrallitique nous a montré que :

— les matières organiques ne paraissent pas intervenir au niveau de l'altération primaire de la roche-mère, par contre il est possible que la dégradation de la kaolinite qui interviendrait secondairement dans certains sols ferrallitiques soit favorisée par la présence de composés organiques acides ;

— les matières organiques paraissent également jouer un rôle important dans la lixiviation des bases, dans la migration des sesquioxydes et peut-être de l'argile. Mais les composés organiques qui interviendraient sont encore peu connus dans le cas des sols ferrallitiques.

On peut donc penser que les matières organiques jouent un rôle pratiquement nul pour la formation du matériau originel des sols ferrallitiques, mais ont sans doute un rôle important pour la redistribution des éléments minéraux dans le profil et pour l'élimination de certains éléments tels que la silice et les bases hors du système sol-végétation.

Les humus des sols ferrallitiques apparaissent donc comme assez dissemblables et il n'est pas démontré que leurs rôles dans la pédogénèse soient identiques. On peut donc se demander s'il est justifié de faire référence au type d'humus pour la définition de cette classe de sols.

Il apparaît par contre qu'en fonction des conditions écologiques qui président à l'évolution des matières organiques, se différencient un certain nombre de types d'humus représentatifs des équilibres sols-végétations. Ce sont des matières organiques qui correspondent aux « *Climax climatiques* » (DUCHAUFOUR, 1965), en particulier : les humus sous forêt dense humide sempervirente, sous forêt dense humide semi-décidue, et probablement sous forêt dense sèche et sous savane soudanienne (« fire-climax » dans ce dernier cas). Les humus des sols ferrallitiques d'altitude constituent également une catégorie d'humus

climacique particulière, caractérisée par une accumulation importante de matière organique et par le développement des horizons humifères.

Sous l'influence de « *climax stationnels* », l'évolution zonale paraît plus ou moins modifiée. L'exemple le plus caractéristique paraît être l'humus grossier qui se forme sur des matériaux ferrallitiques sableux, très pauvres en bases. Mais l'on doit noter que l'évolution climacique poussée en zone équatoriale très pluvieuse conduit également vers un humus grossier podzolisant. Le seuil au-delà duquel l'évolution des matières organiques se fait dans une direction convergente paraît dépassé, par suite des processus d'appauvrissement en argile et de lixiviation des bases alors très poussée de ces sols.

Il est fort probable qu'il existe d'autres types d'humus correspondant à des climax stationnels. C'est en particulier le cas des sols ferrallitiques formés sur roche volcanique, et sur roche pellitique. Les complexes argilo-humiques formés avec des minéraux argileux tels que l'hallowysite dans le premier cas, l'illite (*s.l.*) dans le deuxième, paraissent différents de ceux formés avec de la kaolinite.

En dehors de ces exceptions, dues à des climax stationnels, il paraît cependant possible de définir pour les sols ferrallitiques différents types d'humus correspondant aux différents équilibres sol-végétation et définissant précisément les climax climatiques. On peut alors se demander si cette classification des types d'humus ne pourrait pas servir de base à une classification zonale des sols ferrallitiques, au niveau de la sous-classe par exemple. L'ennui est qu'il existe des climax stationnels et que l'équilibre sol-végétation est totalement modifié par le défrichement, la mise en culture, ou par la savanisation anthropique.

L'étude de ces différentes bio-géocénoses devrait cependant constituer l'objet central des programmes de recherche portant sur la dynamique actuelle de ces sols ferrallitiques. La « physiologie » des horizons humifères des sols ferrallitiques est encore très mal connue et c'est pourtant dans ces horizons supérieurs que l'on a le plus de chance de saisir les processus évolutifs actuels sous la dépendance directe du climat et de la végétation.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRUNA-RODRIGUEZ (F.), CHANDLER (J. V.), 1955. — Organic matter activity of some typical soils of Puerto Rico. *J. Agri. Univ. Puerto Rico*. Vol. 39, n° 2, pp. 65-76.
- AHN (P. M.), 1961. — *Soils of the lower Tano Basin, South-Western Ghana* — Ghana Ministry of Food and agriculture, scientific services division, soil and land use survey branch — Kumasi. Government Printer Accra. 266 p. 3 cartes h.t.
- AHN (P. M.), 1970. — West african soils. in: *West african agriculture*. tome 1. Oxford University press 332 p.
- AUBERT (G.), 1954. — Les sols latéritiques. *Congr. Int. Sci. Sol.* 5. Vol. 1 pp. 103-118.
- AUBERT (G.), 1960. — Influence de la végétation sur le sol en zone tropicale humide et semi-humide. in: *Rapports du sol et de la végétation*. Premier colloque de la Société Botanique de France. Paris 13 juin 1959. Masson, Paris pp. 11-22.
- AUBERT (G.), 1964 a. — La classification des sols utilisée par des pédologues français en zone tropicale ou aride (Comm. Coll. C.C.T.A. sur la classification des sols... Léopoldville 1963). *Sols afr.*, vol. IX, n° 1 pp. 97-105.
- AUBERT (G.), 1964 b. — Les sols tropicaux. *Congr. Int. Sci. Sol.* 8. Bucharest. Vol. I pp. 213-229.
- AUBERT (G.), SEGALIN (P.), 1966. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M. série pédol.* vol. IV, n° 4 pp. 97-112.
- AYRES (S.), 1943. — Hawaï Univ. Techn. bull. I. in AUBERT 1954 et ABRUNA-RODRIGUEZ *et al.* 1955.
- BACHELIER (G.), 1960. — Sur l'orientation différente des processus d'humification dans les sols bruns des régions tempérées et les sols ferrallitiques des régions équatoriales. *Agro. tropi.* (Paris). 3, pp. 320-324.
- BACHELIER (G.), 1963. — Influence du climat sur le processus de l'humification et de la déshumification. *Pédobiologia*. Vol. 2, n° 2, pp. 153-163.
- BACHELIER (G.), 1968. — *Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone des sols*. Mém. O.R.S.T.O.M. n° 30, 145 p.
- BARTHOLOMEW (W. V.), MEYER (J.), LAUDELOUT (H.), 1953. — *Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) region*. Publi. I.N.E.A.C. 57, 27 p.
- BATES (J. A. R.), 1960. — Studies on a Nigerian forest soils. I. The distribution of organic matter in the profiles and invarious soil fractions. *J. Soil Sci.* 11, 2, pp. 246-256.
- BERLIER (Y.), DABIN (B.), LENEUF (N.), 1956. — Comparaison physique chimique et microbiologique entre les sols de forêt et les sols de savane sur sables tertiaires en basse Côte d'Ivoire. *Congr. Internat. Sci. Sol.* 6 (Paris), vol. V, pp. 499-502.
- BERNHARD (F.), 1966. — *Problèmes posés par la structure de la végétation et la production de litière dans la forêt du Banco (basse Côte d'Ivoire)*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 54 p. multigr., 8 fig. h.t.
- BERNHARD (F.), 1967. — I. *Production et décomposition de la litière en forêt du Banco*. II. *Etude floristique de la strate arborescente en forêt de Yapo (Côte d'Ivoire)*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 28 p. multigr., 9 fig. h.t.

- BERNHARD (F.), 1969. — *Rapport d'activités*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé 22 p. multigr., 10 fig. h.t.
- BERNHARD (F.), 1970. — *Rapport d'activités*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé 24 p. multigr., 9 fig. h.t.
- BIRCH (H. F.), FRIEND (M. T.), 1956. — The organic matter and nitrogen status of East african soils. *J. Soil Sci.* 7, 1 pp. 156-167.
- BIRCH (H. F.), 1958. — Pattern of humus decomposition in East African soils. *Nature* (London) 181, p. 788.
- BIRCH (H. F.), FRIEND (M. T.), 1961. — Resistance of humus to decomposition. *Nature* (London) 191, pp. 731-732.
- BOCQUEL (G.), KAUFFMAN (J.), 1963. — Influence du thermo-périodisme et de l'hygro-périodisme sur la formation de l'humus et l'activité des fixateurs d'azote aérobies libres dans la terre. *Cah. O.R.S.T.O.M., série pédol.* Vol. 2, pp. 5-7, 2 fig. h.t.
- BOISSEZON (P. de), 1961. — *Contribution à l'étude de la microflore de quelques sols typiques du Congo*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville 131 p. multigr., 29 fig. et tabl. h.t.
- BOISSEZON (P. de), 1962. — *Contribution à l'étude des matières organiques des sols de la République du Congo*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville 54 p. multigr., 4 tabl. h.t.
- BOISSEZON (P. de), 1963. — *Les sols des plateaux de Djambala et Koukouya et de la zone avoisinante des hautes collines*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville 93 p. multigr., 17 pl. et 2 cartes h.t.
- BOISSEZON (P. de), 1965 a. — Les sols de savane des plateaux Batéké. *Cah. O.R.S.T.O.M. série pédol.* vol. III, N° 4 pp. 291-298.
- BOISSEZON (P. de), 1965 b. — *Les sols de la coupure Mayama*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville 111 p. multigr. 4 fig., 8 tabl. 2 cartes h.t.
- BOISSEZON (P. de), MARTIN (G.), 1967. — *Les sols de la vallée du Niari. Etude pédologique et agropédologique, in* Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari. Mission Aide et Coop. P. Bory (Monaco) éd. 188 p.
- BOISSEZON (P. de), GRAS (F.), 1970. — *Notice explicative n° 45. Carte pédologique Sibiti-Est*. République du Congo-Brazzaville à 1/500.000. O.R.S.T.O.M. 144 p.
- BOISSEZON (P. de), 1970 — Etude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. pédol.* vol. VIII n° 4 p.
- BOULVERT (Y.), 1968. — *Comparaison entre les grands types de sols de la région de Bossangoa. Leur répartition en fonction de l'influence des divers facteurs de pédogénèse*. Rapport annexe à la notice de la carte pédologique. O.R.S.T.O.M., Centre de Bangui, 40 p. multigr., fig. tabl.
- BOULVERT (Y.), 1969. — *Notice explicative de la carte pédologique de l'Ouham : Batangafo-Moussafoyo (R.C.A.)*. O.R.S.T.O.M. Centre de Bangui. 85 p. multigr., 5 cartes 1/100.000, tabl. fig.
- BOULVERT (Y.), 1970. — *Notice explicative de la carte pédologique de l'Ouham : Bouca*. O.R.S.T.O.M., Centre de Bangui. 79 p. multigr., 4 cartes, tabl., fig.
- BOULVERT (Y.), 1971. — *Notice explicative de la carte pédologique de l'Ouham : Kouli*. O.R.S.T.O.M., Centre de Bangui. 79 p. multigr., 4 cartes, tabl. fig.
- BOURGEAT (F.), 1970. — *Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciations et interprétation chronologique au cours du quaternaire*. Fac. Sci. Strasbourg (Thèse) 310 p. multigr.
- BOYER (J.), COMBEAU (A.), 1960. — Etude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de République Centrafricaine. *Sols Afr.*, Vol. V, n° 1, pp. 5-42.
- BRAY (R.), GORHAM (E.), 1964. — Litter production in forests of the world. *in Advances Ecolog. Res.* Vol. 2, pp. 101-157.
- BRITO (Mme de), 1969. — *Notes sur diverses expériences réalisées sur les substances humiques de quelques sols ivoiriens*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 7 p. multigr.

- BRUGIERE (J.-M.), 1953. — *Etude pédologique de la vallée du Niari*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville 326 p. multigr.
- BRUGIERE (J.-M.), 1954. — Le problème de l'humus dans l'utilisation rationnelle des sols de la vallée du Niari en agriculture mécanisée (Moyen Congo). *Conf. Interafr. Sols n° 2* (Léopoldville) Vol. 2. pp. 1223-1231.
- CHARTER (C. F.), 1957. — *Suggestions for classification of tropical soils*. Kumasi, Ghana Ministry of Food and Agriculture, Soil and Land Use Survey Branch - Misc. paper 4 (multigr.) in AHN 1970.
- CHOUBERT (B.), HENIN (S.), BETREMIEUX (R.), 1952. — Essai de purification des bauxites en constituants ferrugineux. *C.R. Acad. Sci.* 234, 5, pp. 2463-2465.
- CLAISSE (G.), 1953. — Etude de l'altération de la charnockite de Man. *Ann. Agro.* vol. IV, n° 1, p. 45-52.
- CLINE (M.), 1950. — *Soil survey of the Hawaiian islands*. U.S. Dept. Agric. in. AUBERT 1954.
- CLINE (M. G.), *et al.*, 1955. — Soil survey of the Territory of Hawaiï. *U.S.D.A. Soil Surv. Series 1939 n° 25*, 644.
- COMBEAU (A.), 1960. — Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sols ferrallitiques. *C.R. Acad. Agri. Fr.* pp. 109-115.
- COMBEAU (A.), OLLAT (C.), QUANTIN (P.), 1961. — Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyse des sols. *Fertilité*, vol. 13, pp. 27-40.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1963. — Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF - humidités. *Sci. Sol.* vol. 1, pp. 1-7.
- CRAENE (A. de), 1956. — Les matières organiques dans les latosols de pédimentation du nord-est du Congo belge. *Congr. Internat. Sci. Sol 6* (Paris). vol. B, pp. 707-712.
- GRAIG (N.), HALAIS (P.), 1934. — The influence of maturity and rainfall on the properties of lateritic soils in Mauritius. *Emp. J. Expt. Agric.* 2, 349-356. in MOHR et VAN BAREN 1954.
- CUNNINGHAM (R. K.), 1962. — Mineral nitrogen in tropical forest soils. *J. Agri. Sci.* Vol. 59, n° 2, pp. 257-262.
- CUNNINGHAM (R. K.), 1963. — The effect of clearing a tropical forest soil. *J. Soil Sci.* Vol. 14, n° 2, pp. 334-345.
- DABIN (B.), 1970. — Pédologie et développement chap. 10 : les facteurs de fertilité des sols (matière organique - phosphore). in : *Techniques rurales en Afrique n° 10*. pp. 191-219.
- DABIN (B.), THOMANN (Ch.), 1970. — *Etude comparative de deux méthodes de fractionnement des composés humiques (méthode de Tyurin et méthode électrophorétique)*. O.R.S.T.O.M. (initiation et documentations techniques) n° 16, 66 p.
- DEAN (L. A.), 1930. — Nitrogen and organic matter in Hawaiian pineapple soils. *Soil Sc.* Vol. 30, pp. 439-442.
- DEAN (L. A.), 1938. — The effect of rainfall on carbon and nitrogen ration of Hawaiian soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* n° 2, pp. 455-459.
- DEMOLON (A.), 1952. — *Dynamique du sol*. Dunod Ed. 520 p.
- d'HOORE (J.), LAUDELOUT (H.), 1949. — *Influence du milieu sur les matières humiques*. Publi. I.N.E.A.C., série scient. n° 44.
- d'HOORE (J.), 1954. — *L'accumulation de sesquioxides libres dans les sols tropicaux*. Publi. I.N.E.A.C., série scient. n° 62, 131 p.
- d'HOORE (J.), 1964. — *La carte des sols d'Afrique au 1/5 000 000*. Mémoire explicatif. C.C.T.A. Publi. n° 93, 209 p.
- DOMMERGUES (Y.), 1960. — La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agron. tropi.* n° 1, vol. XV, pp. 55-60.

- DOMMERMUES (Y.), 1963. — Les cycles biochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Bois et forêts des Tropiques* n° 87, pp. 9-25.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1956. — *Pédologie. Applications forestières et agricoles*. Ecole Nat. Eaux et Forêts Nancy, 310 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1963. — Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par électrophorèse. *Ann. Agro.* vol. 14, n° 6, pp. 885-918.
- DUCHAUFOUR (Ph.), DOMMERMUES (Y.), 1963. — Etude des composés humiques de quelques sols tropicaux et subtropicaux. *Sols Afri.* Vol. VIII, n° 2, pp. 5-23.
- DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1964. — Note sur une méthode de fractionnement des composés humiques et son application à l'étude de la pédogénèse. *Congr. Internat. Sci. Sol. n° 8* (Bucharest). Vol. III, pp. 87-94.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1966. — Le problème du climax et l'évolution des sols. *Oeco. planta.* Vol. 1, pp. 165-174.
- DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bul. Ecole Nat. Sup. Agron.* (Nancy) t. 8, fasc. 1, pp. 3-24.
- DUCHAUFOUR (Ph.), LELONG (F.), 1967. — Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux de sols lessivés. *C.R. Acad. Sci. D*, 264, pp. 1884-1887.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1968. — *L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils*. Masson ed. 94 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1970. — *Précis de pédologie*. Masson 482 p.
- ENDREY (A. S. de), 1954. — The organic matter content of Gold Coast soils. *Congr. Internat. Sci. Sol. n° 5* (Paris) t. 2, pp. 457-463.
- ENDREY (A. S. de), MONTGOMERY (C. W.), 1954. — Some nutrients aspects of the Gold Coast forest soils. *Congr. Internat. Sci. Sol n° 5* (Paris), vol. 3, pp. 268-273.
- ENDREY (A. S. de), QUAGRAINE (K. A.), 1960. — A comprehensive study of cation exchange in tropical soils. *Congr. Internat. Sci. Sol. n° 7* (Madison) Vol. II, pp. 312-321.
- ERHART (H.), 1956. — *La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et Rhexistasie*. Masson (Paris) 90 p.
- ERHART (H.), 1966. — Sur le rôle biochimique joué par le couvert végétal dans la genèse de la Kaolinite. *C.R. Acad. Sci.* 262, pp. 602-605.
- ERIKSSON (E.), 1952. — Composition of atmospheric precipitation I. Nitrogen compounds. *Tellus* 4, pp. 145-270.
- FAUCK (R.), 1960. — Matière organique et azote des sols de la moyenne Guinée et relations avec les rendements des cultures. *C.R. Acad. Agri.*, 46, 4, pp. 152-155.
- FAUCK (R.), 1971. — *Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale*. Fac. Sci. Strasbourg (thèse) 377 p. multigr.
- FLAIG (W.), 1970. — Contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. *Sci. Sol. n° 2*, pp. 39-72.
- FORESTIER (J.), 1957. — *La matière organique dans les sols de l'Oubangui Chari*. Bur. Sols A.E.F.
- FRANCO (E. P. C.), 1968. — Some cases of podzolisation under tropical conditions in Angola. *9. Congr. Internat. Sci. Sol.* Vol. III. pp. 265-273.
- FRIPIAT (J.), d'HOORE (J.), GERMAIN (R.), 1949. — Etude de la variation de la structure dans les sols soumis à différents modes de traitements à Yangambi. *Bull. Agri. Congo-Belge* XL, 1, pp. 409-439.
- GERMAIN (R.), EVRARD (C.), 1956. — *Etude écologique et phytosociologique de la forêt à Brachistegia laurentii*. Publi. I.N.E.A.C. série scient., n° 67.
- GREENLAND (D. J.), 1958. — Nitrate fluctuation in tropical soils. *J. agri. Sci.* Vol. L, 1, pp. 82-91.

- GREENLAND (D. J.), NYE (P. H.), 1959. — Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil Sci.* 10, 2, pp. 284-299.
- GREENLAND (D. J.), 1959. — Nitrogen gains and losses in tropical soils. *3^e Conf. Interafr. Sols* (Dalaba). Vol. I, pp. 531-535.
- GREENLAND (D. J.), KOWAL (J. M. L.), 1960. — Nutrient content of the moist tropical forest of Ghana. *Plant and Soil*, 12, pp. 154-174.
- HARDON (H. J.), 1936. — Factors governing the organic matter and nitrogen content of tropical soils. *Korte Meded. Alg. Proefsta. Landb.* n° 18, 24 p. in MOHR et VAN BAREN 1954 et in GREENLAND et NYE 1959.
- HARDON (H.), 1936. — Factoren die het organische stof- en stikstofgehalte van tropische gronden beheersen. *Meded. Alg. Proefsta. Landbouw.* Buitenzorg 11. pp. 517-537.
- HAWKINS (P.), BRUNT (M.), 1965. — *The soils and ecology of West Cameroun.* F.A.O. n° 2083. 2 vol. multigr.
- HENNEBERT (G. L.), LIVENS (P. J.). — L'extraction, le fractionnement et le dosage de la matière humique du sol. *Bull. Agri. Congo Belge.* Vol. XLIV, n° 3, pp. 453-492.
- HENIN (S.), DUPUIS (M.), 1945. — Essai de bilan de matière organique du sol. *Ann. Agro.* 15, pp. 17-29.
- HENIN (S.), TURC (L.), 1949. — Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Agri.* 35, p. 41-43.
- HENIN (S.), TURC (L.), 1950. — Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *4. Congr. Internat. Sci. Sol* (Amsterdam) 1, pp. 152-154.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), TURC (L.), 1959. — Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Sci.* 248, 1, pp. 138-141.
- HERVIEU (J.), 1961. — *Profils types de sols malgaches.* O.R.S.T.O.M.-Tanananarive 106 p. multigr. et annexe.
- HOPKINS (B.), 1966. — Vegetation of the Olokemeji forest reserve Nigeria. 4. The litter and soil with special reference to their seasonal changes. *J. Ecol.* 54, pp. 687-703.
- JACQUES-FELIX (H.), BETREMIEUX (R.), 1949. — Etude de quelques sols tropicaux. *Conf. Afri. Sols* (Goma) Vol. I, pp. 171-192.
- JACQUIN (F.), 1963. — *Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques.* (Thèse) Fac. Sci. Nancy 156 p.
- JACQUIN (F.), 1963. — Notions récentes concernant le bilan humique d'un sol cultivé. *Bull. Assoc. Franç. et. Sols* n° 10, pp. 442-468 et n° 11, pp. 492-499.
- JAIYBO (E.), MOORE (A. W.), 1963. — Soil nitrogen accretion under different covers in a tropical rain forest environment. *Nature* (London) 197, pp. 317-318.
- JENNY (H.), 1928. — *Soil Sci.* 27, pp. 169-188. in : DEMOLON 1952.
- JENNY (H.), 1929. — Relation of temperature to the amount of nitrogen in soils. *Soil Sci.* Vol. 27, pp. 169-188.
- JENNY (H.), 1930. — A study on the influence of climate up on the nitrogen and organic matter content of the soil. *Missouri Agri. Exp. Sta. Research. Bull.* n° 152 et *Soil Sci.* Vol. 29, pp. 193-206.
- JENNY (H.), 1933. — *Missouri Agri. Exp. Sta. Research. Bull.* n° 324.
- JENNY (H.), 1941. — *Factors of soil formation.* Mc Graw Hill ed. (New York), in LAUDELOUT 1962.
- JENNY (H.), BINGHAM (F.), PADILLA-SARAVIA (B.), 1948. — Nitrogen and organic matter contents of equatorial soils of Colombia, South America. *Soil Sci.* Vol. 66, pp. 173-186.
- JENNY (H.), 1948. — Great soil groups in the equatorial regions of Columbia South America. *Soil Sc.* Vol. 66, pp. 5-28.
- JENNY (H.), GESSEL (S. P.), GINGHAM (F.), 1949. — Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Sci.* Vol. 68, pp. 419-432.

- JENNY (H.), 1950. — Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Sci.* Vol. 69, 1, pp. 63-69.
- JENNY (H.), RAYCHAUDHORI (S. P.), 1960. — *Effect of climate and cultivation on nitrogen and organic matter reserves in Indian soils.* Indian Council Agri. Research 126 p.
- KAUFFMANN (J.), BOQUEL (G.), 1960. — Influence du thermo et de l'hydroperiodisme sur la formation de l'humus. Incidence sur le problème de la conservation de l'humus dans les terres acides sous climat tropical. *C.R. Acad. Sci.* 250, pp. 1314-1316.
- KONONOVA (M. M.), 1961. — *Soil organic matter its nature, its role in soil formation and in soil fertility.* Pergamon Press. 450 p.
- KONONOVA (M. M.), BELCHIKOVA (N. P.), 1961. — Quick methods of determination of the humus composition of mineral soils. *Soviet Soil Sci.* 1962, pp. 1112-1121.
- LAPLANTE (A.), 1954. — Les sols foncés tropicaux d'origine basaltique au Cameroun. *5^e Congr. Internat. Sci. Sol.* Vol. IV, pp. 144-147.
- LAUDELOUT (H.), d'HORRE (J.), 1949. — *Influence du milieu sur les matières humiques en relation avec la microflore du sol dans la région de Yangambi (Congo-Belge).* Publi. I.N.E.A.C. série scient. n° 44, 31 p.
- LAUDELOUT (H.), 1954. — Etude de l'apport d'éléments minéraux résultant de l'incinération de la jachère forestière. *2^e Conf. Interafr., Sols* (Léopoldville), Vol. I, pp. 382-388.
- LAUDELOUT (H.), GERMAIN (R.), 1954. — Premiers résultats sur la dynamique chimique des jachères herbacées et des pâtures à Yangambi. *5^e Congr. Internat. Sci. Sol.* Vol. II, pp. 312-321.
- LAUDELOUT (H.), MEYER (J.), 1954. — Les cycles d'éléments minéraux de matière organique en forêt équatoriale congolaise. *5^e Congr. Internat. Sci. Sol.* (Léopoldville). Vol. II, pp. 267-272.
- LAUDELOUT (H.), MEYER (J.), PEETERS (A.), 1960. — Les relations quantitatives entre la teneur en matières organiques du sol et le climat. *Agricultura* (Louvain). Vol. 8, 1, pp. 103-140.
- LAUDELOUT (H.), 1962. — *Dynamique des sols tropicaux et les différents systèmes de jachère.* F.A.O. (Rome), 126 p. multigr.
- LEEPER (G. W.), 1938. — Organic matter of soil as determined by climate. *J. Aust. Inst. Agri. Sci.* Vol. 4, pp. 145-147.
- LEIN (Z. Y.), 1940. — Les formes de combinaison de l'humus avec la partie minérale du sol. *Pedology* 10, pp. 41-57.
- LELONG (F.), 1969. — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). *Sci. de la terre*, mém. n° 14 (Nancy), 188 p.
- LENEUF (N.), 1959. — *L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés.* O.R.S.T.O.M. (Paris), 210 p.
- LENEUF (N.), 1966. — Exposé introductif sur le processus de lessivage dans les sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., Vol. IV, n° 4, pp. 25-27.
- LEROUX (H.), 1969. — *Les sols de la région granitique de Nassian (Côte d'Ivoire). Etude particulière de leur matière organique.* Fac. Sci. Abidjan (Thèse 3^e cycle), 136 p. multigr.
- LÉVÊQUE (A.), 1967. — *Les sols ferrallitiques de Guyane française.* O.R.S.T.O.M., Mémoire n° 3, 168 p.
- MAIGNIEN (R.), 1954. — Différents processus de cuirassement en A.O.F. *2^e Conf. Interafr. Sols* (Léopoldville), pp. 1469-1486.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — *Le cuirassement des sols en Guinée.* Mém. Services carte géol. Alsace-Lorraine (Thèse), 240 p.

- MAIGNIEN (R.), 1966. — *Compte rendu de recherches sur les latérites*. U.N.E.S.C.O., 155 p.
- MARTIN (D.), 1966. — *Etude pédologique dans le centre Cameroun (Naga, Eboko et Bertoua)*. Mém. O.R.S.T.O.M. n° 19, 92 p., carte pédologique (1/50.000, 1/20.000 et 1/5.000, 11 coupures 2 cartes 1/400.000, carte pédologique.
- MARTIN (G.), 1958. — *Essai de bilan de quatre années d'études pédologiques dans la vallée du Niari*. O.R.S.T.O.M.-Brazzaville, 89 p., multigr.
- MARTIN (G.), 1963. — Dégénération de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cah. O.R.S.T.O.M., série pédol.*, Vol. 2, pp. 8-14.
- METZ (J. L.), 1952. — Weight and nitrogen and calcium content of the annual litter fall of forest in South Carolina Piedmont. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proceed.* Vol. 16, n° 1, pp. 38-41.
- MEYER (J.A.), DUPRIEZ (G.-L.), 1959. — Quantité d'azote et d'autres éléments nutritifs apportés au sol par les eaux de pluie au Congo belge et leur intérêt agronomique. *3^e Conf. Interfr. Sols (Dalaba)*, vol. 1, pp. 495-499.
- MILNE (G.), 1937. — *E. Afric. Agric. J.*, vol. 3, n° 7.
- MITCHELL (H. L.), 1936. — Trends in the nitrogen, phosphorus, potassium and calcium content of the leaves of some forest trees during the growing season. *Black Rock For. Pap.*, vol. 1, pp. 30-44.
- MOHR (E. C. J.), 1944. — *The soils of equatorial regions with special reference to the Netherlands East Indies*. (Translated by L. Pendleton), Edwards éd., 766 p.
- MOHR (E. C. H.), VAN BAREN (F. A.), 1954. — *Tropical Soils*. N. V. U. La Haye-Nandung Interscience publi. (London, New York), 498 p.
- MONNIER (G.), 1965. — Action des matières organiques sur la stabilité structurale du sol. *Sols Afri.*, vol. X, n° 1, pp. 5-25.
- MONNIER (G.), TURC (C.), JEANSON-LUUSINANG (C.), 1962. — Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agron.*, 13, 1, pp. 55-63.
- MULLER (D.), NIELSEN (J.), 1965. — Production brute, pertes par respiration et production nette dans la forêt ombrophile tropicale. *Det. Forstlige Forgsvassen i Danmark*, vol. 29, pp. 69-160.
- NIKIFOROF (C. C.), 1937. — *Soil Sci. Amer. Proc.* Vol. 1, 333. in LEEPER, 1938.
- NIU CHING WEN, 1962. — Nature of humus in soils of tropics and humid subtropics. *Soviet. Soil Sci.*, vol. 11, pp. 506-512.
- NYE (P. H.), 1958. — Plant nutrients in some indigenous systems of agriculture. Rep. Conf. Directors Overseas Dep. Agric. *Colon. Off. Misc.* 531, pp. 43-47.
- NYE (P. H.), 1958. — The relation importance of fallows and soils in storing plant nutrients in Ghana. *J. W. afr. Sci. Ass.*, vol. 4, pp. 31-49.
- NYE (P. H.), 1960. — The soil under shifting cultivation. *Techn. Common. Bur. Soil. Sc. Bull.*, n° 51.
- NYE (P. H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant. and Soil.*, vol. 13, n° 4, pp. 333-346.
- NYE (P. H.), 1962. — Soil Fertility. in *Agriculture and Land use in Ghana*. Oxford Univ. Press.
- NYE (P. H.), GREENLAND (D. J.), 1964. — Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant and Soil.*, vol. 21, n° 1, pp. 101-112.
- OLLAT (C.), COMBEAU (A.), 1960. — Méthode de détermination de la capacité d'échange et du pH d'un sol. Relation entre le complexe absorbant et le pH. *Sols Afri.*, vol. 5, n° 3, pp. 343-372.
- OVINGTON (J. D.), MADGWICK (H. A. I.), 1959. — The growth and composition of natural stands of birch. *Plant and Soil.*, vol. 10, pp. 272-283.
- PERNET (R.), 1952. — L'humus forestier et son évolution après destruction du couvert végétal. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar D.*, fasc. 2, pp. 297-345.

- PERNET (R.), 1953 a. — Influence de la végétation sur l'évolution organique des sols gneissiques et basaltiques. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar*, D, t. 5, pp. 251-286.
- PERNET (R.), 1953 b. — Connaissance rapide du degré d'érosion d'un sol par la mesure de son état organique. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar*, D, t. 5, pp. 287-297.
- PERNET R., 1954. — Evolution des sols de Madagascar sous l'influence de la végétation. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar*, D, t. 6, pp. 201-419.
- PERRAUD (A.), 1969. — *Etude de quelques caractères analytiques de la matière organique des sols forestiers de Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 24 p., multigr., 12 tabl., 2 graph. h. t.
- PERRAUD (A.), 1969. — *Contribution à l'étude des composés humiques de la matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 18 p., multigr., 14 tabl. et 11 graph. h. t.
- PERRAUD (A.), 1970. — Note sur différents types d'humus de sols ferrallitiques forestiers de la Côte d'Ivoire. *C.R. Acad. Sci.*, série D, t. 270, pp. 1302-1305.
- PERRAUD (A.), NGUYEN KHA, JACQUIN (F.), 1971. — Essai de caractérisation des formes de l'humine dans plusieurs types de sols. *C.R. Acad. Sci.*, D, t. 272, pp. 1594-1597.
- PERRAUD (A.), 1971. — *La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire (Relations: sol, végétation, climat)*. Fac. Sci. Nancy I (Thèse), 87 p., multigr., 103 pl., fig. et tabl. h. t.
- QUANTIN (P.), 1965. — *Les sols de la République Centrafricaine*. *Mém. O.R.S.T.O.M.* n° 16, 113 p.
- RAMASWAMY (M. N.), 1956. — The humus content of laterite soils in the tropical evergreen forest of Mysore. *The Indian. For.*, vol. 82, n° 8, pp. 395-398.
- RICHE (G.), 1964. — *Les fractions de l'humus de quelques sols de plateau de la Côte d'Ivoire forestière*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 80 p., multigr.
- RIEFFEL (J.-M.), 1965. — *Etude de quelques composés humiques et de leurs liaisons avec le fer en zone forestière tropicale*. O.R.S.T.O.M.-Adiopodoumé, 35 p., multigr., 5 fig., h. t.
- RIQUIER (J.), 1966. — La matière organique dans les sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. pédol.*, vol. IV, n° 4, pp. 33-37.
- RIQUIER (J.), 1966. — Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. pédol.*, vol. IV, n° 4, pp. 75-88.
- RICARDO (R. P.), 1961. — *Caracteristicas dos Acidos Humicos de alguns solos de Angola*. Junta Investig. Ultramar. Est. Ens. Docu. n° 87 (Lisboa), 89 p.
- RICARDO (R. P.), 1968. — Composition de la matière organique de quelques sols ferrallitiques typiques. *9° Congr. Internat. Sci. Sol.*, vol. 3, pp. 257-263.
- RODIN (L. E.), BASILEVIC (N. I.), 1968. — World distribution of plant biomass. *in Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire*. Coll. U.N.E.S.C.O. (Copenhague), v. pp. 45-52.
- ROOSE (E.), JADIN (P.), 1969. — *Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao de moyenne Côte d'Ivoire (Station I.F.C.C. près de Divo)*. O.R.S.T.O.M.-I.F.C.C., 77 p., multigr.
- ROOSE (E.) et al., 1970. — *Erosion ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéas en basse Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M.-I.R.C.A., 115 p., multigr.
- RUSSELL (J. S.), 1964. — Mathematical expression of seasonal changes in soil organic matter. *Nature* (London), vol. 204, 4954, pp. 161-162.
- SANTYANARAYANA (K. V. S.), SWAMINATHAN (K.), VISWANATH (B.), 1946. — Carbon and Nitrogen status of Indian soils and their Profiles. *Indian J. Agri. Sci.*, vol. 16, pp. 316-327.

- SCHEFFER (F.), SUNKEL (R.), WELTE (E.), 1958. — Über Humuseigenschaften in Boden der Wechselfenchten Tropen. *Nature Wissenschaften*, vol. 45, pp. 274-275.
- SCHMID (M.), LA SOUCHÈRE (P. de), GODARD (D.), 1951. — *Les sols et la végétation au Darlac et sur le plateau des trois frontières*. Arch. Rech. Agro. Cambodge-Laos-Vietnam, n° 8, 112 p.
- SCHMID (M.), 1963. — Contribution à la connaissance des sols du Vietnam: le massif Sud-Annamitique et les régions limitophes. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., vol. 2, pp. 15-72.
- SCHULZ SHOMBURGK (E.), 1954. — Influencia de la materia organica sobre el intercambio ionico en los suelos del Llano. *Agron. Trop.* (Maracay), vol. 4, pp. 69-79.
- SEGALEN, 1954. — Sur l'existence de sols latéritiques bruns. *5^e Congr. Internat. Sci. Sol.*, vol. IV, pp. 204-209.
- SEGALEN, 1957. — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. Inst. Rech. Sci. Madagascar*, série D, t. VIII, pp. 1-182.
- SEGALEN, 1964. — *Le fer dans les sols*. O.R.S.T.O.M. (Initiation et documentation techniques n° 4), 150 p.
- SHERMAN (G. D.), 1949. — Factors influencing the development of lateritic and laterite soils in the Hawaiian Islands. *Pacific Sci.*, vol. III, 4, pp. 307-314, in AUBERT, 1954.
- SIFFERMANN (G.), BESNUS (Y.), MILLOT (G.), 1968. — Evolution et dégradation des phyllites dans les vieux sols ferrallitiques sur basaltes du Centre Cameroun. *Sci. Sol.*, n° 2, pp. 105-117.
- SIFFERMANN (G.), 1969. — *Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical*. Fac. Sci. Strasbourg (Thèse), 290 p., multigr.
- SMITH (R. M.), SAMUELS (G.), CERNUDA (C. F.), 1951. — Organic matter and nitrogen build-up in some Puertorican soil profiles. *Soil Sci.*, pp. 409-427.
- SOUCHIER (B.), DUCHAUFOUR (Ph.), 1969. — Sur la stabilité des suspensions argileuses en milieu acide. *C.R. Acad. Sci. D*, 268, pp. 1849-1852.
- STEPHENS (C. G.), 1949. — *A review of recent work on Australian tropical and subtropical soils*. Bur. Soil Sci. Techn. Commun. 46, pp. 1-8.
- SYS (C.), 1960. — *Notice explicative de la carte des sols du Congo et du Ruanda-Urundi*. Publi. I.N.E.A.C., 91 p.
- SYS (C.), 1961. — *La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes*. Publi. I.N.E.A.C., série Techn., n° 66, 149 p.
- TAMURA (T.), JACKSON (M. L.), SHERMAN (G. D.), 1953. — Mineral content of low humic, humic and hydrol, humic latosols of Hawaiï. *Soil. Sci. Amer. Proc.*, vol. 17, n° 4, pp. 343-346.
- TAN (K. H.), VAN SCHUYLENBORGH (J.), 1961. — On the organic matter in tropical soils. *Neth. J. Agr. Sci.*, t. 9, n° 3, pp. 174-180.
- TEMPANY (H.), 1950. — Soil organic matter in the tropics. *World Crops*, pp. 430-431.
- TERCINIER, 1954. — Les matières organiques, humus et sols de la Côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie. *Rev. Agri. Nouv. Caléd.*, nos 1-2, pp. 6-14.
- THOMANN (Ch.), 1963. — Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols: méthode au pyrophosphate. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. pédol., n° 3, pp. 43-72.
- THOMANN (Ch.), 1964. — Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'ouest africain. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. pédol. Vol. II, n° 3, pp. 43-79.
- TU MEN-CHAC (V. V.), 1961. — Humus and its role in the genesis of certain tropical and subtropical soils of China. *Soviet Soil Sci.*, vol. 12, pp. 1346-1354.

- TURENNE (J.-F.), 1969. — *Influence de la saison des pluies sur la dynamique des acides humiques dans les profils ferrallitiques et podzoliques sous savane de Guyane française*. O.R.S.T.O.M.-Cayenne, 28 p., multigr.
- VAGELER (P.), 1930. — *Gundriss der tropischen und subtropischen Bodenkunde (Berlin)*, 210 p., in MOHR and VAN BAREN, 1954.
- VAGELER (P.), 1933. — *An introduction to tropical soils* (translated by GREENE, 84 p.), in MOHR, 1944.
- VAN WANBEKE (A.), 1961. — Les sols du Rwanda-Burundi. *Pédologie*, vol. XI, t. 2, pp. 289-350.
- WAEGMANS (G.), LEENHEER (L. de), 1946. — La détermination des bases échangeables et leur répartition dans quelques sols de la vallée de la Lufira (Katanga). *Bull. Agri. Congo Belge*, vol. 1, n° 37, pp. 127-149.
- WAKSMAN (S. A.), 1938. — *Humus, origin, chemical composition and importance in nature*. Williams and Wilkins sed. (Baltimore).
- WEINMANN (H.), 1948. — Seasonal growth and changes in chemical composition of the herbage on Marandellas Sandveld. *Rhod. Agric.*, vol. 45, pp. 119-131.